

Maciej Sydor

Drewno w budowie maszyn

Historia najważniejszego tworzywa

Poznań 2011

Przewodniczący Komitetu Redakcyjnego
prof. dr hab. Waldemar Uchman

Redaktor Działu
prof. dr hab. Włodzimierz Prądyński

Recenzent
prof. dr hab. Mieczysław Matejak

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu,
Poznań 2011, Poland

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

ISBN 978-83-7160-629-8

Redakcja
mgr Maria Wiśniewska

Korekta
mgr Katarzyna Szach-Bolaczek

Przygotowanie rysunków
dr inż. Maciej Sydor

Projekt okładki
perfekt

Łamanie komputerowe
Stanisław Tuchołka

WYDAWNICTWO UNIwersytetu PRZYRODNICZEGO W POZNANIU
ul. Witosza 45, 61-693 Poznań
tel./faks: 61 848 7808, e-mail: wydawnictwo@up.poznan.pl
<http://www.wydawnictwo.up-poznan.net>

Wydanie I. Ark. wyd. 25,5. Ark. druk. 24,125.

Wydrukowano w Zakładzie Graficznym Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu,
ul. Wojska Polskiego 67, 60-625 Poznań
e-mail: zakgraf@up.poznan.pl

*Mojej żonie Marcie
dedykuje*

SPIS TREŚCI

Od autora	7
1. Wstęp	9
2. Inżynier, drewno i maszyna	11
2.1. „A naprzód co jest inżynier”	11
2.2. O tworzywach drzewnych i ich przydatności w budowie maszyn	13
2.2.1. Tworzywa drzewne a inne materiały inżynierskie	13
2.2.2. O właściwościach konstrukcyjnych drewna	16
2.2.3. Budowa wewnętrzna drewna	23
2.2.4. Barwa, połysk i rysunek drewna	34
2.2.5. Właściwości wytrzymałościowe drewna	38
2.2.6. Właściwości akustyczne drewna	45
2.2.7. Drewno a inne materiały inżynierskie	51
2.2.8. Najważniejsze użytkowo krajowe gatunki drewna	54
2.2.9. Kilka uwag o drewnie gatunków tropikalnych	81
2.2.10. Tworzywa drewnopochodne w budowie maszyn	83
2.2.11. Trwałość drewna	89
2.2.12. Wady drewna	94
2.2.13. Wymagania wobec tarcicy do budowy maszyn	99
2.2.14. Podsumowanie niepowtarzalnych właściwości drewna	101
2.3. Krótko o maszynie	103
3. Maszyny z drewna	109
3.1. Świt maszyn – maszyny proste	109
3.2. Maszyny transportowe	118
3.2.1. Okręty – największe w dziejach świata maszyny z drewna ..	118
3.2.2. Pojazdy	133

3.2.3. Dźwignice	146
3.3. Maszyny latające zbudowane z udziałem drewna	155
3.3.1. Początki lotnictwa	155
3.3.2. Loty silnikowe	168
3.3.3. Zmierzch drewnianych samolotów	182
3.4. Maszyny napędowe z drewna i niektóre ich zastosowania	190
3.4.1. Koła wodne	190
3.4.2. Wiatraki	200
3.4.3. Koła deptakowe i kieraty	228
3.5. Wybrane maszyny robocze z drewna	236
3.5.1. Tokarki	236
3.5.2. Pilarki	249
3.5.3. Młoty mechaniczne	264
3.5.4. Maszyny portowe	269
3.6. Wybrane maszyny energetyczne z drewna	275
3.7. Niektóre drewniane instrumenty muzyczne	284
3.7.1. Wykorzystanie akustycznych właściwości drewna	284
3.7.2. Skrzypce	289
3.7.3. Fortepian	294
3.7.4. Mechaniczne instrumenty muzyczne	302
4. Współczesne zastosowania drewna w budowie maszyn	305
4.1. Kilka uwag ogólnych	305
4.2. Zastosowania litego drewna	306
4.3. Zastosowania tworzyw drewnopochodnych	317
4.4. Nietypowe zastosowania tworzyw drzewnych	334
5. Zakończenie	345
Teksty źródłowe	347
Literatura	351
Autorzy taksonów	367
Indeks osobowy	371
Indeks rzeczowy	375
Summary	383

OD AUTORA

W roku 2006, ku mojemu dużemu zadowoleniu, zostałem poproszony o napisanie krótkiego rozdziału o historii techniki napędowej, który otwierał obszerną monografię pod redakcją Pana Profesora Bogdana Branowskiego, traktującą o konstruowaniu napędów współczesnych maszyn. Przygotowując się do przedsięwzięcia, dotarłem do kilkudziesięciu faksymiliów materiałów źródłowych, innych opracowań z obszaru historii techniki oraz starych, nierzadko ponadstuletnich podręczników i katalogów z zakresu drzewnictwa i podstaw konstrukcji maszyn. Dużą część tej literatury wyszukałem w antykwariatach, kilka prac pochodziło z biblioteki Pana Profesora, kilka z biblioteki Pana Doktora Wojciecha Kiena, a niektóre (w tym niemal wszystkie starodruki) z cyfrowych bibliotek dostępnych w internecie.

Skorzystałem z życzliwości pracowników naukowych Wydziału Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, i tak: skonsultowałem poprawność metodologiczną treści podpunktów 2.2.3-2.2.14 ze specjalistą w dziedzinie anatomii drewna Panem Profesorem Waldemarem Molińskim, kierownikiem Katedry Nauki o Drewnie, pracując zaś nad podpunktami 3.5.1-3.5.3, dotyczącymi obrabiarek zbudowanych z udziałem drewna, skorzystałem z cennych uwag merytorycznych eksperta w tej dziedzinie Pana Doktora Wojciecha Kiena, wieloletniego kierownika Zakładu Obróbki i Obrabiarek do Drewna.

Na temat treści podpunktów 2.1, 2.3, 3.1-3.4 i 4.1-4.4 miałem okazję podyskutować z Panem Profesorem Bogdanem Branowskim, specjalistą z dziedziny budowy maszyn, kierownikiem Zakładu Metod Projektowania Maszyn w Instytucie Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

Dziękuję im wszystkim za poświęcony czas, konstruktywne uwagi i życzliwość, a Panu Profesorowi Bogdanowi Branowskiemu dodatkowo za Jego energię, którą inspiruje swoje otoczenie do działania.

Podjęta w książce problematyka techniczno-historyczna przekłada się na pewną dwoistość prezentowanych treści. Z założenia jest to książka zarówno humanistyczna, jak i techniczna. Traktuje o twórcach techniki oraz o parametrach technicznych ich dzieł. Moją ambicją, jako inżyniera mechanika pracującego na Wydziale Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, było przedstawienie, na wybranych przykładach, znaczenia drewna w rozwoju i materializacji europejskiej *maszynowej* myśli technicznej. Zdaję sobie sprawę, że historia budowy maszyn, nawet zaprezentowana jednostronnie, tylko z perspektywy jednego twórcy, jest zagadnieniem szerokim, wystarczającym na całą serię książek. Mając to na uwadze, świadomie zdecydowałem się na syntetyczny opis najwcześniejszych dziejów, i to jedynie wybranych rodzajów maszyn. O ile było to możliwe, w opisach zamieściłem informacje o szczegółach technicznych konstrukcji oraz podałem wartości liczbowe parametrów charakteryzujących maszyny.

Dobór prezentowanych zagadnień służy dwóm celom: po pierwsze – przybliżeniu współczesnym inżynierom historycznych dróg poszukiwań rozwiązań technicznych, po drugie – zachęceniu humanistów do lepszego poznania, często marginalizowanych, materialnych aspektów historii.

Nie pominięto udziału Polaków w rozwoju techniki.

Maciej Sydor
(sydor@up.poznan.pl)

Poznań, sierpień 2008

1.

WSTĘP

Drewno, razem z kamieniem, jest prąźródłowym tworzywem techniki – prawdopodobnie gdyby nie jego unikatowe właściwości konstrukcyjne, nie powstałaby technika, a na pewno nie w takiej formie, jaką znamy. Nawet dziś, pomimo imponującego rozwoju technologicznego, ludzie nie potrafią i nie chcą pozbyć się drewna ze swojego życia. Pragną mieć drewniane przedmioty codziennego użytku, meble, sprzęt sportowy i zabawki; pragną mieszkać w otoczeniu drewnianych podłóg, drzwi i okien, palić drewnem ogniska i w kominku, pływać na drewnianych żaglowcach. Ponadto nikt dziś nie wyobraża sobie życia bez papieru – gazet, książek, zeszytów, opakowań, plakatów czy papieru śniadaniowego...

Tytuł książki zawiera stwierdzenie, że drewno jest najważniejszym materiałem w budowie maszyn. Z pewnością nie można go uznać za najważniejsze tworzywo stosowane w tej dziedzinie współcześnie, ale niezaprzeczalnie jest najważniejszym tworzywem wszech czasów.

Za najstarszą maszynę w dziejach ludzkości można uznać łuk, skonstruowany najprawdopodobniej ponad 30 000 lat temu¹. Przed rewolucją przemysłową wszystkie maszyny transportowe (statek, wóz, dźwignica), silniki (koło wodne, wiatrak, kierat, koło deptakowe), maszyny technologiczne (młyn, tokarka, pilarka) i maszyny energetyczne (pompa) były wykonane z drewna. Przez jakieś 30 000 lat niemal wszystkie urządzenia będące podstawą cywilizacji technicznej budowano z drewna, a zaledwie

¹ Łuk opisano na s. 110 i dalszych. Najstarszym znanym artefaktem jest archetyp noża, młotka i dłuta jednocześnie – krzemienno-kościenny pięściak, wytwór kultury Olduvai sprzed 1 500 000 lat, znaleziony w Tanzanii przez Louisa Leakeya w latach trzydziestych XX wieku (fotografie dostępne na stronie internetowej Norwich Castle Museum – www.museums.norfolk.gov.uk), jednak to łuk jest pierwszym w historii urządzeniem typu maszynowego (uzasadnienie na s. 110-111).

przez ostatnie 200-250 lat – ze stopów metali, z tworzyw sztucznych oraz z udziałem ceramik. O fundamentalnym znaczeniu drewna w budowie maszyn mogą również świadczyć historyczne definicje maszyny, w tym najstarsza znana: *Maszyna to zwarty zespół części drewnianych wykazujący wszelkie zalety przy podnoszeniu ciężarów. Maszynę wprawia się sztucznie w ruch za pomocą kół [...]*² (WITRUWIUSZ 27-13 p.n.e.) lub najstarsza polskojęzyczna autorstwa Stanisława Solkiego³: *Machina. Związanie iakie misterne z drzewa albo inzej máteryi* (SOLSKI 1683, Zabawa I, Część I, s. 4)⁴.

Wydaje się, że dziś drewno w budowie maszyn, wyrokiem Postępu Technicznego, zostało skazane na całkowitą marginalizację. Jednak to właśnie ono jest antenatem wszystkich obecnie stosowanych materiałów inżynierskich i nawet w czasach współczesnych znajduje zaskakująco wiele zastosowań w tej dziedzinie (s. 305 i dalsze).

² Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst w brzmieniu: *Machina est continens e materia coniunctio maximas ad onerum motus habens virtutes. Ea movetur ex arte circulorum rotationibus [...]* znajduje się w traktacie *De architectura* (Liber X, Capitulum 1) napisanym przez Witruwiusza (Marcus Vitruvius Pollio, 70/80?-ok. 15 p.n.e.), rzymskiego architekta, budowniczego maszyn i artystę. Traktat powstał w latach 27-13 p.n.e., a został opublikowany po raz pierwszy, z odpisu z IX wieku, w 1486 roku (przekłady polskie 1840, 1956). Traktat jest kompilacją doświadczeń Witruwiusza oraz greckich i rzymskich podręczników architektury; jest jedynym zachowanym w całości tego typu dziełem ze starożytności. XV-wieczna publikacja miała kluczowe znaczenie dla ukształtowania się form architektury renesansu (SZOLGINIA 1991). Odpis odnaleziono w 1414 roku w klasztorze Monte Cassino. Traktat po łacinie jest dostępny m.in. na stronie Bibliotheca Augustana (www.fh-augsburg.de/~harsch/augustana.html).

³ Stanisław Solki (1620-1670) – teolog, matematyk, mechanik i architekt, autor podręczników *Geometra polski* (1-3, Kraków 1683, 713 s. – vide przypis 4) i *Architekt polski* (Kraków 1690, 261 s. – vide przypis 8, s. 12). Jezuita; profesor filozofii w Rawie (1652-1654), matematyki w Kaliszu (1654-1655) oraz filozofii w Lublinie (1656-1659), prefekt szkół i profesor teologii moralnej w Jarosławiu (1659-1660), profesor *Pisma Świętego* w Poznaniu (1660-1662), rektor w Sandomierzu (1664-1665) oraz profesor teologii moralnej w Przemyślu (1666-1667), otrzymał od króla tytuł *mathematicus regius*.

⁴ Cytowana definicja została zaczerpnięta z pierwszego polskojęzycznego podręcznika miernictwa i geometrii autorstwa Stanisława Solkiego zatytułowanego *Geometra polski*. Na jego stronie tytułowej napisano: *Geometra Polski To Iest Navka Rysowania, Podziału, Przemieniania, y Rozmierzania Liniy, Angułow, Figur, y Brył pełnych. Podany do Drokv. Przez X. Stanisława Solkiego, Societatis Jesu*. Faksymile podręcznika jest dostępne m.in. na stronie Biblioteki Politechniki Gdańskiej (www.wbss.pg.gda.pl).

2.

INŻYNIER, DREWNO I MASZYNA

2.1. „A naprzód co jest inżynier”

Najważniejszy w każdym działaniu jest początek
(Platon, 427-347 p.n.e.)⁵

Książka ma trzech bohaterów: twórcę techniki, jej najważniejsze tworzywo oraz najważniejszy wytwór – maszynę. Rozdział drugi przybliży pochodzenie określenia *inżynier*, charakteryzuje materiał konstrukcyjny *drewno* oraz konotuje *maszynę*.

Słowo *inżynier* ma współcześnie dwa znaczenia – oznacza uprawianą profesję oraz jest tytułem zawodowym. Określenia *inżynier* (w brzmieniu *encignerius*) użyto po raz pierwszy w 1196 roku w kronikach włoskiej Piacenzy (*Annales Placentini Guelfi*) (LIEBFELD 1964). Początkowo określenie to, wywodzące się od łacińskiego nazwania bystrego i wynalazczego umysłu⁶, dotyczyło wyłącznie specjalistów zajmujących się techniką wojskową (w średniowieczu budowniczych machin wojennych służących do miotania pocisków⁷ nazywano w Hiszpanii *ingéneros*, we Francji *engigneor*, a w Anglii *engyneour*). Dopiero na przełomie wieków XVI i XVII mianem *inżyniera* określano również specjalistów, twórców techniki,

⁵ REALE (1996).

⁶ Łac. *ingenium* – umiejętność, zdolność.

⁷ Katapult i ich odmian (np. onagrów, zwanych też mangonellami) oraz balist (np. trebuszów lub biff). Katapulty wykorzystują zasadę dźwigni i miotają pociski stromotorowo, natomiast balisty – energię sprężystości, a tor lotu pocisku jest płaski.

z dziedzin innych niż technika wojenna. W czasach oświecenia Stanisław SOLSKI (1690) w *Architektce polskim*⁸ pisał już literalnie, że *indzienierem* jest nie tylko człowiek zajmujący się sztuką wojenną, ale i ten, *który najmniejsze wynalazki dowcipu ludzkiego użyć potrafi*. Według KUCHARZEWSKIEGO (1913) określenie *ingenier* zostało użyte po raz pierwszy w Polsce w 1643 roku przez architekta wielkopolskiego Jana Dekana w tłumaczeniu dzieła Diega Uffana *Archelia To iest. Nauka y Informatia O Strzelbie y o Rzeczach do niey należących*. Współczesny Dekanowi, najbardziej znany w Europie polski twórca techniki czasów oświeceniowej rewolucji naukowej, Józef Naronowicz-Naroński (ok. 1610-1678), w dziele *Architectura militaris to jest budownictwo wojenne*, napisanym w latach 1655-1659, drobiazgowo objaśnia etos inżyniera:

A naprzód co jest ingenier. Ingenier, a z włoska nazwany indzienier – słowo z tytułu barzo wysokiego i zacnego, bo ingenium ad ingeniarum [talent do pomysłów] – od wynalazków wszelkich, inwencji, struktur i machin generaliter [ogólnie] jest nazwany. [...] Wielki w tym błąd ludzi pospoliczych, którzy lada wałmistrza, co wał kopie albo trochę rozmiaru [miernictwa] umie, lubo budownictwa domowego albo wojennego, indzienierem nazywają, a jeszcze kiedy się po cudzoziemsku ubierze, to (mając za najlepsze przewożne [przywiezione] rzeczy, rozumiejąc że się tego Polak nigdy nie nauczył) tak o nim siła rozumieją i twierdzą, że go nie tylko ingenierem, ale i matematykiem nazywają.

A większy i zacniejszy jest tytuł i honor byź ingenierem niż matematykiem, bo matematyk może byź theoretice tylo uczoney, a ingenier practice umiejący nauki matematyczne w samej rzeczy odprawować, egzekwować i robić. Może być matematyk tylo matematykiem, a nie być ingenierem, lecz ingenier musi być matematykiem. Jako zacniejsza z samą nauką – praktyka od samej nauki, tak też ingenier od gołego w teoretyce matematyka. [...] Co ma umieć ingenier. Ma ingenier byź biegły we wszystkich naukach matematycznych, mianowicie tych, bez których ingenierem nazwan być nie może. [...] A najbarziej ma umieć artem mechanicum [sztukę mecha-

⁸ *Architekt polski* jest najstarszą polską książką z zakresu budowy maszyn. Na jej stronie tytułowej napisano: *Architekt polski: to iest Nauka Ulzenia Wszelkich Ciężarów. Używania potrzebnych Máchin ziemnych y wodnych. Stáwiania ozdobyń Kościołow máłym kofztem. O proporcji rzeczy wysoko stoiących. O wŃchodách y pawimentách. Czego Ńie chronić y trzymać w budynkách od fundamentów aż po dách. O Fortyfikácii y infyńch trudnościách Budowniczych*.

niki], bo ta nauka jest prawie dusza inżynierska, aby umiał budować różne machinacje [tu: urządzenia], jako windy do dźwignia i ciągnięcia najcięższych rzeczy, także akwedukty, rowy wodne na górę, młyny wietrzne i wodne *compendiosissime* [najkorzystniej], aby i w najmniejszej wodzie i w najmniejszym wietrze mliwa swoje miały [mogły funkcjonować] (za NOWAKIEM 1961, s. 92-93).

Przytoczona definicja inżyniera nie straciła przez 350 lat nic na swojej aktualności. Można do niej dodać tylko, że inżynier, oprócz dobrze opanowanej teorii i pewnej dozy doświadczenia, powinien posiadać wewnętrzny zbiór norm i reguł zapewniających determinację w uzupełnianiu, weryfikacji i aktualizacji swojej wiedzy.

2.2. O tworzywach drzewnych i ich przydatności w budowie maszyn

Każda reguła, mimo że prawdziwa, na dłuższą metę ma wyjątek
(Heraklit z Efezu, 540-480 p.n.e.)⁹

2.2.1. Tworzywa drzewne a inne materiały inżynierskie

Określenie *drewno* dotyczy na ogół okorowanych pni, rzadziej gałęzi czy korzeni ściętych drzew i krzewów, ukształtowanych przez obróbkę na odpowiednie sortymenty. Drewno jest jednym z wielu materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych w technice; może być stosowane w postaci drewna litego lub w formie tzw. *tworzyw drewnopochodnych* (podpunkt 2.2.10, s. 83).

Drewno konstrukcyjne jest pozyskiwane z określonych gatunków drzew iglastych i liściastych. Na świecie występuje od ponad 30 000 (ZIELSKI i KRĄPIEC 2004, KOKOCIŃSKI 2005) do blisko 40 000 (WAGENFÜHR 1984) gatunków roślin drzewiastych, z których 3000-5000 może mieć znaczenie użytkowe. W literaturze bliżej opisano około 1500 gatunków, spośród których mniej więcej 500 jest przedmiotem światowego handlu (ZIELSKI

⁹ TIHOLAZ (2005).

i KRAPIEC 2004), a około 200 ma istotne znaczenie w technice (KOKOCIŃSKI 2005). W Europie występuje zaledwie 20-30 lasotwórczych gatunków drzewiastych (WAGENFÜHR 1984).

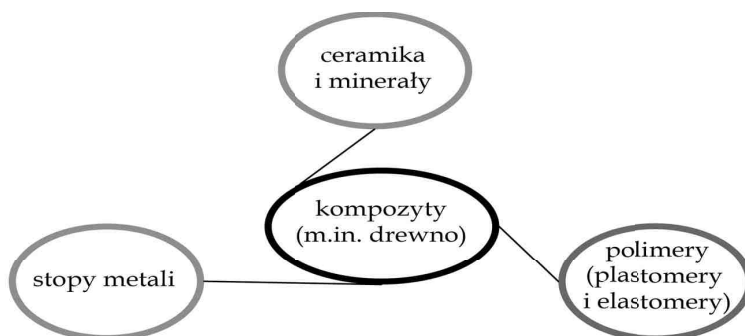
Wytwarzanie przedmiotów z drewna nie wymaga aż tak skomplikowanego wyposażenia, jak np. produkcja podobnych przedmiotów z metalu czy ceramiki, dlatego drewno – powszechnie stosowane w przeszłości – również dzisiaj ma kilkanaście tysięcy zastosowań. O jego cywilizacyjnym znaczeniu w przeszłości może świadczyć fakt, że w XVI wieku, w okresie największych odkryć geograficznych, zapotrzebowanie na drewno do budowy okrętów było tak duże, iż populacja nadających się do tego celu drzew została niemal zupełnie wytrzebiona (szczególnie drzewostan dębowy)¹⁰, a w wiekach XVII i XVIII, czyli w czasie rewolucji przemysłowej, duża część Europy została całkowicie pozbawiona lasów wskutek gwałtownego wzrostu zużycia drewna¹¹. Obecnie światowa produkcja drewna jest prawie taka sama jak produkcja stopów żelaza i wynosi w przybliżeniu 10⁹ t rocznie (ASHBY i JONES 1996). W Polsce udział produkcji drewna i wyrobów z drewna (bez papieru i masy włóknistej) w wartości produkcji przemysłowej w latach 2005-2006 wynosił około 3% – dorównywał udziałowi tworzyw sztucznych i gumy, był za to mniejszy od produkcji metali, która wynosiła około 4,5% (MAŁY ROCZNIK STATYSTYCZNY... 2007).

Jedną z dziedzin techniki jest inżynieria mechaniczna, czyli wiedza obejmująca budowę i eksploatację maszyn. Wszystkie współczesne konstrukcyjne materiały inżynierskie stosowane w budowie maszyn można sklasyfikować w czterech grupach: (1) stopy metali, (2) ceramika i minerały, (3) polimery, (4) kompozyty (rys. 2-1).

Stopy metali (gr. *μέταλλο*) to jednorodne izotropowe submikroskopowe mieszaniny faz związków międzymetalicznych. Ceramika (gr. *κεραμικός*) to tworzywa nieorganiczne i niemetaliczne, otrzymywane w wyniku obróbki cieplnej (wypalania), najczęściej gliny. Polimery (gr. *πολιμερες*) to substancje organiczne zbudowane z cząsteczek o bardzo dużej masie

¹⁰ Na jeden żaglowy okręt pełnomorski zużywano średnio około 3000 dębów. Biorąc pod uwagę fakt, że na 1 ha rośnie przeciętnie około 30 odpowiednich, 100-120-letnich, dębów, można oszacować, iż na jeden żaglowiec wycinano blisko 100 ha lasu dębowego (STRATER 1993).

¹¹ Roczny przyrost drewna w Europie jest stosunkowo niewielki i wynosi od 4,8 do 10,7 m³/ha. W Polsce w latach 1980-2000 wyniósł on 6,59 m³/ha (RAPORT O STANIE LASÓW... 2007).



Rys. 2-1. Miejsce drewna w strukturze konstrukcyjnych materiałów inżynierskich

cząsteczkowej, złożone z łańcuchów powtarzających się członów (merów). Kompozyty (łac. *compositus*) mogą łączyć w swojej strukturze trzy wcześniej wymienione grupy materiałów. Ich właściwości są pewnego rodzaju wypadkową właściwości poszczególnych komponentów (faz). Interakcja pomiędzy poszczególnymi fazami zachodzi na poziomie makroskopowym. W tym znaczeniu nie są materiałami kompozytowymi np. stopy metali, które w skali mikroskopowej tworzą kompozycję wielu składników, ale w obrazie makroskopowym zachowują się jak typowe materiały jednorodne. W kompozytach, materiałach złożonych przynajmniej z dwóch składników, mogą wystąpić ciągle, makroskopowe kompozycje konstrukcyjne w postaci: (1) włókien (np. drewno, sklejka, poliamid zbrojony włóknem węglowym – CFRP), (2) struktur trójwymiarowych (np. materiały kompozytowe z rdzeniem typu *plaster miodu*), (3) nieregularnej (np. płyta wiórowa, WPC¹², beton) lub (4) kombinacji wyżej wymienionych (np. beton zbrojony stalą). Kompozyty włókniste (tzw. *laminaty*) można sklasyfikować, w zależności od sposobu uporządkowania włókien, jako: (1a) kompozyty kierunkowe (np. drewno lite, *lignoston*¹³) – włókna ułożone są w jednym kierunku, (1b) maty kompozytowe (np. sklejka, *lignofol*¹⁴) – włókna ułożone są ortogonalnie w dwóch prostopadłych kierunkach lub (1c) kompozyty włókniste nieuporządkowane (np. płyta pilśniowa).

¹² Przypis 79 na s. 84.

¹³ Opisany na s. 85.

¹⁴ Opisany na s. 85.

Centralna pozycja kompozytów wśród materiałów inżynierskich (rys. 2-1) wynika z faktu, że wartości ich właściwości fizycznych są pośrednie w porównaniu z analogicznymi wartościami pozostałych materiałów. Naturalną cechą kompozytów jest anizotropia właściwości wytrzymałościowych, która nie zawsze musi być traktowana jak wada. Budowa materiału anizotropowego daje możliwość dostosowania kierunków anizotropii (czyli wartości poszczególnych wskaźników wytrzymałościowych) do stanu naprężenia w materiale (DĄBROWSKI 2002).

Drewno jest zbudowane z tkanki drzewnej złożonej z różnego rodzaju elementów anatomicznych (tab. 1). Można je potraktować jako kompozyt składający się z trzech faz – ciągłej (lignina i hemicelulozy), otaczającej fazę rozproszoną (zbrojenie – krystality celulozy), oraz porów wypełnionych powietrzem. Właściwości drewna są wypadkową właściwości poszczególnych faz, zależą od ich udziałów i rozmieszczenia w tkance drzewnej, cech geometrycznych fazy rozproszonej oraz liczby porów w jednostce objętości.

Tabela 1

Udziały objętościowe elementów anatomicznych w tkance drzewnej (KOKOCIŃSKI 2005)

Typ tkanki	Drewno iglaste			Drewno liściaste		
	min.	średnio	maks.	min.	średnio	maks.
Naczynia	-	-	-	5	20	58
Cewki	87	92	95	-	-	-
Włókna drzewne	-	-	-	26	49	78
Promienie drzewne	4	6	10	6	18	28
Miękisz	~0	1,5	2	3	13	21
Przewody żywiczne	-	0,4	1,1	-	-	-

2.2.2. O właściwościach konstrukcyjnych drewna

O przydatności technicznej drewna w budowie maszyn decydują jego właściwości konstrukcyjne, które są *minimalnym zbiorem zmiennych określających [...] relacje obiektu do jego otoczenia* (TARNOWSKI 2004) i determinują

charakterystyki użytkowe wykonanego z niego wyrobu. Ważniejsze właściwości drewna jako materiału na elementy maszyn zestawiono w tabelach 2-7, w których poszczególnym właściwościom nadano kolejne liczby porządkowe.

Wszystkie właściwości drewna muszą być rozpatrywane w aspekcie jego niejednorodnej „kierunkowej” budowy, co sprawia, że większość z nich można zdekomponować na trzy składowe (zgodnie z kierunkami anatomicznymi drewna, np. moduł Younga, wytrzymałość na rozciąganie itp.). Pewne grupy cech są ze sobą związane (np. wytrzymałościowe z wilgotnościowymi). Wszystkie cechy drewna wynikają z jego budowy chemicznej i anatomicznej.

Wymienione w tabelach od 2 do 7 właściwości drewna przekładają się na cechy użytkowe wyrobu drewnianego. Podczas projektowania konkretnej części maszyny jej funkcja narzuca zestaw cech, które są brane pod uwagę. Najczęściej jest to kilka lub kilkanaście wybranych z kilkudziesięciu rodzajów właściwości wymienionych w tabelach. Wszystkie

Tabela 2

Wybrane właściwości fizyczne ogólne oraz akustyczne materiałów drzewnych

Lp.	Grupa właściwości	Rodzaj właściwości		
1	Fizyczne ogólne	Gęstość		
2		Wilgotnościowe	Wilgotność	
3			Kurczliwość i pęcznienie	liniowe
4				objętościowe
5			Nasiąkliwość i przesiąkliwość	
6			Higroskopijność	
7		Porowatość		
8	Akustyczne	Prędkość fali	podłużnej	
9			poprzecznej	
10		Tłumienie z powodu histerezy sprężystej (i inne mechanizmy)		
11		Oporność akustyczna		
12		Współczynnik odbicia fali dźwiękowej		
13		Częstotliwość rezonansowa i szerokość rezonansu		

Tabela 3

Wybrane właściwości wytrzymałościowe materiałów drzewnych

Lp.	Grupa właściwości	Rodzaj właściwości				
14	Wytrzymałościowe	Wytrzymałość statyczna	doraźna	na rozciąganie		
15				na ściskanie		
16				na zginanie		
17				na ścinanie		
18				na naciski		
19				inne		
20			trwała	na rozciąganie		
21				na ściskanie		
22				na zginanie		
23				na ścinanie		
24				na naciski		
25				inne		
26			Wytrzymałość zmęczeniowa (różne obciążenia)			
27			Sprężystość	Liniowy moduł sprężystości (Younga)		
28				Objętościowy moduł sprężystości (Kirhoffa)		
29	Twardość/ścieralność					
30	Udarność					
31	Łupliwość					
32	Plastyczność					

właściwości drewna można podzielić na dwie grupy parametrów: subiektywne – zależne od podmiotu oceniającego oraz obiektywne – mierzalne. W przeszłości o zastosowaniu drewna w budowie maszyn decydowały jego korzystne, w porównaniu z innymi dostępnymi materiałami, parametry obiektywne. Współcześnie, w większości przypadków, decydują cechy subiektywne, czyli głównie walory estetyczne. Do grupy **parametrów subiektywnych** można zaliczyć eksploatacyjno-ekonomiczne cechy niemierzalne (tab. 5 i 7), natomiast **czynnikami obiektywnymi** są mierzalne¹⁵ wartości właściwości fizycznych i technologicznych drewna (tab. 2, 3, 4 i 6).

¹⁵ Aby można było uznać jakąś właściwość za mierzalną, muszą być spełnione trzy warunki – muszą istnieć: przyrząd do jej pomiaru, metoda pomiaru i skala pomiaru.

Tabela 4

Wybrane właściwości technologiczne materiałów drzewnych

Lp.	Grupa właściwości	Rodzaj właściwości		
33	Technologiczne	Obrabialność	skrawaniem	frezowanie
34				toczenie
35				wiercenie
36				piłowanie
37				szlifowanie
38				bezwiórowo
39			gięcie	
40			łupanie	
41			nagniatanie	
42			prasowanie	
43			polerowanie	
44			hydrotermicznie	
45			chemicznie	
46			Podatność na uszlachetnianie	warstwy wierzchniej
47		objętości		
48		Podatność na klejenie		
49		Koszt obróbki (np. łatwość obróbki, energochłonność)		
50		Jednorodność/ długość partii dostarczonego materiału/ powtarzalność właściwości w poszczególnych partiach		

Tabela 5

Wybrane właściwości eksploatacyjne materiałów drzewnych

Lp.	Grupa właściwości	Rodzaj właściwości			
51	Eksploatacyjne	Estetyka	barwa i rysunek		
52			połysk		
53			zapach		
54		Jakość (stopień spełnienia wymagań użytkownika)	niezawodność (również naprawialność)		
55			funkcjonalność		
56			bezpieczeństwo		
57			trwałość	odporność na biokorozję	
58				odporność na korozję chemiczną	
59			bioaktywność		
60			odporność na ogień		

Tabela 6

Wybrane właściwości termiczne, elektryczne i inne fizyczne materiałów drzewnych

Lp.	Grupa właściwości	Rodzaj właściwości
61	Ciepłne	Ciepło właściwe
62		Przewodnictwo ciepłne
63		Rozszerzalność cieplna
64	Elektryczne	Konduktywność
65		Przenikalność elektryczna
66		Wytrzymałość elektryczna
67		Współczynnik strat dielektrycznych
68		Odporność na prąd pełzający
69	Inne fizyczne	Współczynnik tarcia i ścieralność
70		Przepuszczalność gazów
71		Zakres temperatury pracy
72		Pochłanianie cieczy niepolarnych (np. oleju)

Tabela 7

Wybrane właściwości ekonomiczne materiałów drzewnych

Lp.	Grupa właściwości	Rodzaj właściwości
73	Ekonomiczne	Dostępność (m.in. koszt zakupu)
74		Koszt utylizacji
75		Czas oczekiwania na dostawę

Wybrane parametry subiektywne, umownie podzielone na trzy grupy - (1) estetyka, (2) jakość, (3) dostępność

(1) Estetyka. W czasach, kiedy można wybierać spośród setek tysięcy praktyczniejszych materiałów inżynierskich, pewne unikalne estetyczne cechy drewna mogą zadecydować o jego zastosowaniu. Najważniejszym miernikiem oceny estetycznej wyrobu jest jego wygląd¹⁶. Wrażenia wizualne i związane z tym doznania estetyczne potencjalnego użytkownika każdego artefaktu są bardzo istotnym kryterium oceny (poza walorami

¹⁶ Barwa i połysk – opisane szerzej w dalszej części (s. 34 i dalsze) oraz rysunek powierzchni, o którym w kontekście drewna wspomniano w podpunkcie 2.2.3 (s. 22), a w odniesieniu do wybranych jego gatunków – w podpunkcie 2.2.8 (s. 54 i dalsze).

czysto funkcjonalnymi) i mogą zdecydować np. o zakupie konkretnego wyrobu, nierzadko nawet pomimo obiektywnie gorszych jego parametrów technicznych (osiągów). Rysunek i barwa drewna charakteryzują się naturalną harmonią (gatunki liściaste, np. graby, buki, lipy, brzozy) lub naturalnym kontrastem (gatunki iglaste i tropikalne liściaste, a wśród tych ostatnich szczególnie hebanowce, mahonie i gatunki zbliżone do nich kolorystycznie). Poszczególne kolory przekroju drewna dopełniają się i mają jednakowe nasilenie. Szczególnie ciekawe efekty kolorystyczne daje występująca w pewnych warunkach naturalna falistość słoje, która powoduje ceniony u niektórych gatunków wzorzysty rysunek drewna (falistość jest uważana za cechę zmniejszającą techniczną przydatność drewna – pogarsza właściwości wytrzymałościowe). Falistość słoje jest zjawiskiem typowym u niektórych rodzajów, np. u grabów (*Carpinus L.*), cisów (*Taxaceae Gray*) i jałowców (*Juniperus L.*).

(2) Jakość. Jakość wyrobu jest zwykle rozumiana nie jedynie w swoim wąskim znaczeniu, jako synonim niezawodności, ale kompleksowo – jako *stopień, w jakim zbiór [jego] inherentnych cech spełnia wymagania* (PN-EN ISO 9001:2001). W pojęciu jakości wyrobu mieszczą się zatem stopień zaspokojenia wymagań zarówno funkcjonalno-eksploatacyjnych, jak i estetycznych. Drewno znajduje współcześnie zastosowanie głównie w urządzeniach typu maszynowego należących jednocześnie do grupy dzieł sztuki i urządzeń użytkowych. W takim przypadku dużą rolę odgrywa pewnego rodzaju etos zastosowania materiału naturalnego. Tak jest np. w zastosowaniach drewna do budowy instrumentów muzycznych¹⁷, niektórych rodzajów sprzętu sportowego oraz tzw. galanterii drzewnej (np. części chwytowych parasolek, gałek i uchwytów, elementów narzędzi oraz zabawek). Zatem, pomimo gorszych parametrów wytrzymałościowych, mniejszej trwałości itp. od wyrobów z innych dostępnych materiałów, w pewnych zastosowaniach wyrób drewniany może mieć lepszą jakość.

O niektórych zastosowaniach drewna w budowie maszyn mogą zdecydować moda, chęć wyróżnienia się lub potrzeba oryginalności. Drewno doskonale nadaje się do tego celu – kojarzy się z produktami zabytkowymi, a w zastosowaniu do nowoczesnych wyrobów (np. komputerów, sprzętu audio) zaskakuje i wygląda niebanalnie. Drewno jest

¹⁷ Uwaga ta dotyczy jedynie obudów i klawiszy instrumentów muzycznych, nie elementów rezonansowych, wobec których decydują inne kryteria (wymienione na s. 284).

atrybutem luksusu, ponadstandardowego wyposażenia, np. w przemyśle motoryzacyjnym od początków motoryzacji elementy wykończenia wnętrza samochodów osobowych wykonuje się z udziałem drewna.

Tabela 8

Ceny detaliczne brutto wielkowymiarowego drewna krajowego (zł/m³) (CENNIK DETALICZNY... 2007)

Klasa długościowo-jakościowa*	Klasa grubości	Rodzaj drewna								
		sosna	świerk	modrzew	brzoza	olsza, wiąz, buk	dąb	jesion	topola (z wyjątkiem osiki)	pozostałe liściaste
A0	2	401	418	405	359	355	854	732	267	244
	3	534	549	529	423	431	1230	921	300	287
B0	1	310	322	314	234	253	633	476	207	195
	2	342	375	345	276	300	756	592	226	207
	3	400	448	400	306	351	899	659	240	232
C0	1	257	253	259	196	211	392	281	182	183
	2	299	306	328	227	250	500	384	207	195
	3	348	328	350	256	277	632	451	222	220

* Według PN-D-95008:1992 i PN-D-95017:1992.

A, B, C – klasy długości od najdłuższej do najkrótszej, 0 – najlepsza jakość (minimalna liczba wad struktury).

Klasy grubości: 1 – średnica środkowa do 24 cm, 2 – średnica środkowa 25-34 cm, 3 – średnica środkowa powyżej 34 cm.

Tabela 9

Ceny detaliczne brutto wielkowymiarowego drewna tropikalnego (zł/m³) (GOMEX 2007)

Długość kłody [m]	Grubość kłody [cm]	Rodzaj drewna								
		acajou/khaya	afromosia	anegre	amazakoue	badi	bon-gossi	bosse	bubin-ga	danta
Do 16	do 120	2 008	4 239	2 094	2 303	1 727	1 651	2 251	2 879	1 651

Ceny przeliczono na złote według kursu: 1 euro = 3,45 zł.

Nawet w warunkach produkcji masowej nie ma dwóch identycznych konstrukcyjnie i funkcjonalnie części wykonanych z drewna o jednakowym rysunku i barwie.

Obcowanie z drewnem u wielu ludzi stwarza subiektywne odczucie komfortu psychicznego, jest to tworzywo przyjazne, ciepłe w dotyku¹⁸.

(3) Dostępność. Dobrym wskaźnikiem dostępności drewna może być cena jego zakupu. Pomimo tego, że cenę można wyrazić liczbowo, dostępność nie jest parametrem mierzalnym, ponieważ zależy ona od wielu innych nieobiektywnych, trudno uchwytanych czynników. Orientacyjne ceny największych sortymentów drewna krajowego zawiera tabela 8. Przytoczone liczby dotyczą wielkowymiarowych kłód i są cenami za surowiec o lepszej jakości (drewno małowymiarowe można kupić nawet za zaledwie 30 zł/m³). Średnia cena drewna, obliczona według średniej ceny drewna wszystkich sortymentów uzyskanej przez nadleśnictwa za pierwsze trzy kwartały 2007 roku, wyniosła 147,28 zł/m³ (KOMUNIKAT PREZESA GUS... 2007).

W tabeli 9 zamieszczono ceny dziewięciu tropikalnych gatunków drewna.

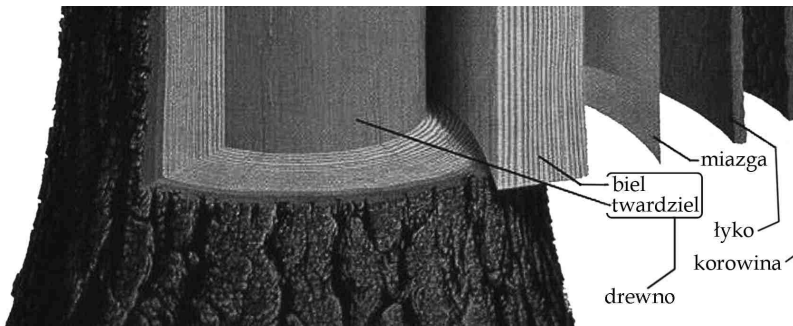
Jak wynika z porównania danych w tabelach 8 i 9, drewno gatunków tropikalnych może być nawet dziesięciokrotnie droższe od drewna krajowego.

2.2.3. Budowa wewnętrzna drewna

Drzewo składa się z korony (konary i gałęzie z aparatem asymilacyjnym), pnia (pomiędzy szyją korzeniową a wierzchołkiem) oraz korzeni. Źródłem drewna jest jego pień oraz konary (rzadziej korzenie). Drewno jest tkanką złożoną, zbudowaną z komórek martwych i żywych: przewodzących wodę i sole mineralne (naczynia i Nieliczne cewki u liściastych oraz cewki u iglastych), przenoszących obciążenia (włókna drzewne u liściastych, cewki włókniste u iglastych) i magazynujących składniki pokarmowe (tkanki miękkiszowe). Tkanki drzewne drzew iglastych są mniej

¹⁸ Pewne gatunki drzew są źródłem nieobojętnych dla zdrowia substancji, np. pył drewna cedrów (*Cedrus* spp.) zawiera kwas plikatynowy, który działa szkodliwie na układ oddechowy (COCKCROFT i IN. 1979); pył drewna dębu, jesionu i buku może być przyczyną astmy; drewno olszy, jesionu, buku, brzozy, topoli, jodły, cisu, kasztana może być przyczyną chorób skóry (ŚPIEWAK 1998). Lista 45 toksycznych gatunków znajduje się na stronie http://home.earthlink.net/~wooddude78/Woodlib2_3.html; są na niej m.in. takie popularne rodzaje i gatunki, jak: buk, brzoza, dąb czerwony, mahonie, teki.

wyspecjalizowane niż tkanki drzew liściastych i mogą pełnić kilka funkcji jednocześnie, np. cewki spełniają funkcje przewodzenia wody oraz funkcje mechaniczne. Budowę pnia przedstawia rysunek 2-2.



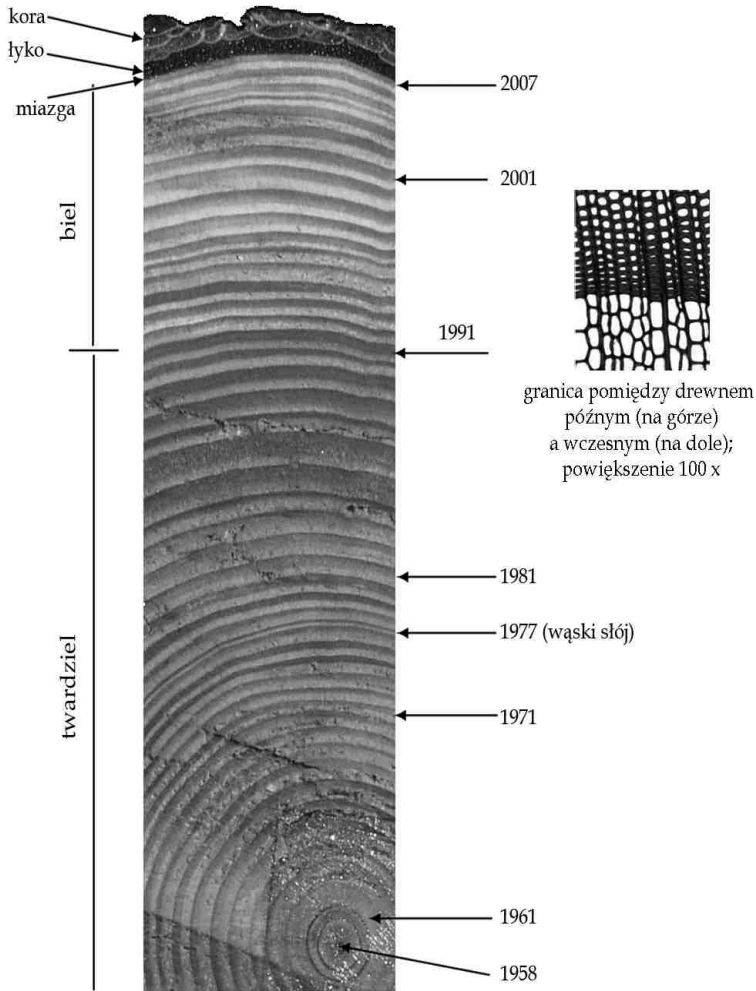
Rys. 2-2. Budowa pnia drzewa (na podstawie WILLIAMS A LEÓN 2001)

Pień składa się z: korowiny, łyka (*floem*), miazgi (*kambium*) i drewna (*ksylem*). Korowina jest martwą tkanką ochronną zabezpieczającą przed utratą wody, szkodnikami, grzybami itp. Pod nią znajduje się tkanka przewodząca asymilaty – łyko pokrywające miazgę, dzięki której pień drzewa przyrasta na grubość (WILLIAMS I LEÓN 2001).

Charakterystyczną cechą drzew rosnących w klimacie z zaznaczoną sezonowością jest koncentryczny przyrost masy drzewnej w cyklach rocznych¹⁹. Przyrost w naszej strefie klimatycznej następuje od wczesnej wiosny do późnej jesieni. Przyrosty roczne uwidaczniają się na przekroju poprzecznym pnia w formie par współśrodkowych pierścieni – słoje rocznych (rys. 2-3 i 2-4 na s. 25-26). Wytwarzane wiosną drewno to tzw. *drewno wczesne*²⁰ (jaśniejszy pierścień), natomiast wytwarzane późnym latem – to tzw. *drewno późne* (ciemniejszy pierścień). Drewno wczesne (przyrost wiosenno-letni) jest zbudowane z komórek o stosunkowo dużych średnicach i o cienkich ścianach. Drewno późne (przyrost letnio-jesienny) jest zbudowane z komórek o znacznie mniejszej średnicy i o grubszych ścianach. W pniu drzewa każdy kolejny przyrost roczny pnia lub gałęzi

¹⁹ Istnieją nieliczne wyjątki, np. jemiola pospolita (*Viscum album* L.) w Europie Środkowej nie tworzy pierścieni w drewnie (ZIELSKI I KRĄPIEC 2004).

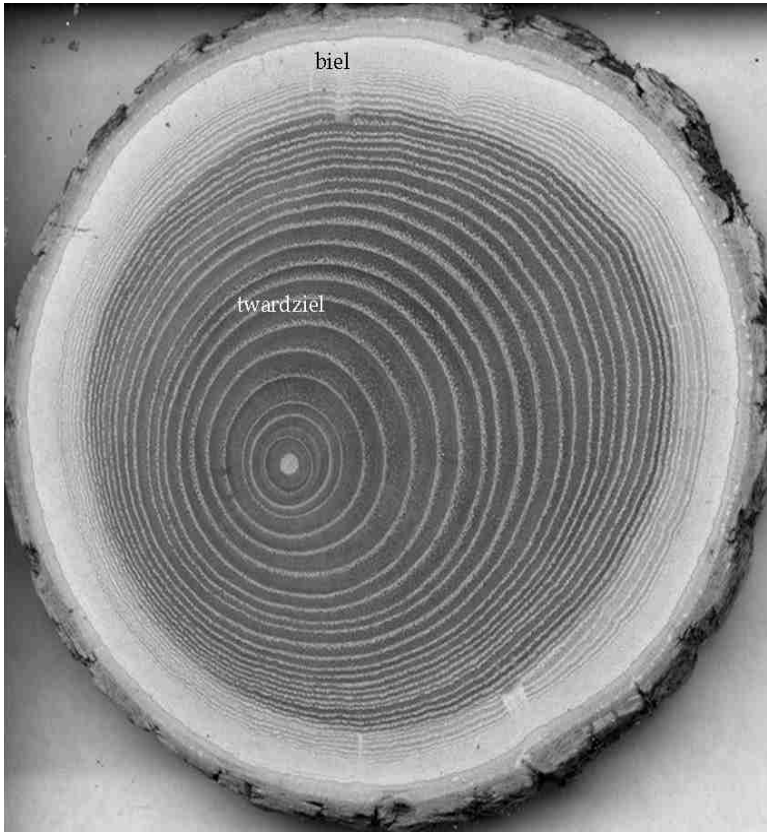
²⁰ Występuje pewna zmienność okresów, w których przyrasta drewno wczesne i drewno późne (KRZYSIK 1975).



Rys. 2-3. Słoje przyrostu rocznego sosny pinii (*Pinus pinea* L.) ściętej w 2007 roku

drzewa pokrywa poprzedni, przyjmując formę geometryczną zbliżoną do wydrażonego stożka pozbawionego podstawy.

Wielkość przyrostu rocznego wpływa m.in. na właściwości wytrzymałościowe i trwałość drewna. Drewno wąskosłoiste, czyli o szerokości słoju mniejszej niż 2,5 mm, może mieć nieco większą wytrzymałość mechaniczną niż drewno szerokosłoiste (choć nie zawsze jest to regułą).



Rys. 2-4. Biel i twardziel na przekroju poprzecznym dębu czerwonego (*Quercus rubra* L.); widoczna znaczna mimośrodkowość rdzenia

Uważa się, że drewno o szerokości słoju 2-3 mm ma najlepsze właściwości wytrzymałościowe (KRZYSIK 1975). Szerokość słoju wpływa również na gęstość drewna, która (na ogół) zmienia się wzdłuż promienia drzewa w kierunku od rdzenia ku obwodowi (na obwodzie są rozmieszczone słoje o najmniejszej szerokości). W praktyce istnieje przekonanie, że słoistość jest wskaźnikiem gęstości. W przypadku drzew iglastych większą gęstość ma drewno wąskosłoiste, natomiast liściastych pierścieniowonaczyniowych – drewno szerokosłoiste.

Drewno drzew iglastych ma słoje lepiej widoczne niż drewno drzew liściastych. Wśród gatunków liściastych pierścieniowonaczyniowe (np. dąb, jesion, wiąz, grochodrzew) mają słoje bardziej wyraziste od

rozpierzchłonaczeniowych (np. brzoza, olsza, buk, lipa, klon, grab, topola, wierzba, jabłoń, wiśnia, czereśnia, śliwa, grusza). U tych ostatnich naczyń, widoczne dopiero pod lupą, są stosunkowo niewielkie i rozsiane równomiernie w całej objętości przyrostu rocznego, a drewno wczesne jest trudne do odróżnienia od drewna późnego.

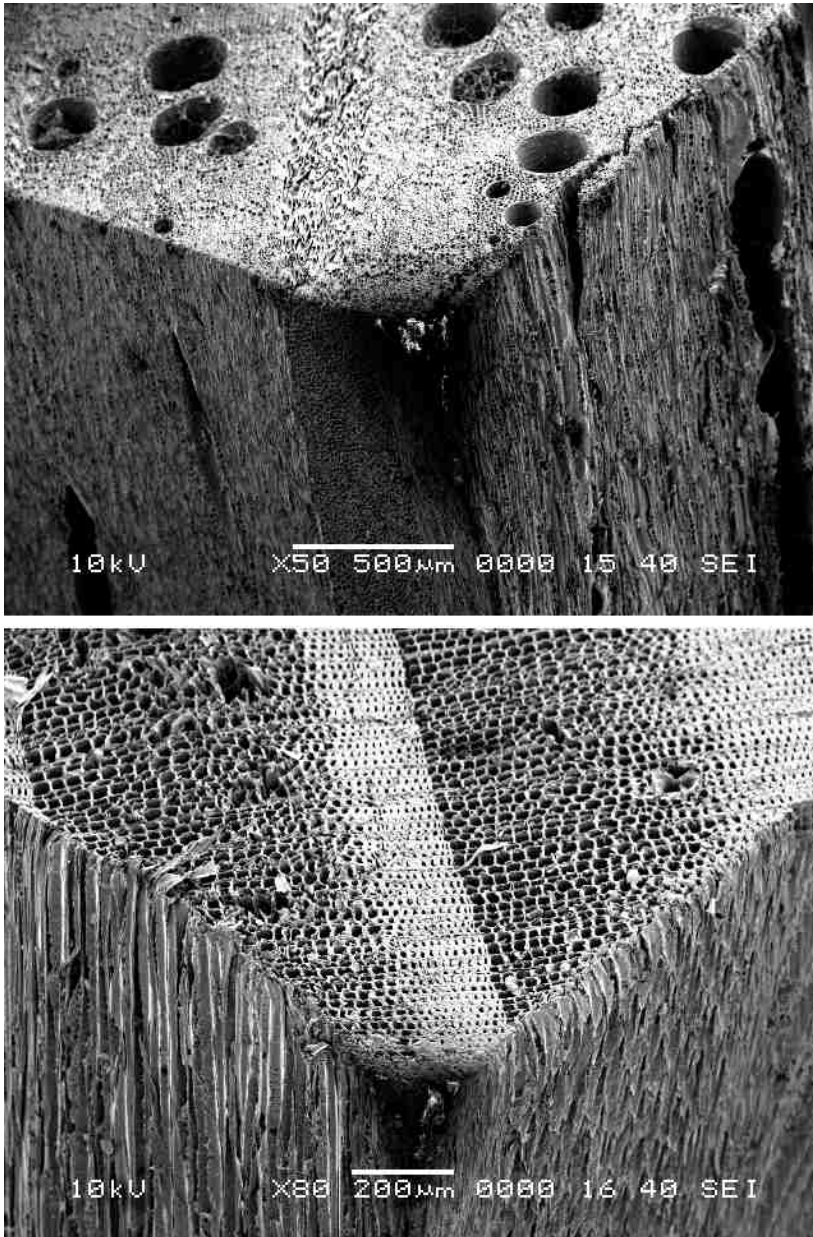
Przekroje poprzeczne pni wielu gatunków drzew mają dwie strefy: wewnętrzną, ciemniej zabarwioną i starszą (*twardziel*), oraz otaczającą ją jaśniejszym pierścieniem strefę młodszą (*biel*) (rys. 2-2 i 2-4). Twardziel jest wyłączona z pełnienia funkcji fizjologicznych i jej rolą jest tylko przenoszenie obciążenia, biel – zewnętrzne partie drewna zbudowane ze słoii wytworzonych w ostatnich okresach wegetacyjnych – pełni te funkcje, przewodząc wodę i rozpuszczone w niej składniki od korzeni do korony. Ciemniejsza barwa twardzieli jest spowodowana odkładaniem się w niej substancji konserwujących (żywic, gum i garbników), dzięki którym ta część drewna jest bardziej odporna na biokorozję. Twardziel różni się od bieli nie tylko ciemniejszym zabarwieniem, lecz także (na ogół) mniejszą zawartością wody, większą gęstością i większą twardością. Drewno twardzieli trudniej nasycy się impregnatami niż drewno bieli. Czasem twardziel nie różni się w sposób istotny barwą od bieli, a jej zabarwienie następuje dopiero po ścięciu drzewa i wystawieniu drewna na bezpośrednie działanie powietrza i światła (utlenianie garbników²¹).

Z punktu widzenia wzajemnych układów między strefami bieli i twardzieli można wyróżnić cztery grupy drzew, w których drewnie wyróżnia się: (1) biel, strefę twardzieli niezabarwionej i strefę twardzieli zabarwionej (np. wiązy, jesiony), (2) biel i niezabarwioną twardziel (np. świerki, jodły), (3) biel i ciemno zabarwioną twardziel – są to tzw. *gatunki twardzielowe* (np. dęby, orzech włoski, kasztan jadalny, robinia, klon tatarski, klon srebrzysty, sosna, modrzew, cis, jałowiec), (4) gatunki, w których nie zachodzi zróżnicowanie na biel i twardziel – są to tzw. *gatunki bielaste* (np. buki, klon zwyczajny, klon jawor, grab zwyczajny, brzozy, olsze, kasztanowiec zwyczajny²², leszczyna).

W centrum pnia znajduje się rdzeń, o zabarwieniu brązowym lub jasnobrunatnym, na przekroju poprzecznym widoczny jako strefa składająca się z kilku słoii drewna o luźnej, gąbczastej budowie. Rdzeń bardzo

²¹ Garbniki – substancje reagujące z kolagenem – białkiem skóry; mają cierpki smak, rozpuszczają się w wodzie i alkoholu, tworzą osady z białkiem.

²² Kasztanowiec należy do rodziny kasztanowcowatych (*Hippocastanaceae*), natomiast kasztan – do rodziny bukowatych (*Fagaceae*).

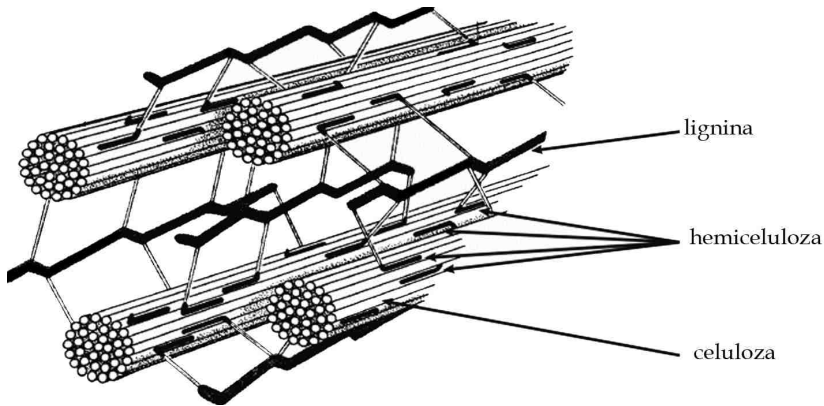


Rys. 2-5. Mikrostruktura drewna dębu (na górze, powiększenie 50 ×) oraz sosny (na dole, powiększenie 80 ×)

często jest przesunięty względem geometrycznego środka przekroju (co wiąże się z nierównomierną słoistością drewna wynikającą z niesymetrycznej korony, rys. 2-4). Jego średnica wynosi zazwyczaj około 1-5 mm. Przekroje rdzeni większości drzew są okrągłe, niektóre jednak mają unikalne kształty: rdzeń olszy jest trójkątny, jesionu – czworokątny, topoli – pięciokątny, dębu zaś – gwiaździsty (KRZYSIK 1975). Rdzeń wraz z niewielką warstwą drewna uformowaną w pierwszych latach wzrostu drzewa nosi nazwę rury rdzeniowej, która jest mało zrosnięta z innymi warstwami i ma niewielką wytrzymałość mechaniczną oraz trwałość.

Porównanie mikrostruktur drewna gatunków liściastych oraz iglastych przedstawia rysunek 2-5. W drewnie dębu (*Quercus robur* L.) są widoczne specyficzne dla gatunków liściastych naczynia (*tracheje*). W drewnie sosny (*Pinus sylvestris* L.) wyraźnie widać warstwę drewna późnego pomiędzy dwiema warstwami drewna wczesnego.

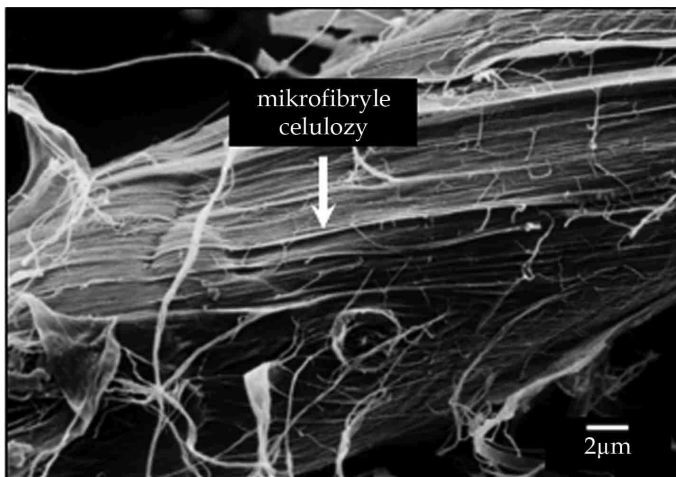
Na rysunku 2-6 przedstawiono w sposób poglądowy funkcje poszczególnych składników struktury drewna.



Rys. 2-6. Funkcjonalny układ celulozy, ligniny i hemiceluloz w drewnie

Ściany komórek cewek mają strukturę przypominającą nieco strukturę sztucznie otrzymywanych kompozytów tworzyw sztucznych, np. polimeru epoksydowego zbrojonego włóknami (np. aramidowym – AFRP, węglowym – CFRP lub szklanym – GFRP). Rolę zbrojenia pełnią w drewnie włókna celulozy, biopolimeru wielkocząsteczkowego o wzorze $(C_6H_{10}O_5)_n$ wytworzonego przez drzewo w reakcji polikondensacji

z glukozy $C_6H_{12}O_2$ (średni wagowy stopień polimeryzacji DP_w^{23} wynosi od 200 do 10 000). Celuloza jest polimerem, który może łatwo krystalizować, przyjmując postać regularnych zespołów łańcuchów celulozowych (tzw. mikrofibryli, przedstawionych na rysunku 2-7) na zewnętrznej powierzchni błony komórkowej, pełniąc tym samym rolę szkieletowego składnika ściany komórkowej o dużej wytrzymałości. Zbliżone do siebie łańcuchy celulozowe są powiązane siłami międzycząsteczkowymi Van der Waalsa i tworzą obszary krystaliczne – *krystality* oraz obszary amorficzne.



Rys. 2-7. Mikrofibryle celulozy w drewnie (WEIGEL 2005)

Mikrofibryle, w liczbie około 400, łączą się w wiązki i tworzą makrofibryle. Szacuje się, że mikrofibryle celulozy stanowią około 40-60% masy drewna. Rolę osnowy w drewnie pełnią: lignina (polimer amorficzny, 26-30% masy drewna) i hemicelulozy (polimery częściowo krystaliczne o mniejszym DP_w od celulozy, 18-35% masy drewna). Pozostałe 10-15% to woda i substancje, które nadają drewnu zapach oraz decydują o jego

²³ DP_w – estymator (liczba statystyczna) określający stopień polimeryzacji, tzn. liczbę merów, z których zbudowany jest łańcuch polimeru. Estymator ten wyznacza się, dzieląc średnią masę cząsteczkową polimeru (tzw. makrocząstki) przez masę cząsteczkową jednego meru (w przypadku celulozy masę grup końcowych pomija się, gdyż ma znikomy wpływ na wynik). Jeśli za podstawę tych obliczeń przyjmie się średnią masę cząsteczkową merów, to otrzymuje się średni stopień polimeryzacji.

trwałości (żywice, tłuszcze, garbniki i związki mineralne) (udziały wagi podano za KRZYSIKIEM 1975).

Woda w drewnie może występować w trzech postaciach: (w1) wody wolnej (wypełniającej mikroskopowe pory), (w2) wody związanej (nasycającej błonę komórkową i przestrzenie międzyfibrilowe), (w3) wody konstytucyjnej – wchodzącej w skład związków chemicznych (niemożliwej do usunięcia przez suszenie drewna). Wilgotność drewna w istotny sposób wpływa na jego właściwości wytrzymałościowe. Powszechnie stosowanym parametrem charakteryzującym wilgotność drewna jest *wilgotność bezwzględna* (wyznaczana jako stosunek masy wody zawartej w próbce do masy próbki w stanie absolutnie suchym). Drewno na pniu ma wilgotność bezwzględną do 50-150(200)%. Po ścięciu zmniejsza się ona samorzutnie do wilgotności równowaznej (stanu powietrzno-suchego) kosztem wody wolnej (w1), wypełniającej kapilary drewna. Spadek wilgotności drewna poniżej wilgotności równowaznej wiąże się z usunięciem wody związanej (w2), wypełniającej ściany komórkowe, i wymaga dostarczenia dodatkowej energii (jest możliwy tylko w warunkach laboratoryjnych). Powtórnie chłonec wodę z powietrza, włókna drewna dążą do osiągnięcia wilgotności PNW²⁴; dalszy wzrost wilgotności jest możliwy dopiero po zanurzeniu drewna w wodzie. Roczną zmienność wilgotności równowaznej w wybranych lokalizacjach na świecie zamieszczono w tabeli 10.

Wilgotność bezwzględna drewna w stanie powietrzno-suchym w umiarkowanej strefie klimatycznej wynosi, w zależności od pory roku, od około 12 do 20%. Najmniejsza wilgotność bezwzględna w pomieszczeniach suchych, ogrzewanych za pomocą centralnego ogrzewania, mieści się według KRZYSIKA (1975) w granicach od 4% (wiosna) do 13% (jesień). Ze zmianą wilgotności są bezpośrednio związane pęcznienie

²⁴ PNW (ang. FSP) – punkt nasycenia włókien – stan równowagi higroskopijnej, której wartość zależy od temperatury i wilgotności otoczenia: im niższa temperatura i większa wilgotność, tym większa wartość PNW (maksymalna w temperaturze 0°C i przy wilgotności > 99%). *Jeżeli wilgotność nasycenia włókien drewna lub papieru zostanie zdefiniowana jako taka wilgotność, przy której ściany komórkowe są nasycone [wodą] i nie występuje woda wolna w widocznej pod mikroskopem strukturze kapilarnej, to można udowodnić, że wilgotność nasycenia włókien [PNW] mieści się między 99,0 a 99,9% wilgotności względnej powietrza* (STAMM 1959). Najmniejsza wartość PNW opisana w literaturze wynosi 15,4% dla drewna palisandrowego z południowo-wschodniej Azji (z terytorium Indonezji, Nowej Gwinei i Archipelagu Malajskiego) (*Dalbergia latifolia* Roxb.), a maksymalna – około 35% w niektórych gatunkach liściastych, np. w drewnie lipowym (*Tilia* spp.) (HIGGINS 1957).

Tabela 10

Średnia wilgotność równoważna (w stanie powietrzno-suchym) w drewnie składowanym na zewnątrz w wybranych lokalizacjach na świecie [%] (SIMPSON 1998)

Lokalizacja	Miesiąc											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Australia, Perth	9,0	8,8	9,5	11,1	13,1	14,4	15,3	14,0	13,0	12,0	10,7	9,8
Sudan, Chartum	5,0	4,0	3,2	3,2	3,7	4,8	6,8	7,7	6,9	5,1	5,2	5,6
Niemcy, Berlin	19,0	16,8	14,9	14,4	11,8	12,8	12,3	12,5	14,5	16,1	18,5	20,0
Rosja, Moskwa	17,5	16,2	14,4	12,3	12,1	13,1	13,8	15,4	16,2	17,0	18,0	18,5
Czechy, Praga	19,8	17,4	14,0	12,1	12,7	13,1	12,5	13,1	14,0	16,6	19,2	19,9

i kurczliwość drewna. Przy odparowywaniu wody wolnej (w_1) drewno nie zmienia swojej objętości (zmienia jedynie masę), natomiast odparowywanie wody związanej (w_2) powoduje zmniejszenie objętości i masy drewna (tzw. *skurcz*). Kurczliwość drewna nie jest równomierna we wszystkich kierunkach. Zmiany wymiarowe związane z kurczliwością są uzależnione od kierunku przebiegu włókien. Najmniejsze zmiany długości pod wpływem zmian wilgotności następują w kierunku wzdłużnym (0,1-0,2%), nieco większe w kierunku promieniowym (3-6%), a największe w kierunku stycznym (6-12%). Dla zachowania stabilności wymiarów drewno należy wysuszyć do wilgotności równoważnej – w zależności od otoczenia, w którym będzie użytkowane: 8-12% w pomieszczeniach ogrzewanych, 15-18% na styku pomieszczeń ogrzewanych z otoczeniem zewnętrznym, 18-22% na wolnej przestrzeni.

Pomimo faktu, że drewna poszczególnych gatunków drzew różnią się znacznie wyglądem i pozostałymi właściwościami, to ich skład chemiczny i budowa ścian komórek są takie same. Ściany komórek tak różniących się od siebie gęstością gatunków drewna, jak balsa ($\rho = 110 \text{ kg/m}^3$) i dąb ($\rho = 710 \text{ kg/m}^3$), są zbudowane z substancji drzewnej o gęstości $\rho_{SD} = 1540 \text{ kg/m}^3$. Orientacyjny skład chemiczny ściany komórkowej przedstawia tabela 11²⁵.

Różnice w technicznych właściwościach drewna poszczególnych gatunków są zdeterminowane ich unikalną budową anatomiczną. Obecność,

²⁵ Skład chemiczny komórek różni się w obrębie rodzajów drewna, jego gatunków, a nawet w obrębie tego samego gatunku. W tabeli przytoczono wartości przybliżone.

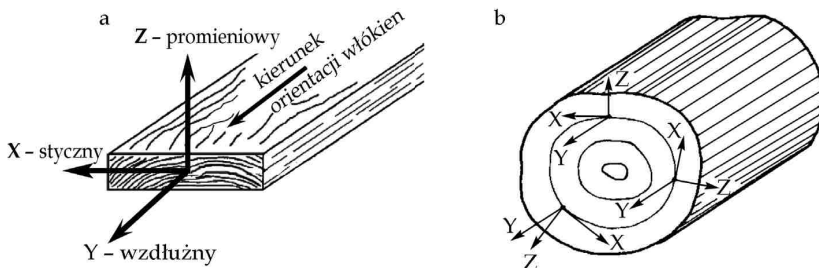
Tabela 11

Skład ściany komórki drewna (ASHBY i JONES 1996)

Materiał	Budowa	Przybliżony udział (% wagowe)
Włókna celuloza ($C_6H_{10}O_5)_n$	Krystaliczna	45
Osnowa lignina	Amorficzna	20
hemieluloza	Częściowo krystaliczna	20
woda	Rozpuszczona w osnowie	10
inne	Rozproszona w osnowie	5

sposób rozmieszczenia komórek prozenchymatycznych (podłużnych), a także ich liczba w całej tkance drzewnej decydują o właściwościach drewna (FABISIAK 2005). Dzięki zróżnicowanej porowatej budowie i unikalnym systemom przestrzeni kapilarnych każde drewno ma odmienną wytrzymałość mechaniczną, ciężar właściwy, przewodnictwo cieplne i dźwiękowe, nasiąkliwość oraz trwałość.

Helikalne ułożenie włókien celulozy w komórce oraz specyficzny kształt i ułożenie komórek odpowiadają za dużą anizotropię drewna. Na rysunku 2-8 a zaznaczono trzy, wzajemnie do siebie prostopadłe, główne kierunki anizotropii drewna (np. GENERAL TECHNICAL REPORT... 1999, NEUHAUS 2004): styczny (X), wzdłużny (Y) i promieniowy (Z). Kierunek



Rys. 2-8. Kierunki anatomiczne drewna: a - umowne trzy kierunki główne, b - ortotropia cylindryczna

styczny (X) jest prostopadły do włókien i styczny do tworzącej walca słoï rocznych, kierunek wzdłużny (Y) jest równoległy do kierunku włókien, kierunek promieniowy (Z) jest prostopadły do kierunku włókien i prostopadły do tworzącej walca słoï rocznych.

Osie dwukrotnej symetrii w wybranych punktach pnia przedstawiono na rysunku 2-8 a. Osie symetrii zmieniają swe kierunki zgodnie z cylindrycznym przebiegiem słoï – drewno charakteryzuje się anizotropią krzywoliniową lub bardziej szczegółowo: ortotropią cylindryczną. W drewnie pokrywanie się kierunków naprężeń i odkształceń zachodzi tylko w tych przypadkach, gdy kierunki głównych odkształceń pokrywają się z osiami ortotropii. Dość dobrą miarą anizotropii drewna są stosunki liniowych modułów sprężystości wzdłuż poszczególnych kierunków głównych (wg rys. 2-8 a); w tabeli 12 zestawiono je z analogicznymi stosunkami w wybranych materiałach drewnopochodnych.

Tabela 12

Stosunki liniowych modułów sprężystości materiałów drzewnych (SYDOR 2005)

Material	E_x/E_y [%]	E_z/E_y [%]
Drewno miękkie	1,5-8,6	4,6-19,7
Drewno twarde	3,1-8,9	5,8-18,3
Płyta wiórowa płaskoprasowana	82,1	3,1
Płyta pilśniowa MDF	96,3	6,8
Sklejka liściasta (5 warstw, grubość < 8 mm)	≈ 100	11,0

Z tabeli 12 wynika, że moduł sprężystości liniowej drewna w kierunku stycznym (X) wynosi zaledwie 3-9%, a w kierunku promieniowym (Z) 6-18% modułu w kierunku wzdłużnym Y. Porównując drewno z materiałami drewnopochodnymi (płyta wiórowa, pilśniowa i sklejka), można stwierdzić, że jest ono anizotropowe ($E_y = 100\%$, $E_x \approx 3-9\%$, a $E_z \approx 6-18\%$), natomiast płyty są ortotropowe ($E_y \approx E_x$, a $E_z \approx 3-11\%$).

2.2.4. Barwa, połysk i rysunek drewna

Jak wspomniano, współcześnie, odmiennie niż w przeszłości, drewno w budowie maszyn przestaje być materiałem strukturalnym (nośnym), a zaczyna w coraz większym stopniu pełnić rolę okładziny, dodatku bądź

elementu, który nie wchodzi w skład struktury, ale jest (nierzadko kluczowym) detalem zwiększającym estetykę wyrobu. W związku z powyższym obecnie najważniejszymi parametrami drewna, ważniejszymi od parametrów wytrzymałościowych, są właściwości estetyczne jego warstwy wierzchniej, takie jak: barwa, połysk i rysunek.

Barwa drewna

Wrażenia barwne są wywołane przez odbity od powierzchni przedmiotów wąski zakres promieniowania elektromagnetycznego o długości fali λ w granicach od 380 do 780 nm (światło). Wartości skrajne tego zakresu zależą od indywidualnych właściwości oka. Zwykle z wiekiem zakres widzenia zawęża się i wynosi od 400 do 700 nm. Budowa anatomiczna ludzkiego oka sprawia, że przy małym natężeniu światła człowiek postrzega jedynie odcienie szarości (*widzi stokopowo*), przy średnim – ma miejsce upośledzone postrzeganie barw (tzw. *widzenie mezotopowe*), natomiast dopiero przy bardzo dobrym oświetleniu można dostrzec całą paletę barw (tzw. *widzenie fotopowe*). Sam proces widzenia, pomimo że wywołany obiektywnym zjawiskiem fizycznym, jakim jest światło, jest subiektywny. W pewnym uproszczeniu można powiedzieć, że wrażenie koloru powstaje wtedy, kiedy światło widzialne (wielkość fizyczna) zostanie, po wnikięciu do naszego oka, przetworzone w jego mechanizmach fizjologicznych oraz mechanizmach psychologicznych mózgu. Algorytm widzenia składa się z trzech kroków: (1) zaistnienia bodźca (światła odbitego), (2) odbioru barwy przez narząd wzroku, (3) interpretacji wrażenia barwnego (kolor). Każdym krokiem zajmuje się inna dyscyplina nauki: światłem – fizyka, odbiorem bodźca – fizjologia, a interpretacją – psychologia.

Jednym ze znanych sposobów opisu barw jest model HSB (ang. *hue* – barwa, *saturation* – nasycenie, *brightness* – jasność), oparty na tzw. *kole barw* zawierającym barwy tęczy rozciągnięte wzdłuż okręgu i uzupełnione o barwę purpurową. Na zewnątrz tego koła znajdują się barwy najbardziej nasycone (największa wartość zmiennej *nasycenie*), w środku – nienasycone, a w centrum znajduje się biel. Położenie barwy na kole opisuje kąt (czyli zmienna *czystej barwy*) oraz odległość od środka (czyli nasycenie czystej barwy). Do pełnego opisu barwy trzeba dodać trzecią zmienną, opisującą jasność całego koła barw (jasność zero, bez względu na wartość *barwowych* współrzędnych, odpowiada czerni).

Trójliczbowych metod opisu barwy można skonstruować wiele. Najważniejsze z obecnie stosowanych to: (1) RGB – używana przez

konstruktorów monitorów (od angielskich nazw barw podstawowych *red, green, blue*), (2) CMY (*cyjan, magenta, yellow*) oraz jej częściej stosowane rozwinięcie – (3) CMYK, z dodatkową barwą czarną – używana w poligrafii i we wszystkich innych dziedzinach posługujących się farbami (również podczas uszlachetniania powierzchni drewna). Inne modele opisu barwy to np. YUV, HLS, LAB itd. (MOĆKO i ŻAGAN 2007).

Barwa niezabezpieczonego drewna nie jest trwała i zmienia się pod wpływem czynników atmosferycznych (temperatury, wilgotności i światła) oraz biologicznych²⁶ – zmiana barwy jest naturalną właściwością drewna, które wystawione na działanie wspomnianych bodźców ulega na powierzchni częściowemu wylugowaniu i utlenianiu, co przejawia się ściemnieniem jego barwy – zaszarzeniem i przybieraniem koloru szaropopielatego. Zewnętrzne warstwy drewna szarzeją silniej niż wewnętrzne, stąd zmiana barwy nie sięga głęboko. Niewyjaśnione jest dotychczas, jakie dokładnie procesy chemiczne następują w ligninie, powodując jej ściemnienie (lignina zawarta w drewnie pod wpływem działania samego światła żółknie). Hemicelulozy zawarte w drewnie pod wpływem podwyższonej temperatury i wody ulegają hydrolizie. Z części pentozanów powstaje furfural (*aldehyd 2-furylowy*) i żywice furanowe, które charakteryzują się ciemnym zabarwieniem.

Na zmiany barwy drewna wpływają również zawarte w nim garbniki, których związki mogą przesycać ściany komórkowe, dając piękniejsze zabarwienia (np. drewno dębu moczone w wodzie) (KRZYSIK 1975). Amaranty, np. *Paratecoma peroba* (Record & Mell) Kuhlm. lub *Peltogyne confertiflora* (Hayne) Benth., po ścięciu i przetarciu, a więc w stanie świeżym, mają kolor brudnoszary, a dopiero z czasem, pod wpływem światła i powietrza, przybierają piękny fioletowy odcień (PADECHOWICZ 1929). Na barwę powierzchni drewna duży wpływ ma też światło, zwłaszcza promienie ultrafioletowe (NOWACZYK i KRZOSKA-ADAMCZAK 2001), jak również procesy suszenia, które mogą wywoływać różnorodne efekty barwne w zależności od gatunku drewna oraz warunków naświetlania. Jak wiadomo, zmiana barwy powierzchni drewna może mieć różnoraki wpływ na wrażenia barwne użytkowników wyrobów wykonanych z drewna.

Połysk powierzchni drewna

Połysk powierzchni przejawia się jej zdolnością do odbijania padających na nią promieni świetlnych. Zdolność prawidłowego odbicia zależy

²⁶ Oddziaływanie czynników biologicznych na drewno opisano na s. 89 i dalszych.

od struktury powierzchni i jej właściwości optycznych (współczynników załamania i odbicia). Od chropowatych powierzchni światło odbija się dyfuzyjnie i dlatego wydają się one matowe. Jeśli wszystkie elementarne części powierzchni leżą na jednej płaszczyźnie, to padający na tę powierzchnię strumień równoległych promieni światła odbije się od niej zwierciadlanie.

Powierzchnia drewna, jak każda powierzchnia rzeczywista, charakteryzuje się pewną chropowatością i falistością. *Połysek drewna jest najsilniejszy w przetupie [przekroju stycznym], mniej silny w przekroju od grzbietu [promieniowym], prawie żadny w przekroju od czoła [poprzecznym]. Połysek nadają drewnu komórki promieni rdzennych (z wyjątkiem drewna osiki i gruszy, gdzie promienie [...] są matowe). Najbardziej lśniący przekrój w przetupie mają drewna klona, jesion, grochowca, lipy. Od czasu, gdy drewnu nadaje się połysek zaprawą, upadło znaczenie połytku naturalnego* (STIEBER 1922, s. 18). Odbicie światła od powierzchni drewna jest zatem odbiciem w postaci rozdzielonych wiązek promieni o różnym natężeniu rozchodzących się pod różnymi kątami.

Drewno i tworzywa drzewne w praktyce najczęściej są pokryte powłokami lakierowymi. Pewna część energii padającego na drewno światła ulega pochłonięciu, przeniknięciu (np. przez warstwę półprzezroczystego lakieru) lub rozproszeniu. W takim przypadku połysek może być jednym z kryteriów oceny nie tylko dekoracyjnych, lecz także technicznych właściwości zastosowanego pokrycia lakierowego. Większy połysek to nie tylko parametr estetyczny powierzchni, ale także dobry prognostyk większej wytrzymałości, mniejszego tarcia, większej trwałości połączeń wciskowych oraz większej odporności na biokorozję. Istnieją dwie grupy metod pomiaru połytku: subiektywne metody fotooptyczne oraz obiektywne metody fotoelektryczne.

Metoda fotooptyczna polega na ocenie reflektometrem ostrości świetlnych wizerunków liter i cyfr odbitych od badanych powierzchni. W polskim przemyśle meblarskim stosowano tego typu metodę do badania powłok lakierowych na drewnie według normy branżowej BN-66/6110-18. W przyrządzie opisanym w normie przyjęto 10-stopniową skalę o zakresie od 1 (mat) do 10 (wysoki połysek), ze stopniami pośrednimi: półmat, półpołysek i połysek (KORTYLEWSKI i IN. 1978). Układy pomiarowe reflektometrów (połyskomierzy fotoelektrycznych) do pomiarów jasności strumienia świetlnego odbitego od badanej powierzchni wykorzystują fotoogniwa selenowe lub krzemowe. Miarą zmierzonego poły-

sku powierzchni jest stosunek jasności strumienia świetlnego odbitego od powierzchni do jasności strumienia na nią padającego (MAGIERA 1974)²⁷.

Rysunek drewna

Rysunek drewna to obraz przekroju lub przełupu drewna, rzadziej okorowanej powierzchni, zawierający cechy jego struktury anatomicznej (włókien, promieni drzewnych, przyrostów rocznych, sęków). Rysunek drewna zależy od rodzaju przekroju. Na przekroju poprzecznym gatunków iglastych i liściastych pierścieniowonaczyniowych widoczne są współśrodkowe okręgi z ciemniejszą warstwą drewna późnego i jaśniejszą wczesnego w każdym słoju. Na przekroju podłużnym stycznym widoczne są przecięte słoje w postaci rodziny parabol o kierownicach leżących na jednej prostej, ich wierzchołki są od siebie oddalone o pewną stałą wartość. Na przekroju podłużnym promieniowym naprzemienne pasma drewna późnego i wczesnego przyjmują postać równoległych, najczęściej prostych pasm.

Układ słoï rocznych, i różnice drewna obu stref [wczesnej i późnej] powodują rysunek drewna, dlatego najpiękniejszą teksturę widuje się na przekroju od grzbietu [promieniowym]. Rysunek może być również spowodowanym oczkami nierozwiniętych pączków (wilczki; amboina) albo silnie tkwiącymi sęczkami jak n.p. u drewna limby. – Rysunek cenionym jest przez stolarzy i tokarzy. Najpiękniejszą teksturę mają wogóle drewna drzew liściastych (klon²⁸, wiąz, jabłoń, czereśnia). – Z drzew iglastych wyróżnia się tekstura drewna sosnowego i modrzewiowego (STIEBER 1922, s. 13).

2.2.5. Właściwości wytrzymałościowe drewna

Mechaniczne właściwości drewna wynikają bezpośrednio z kształtów i rozmiarów jego komórek oraz właściwości wytrzymałościowych

²⁷ Aktualne metody pomiaru połysku drewna lakierowanego zawierają normy PN-EN ISO 2813:2001, PN-EN 927-3:2007 (U) oraz PN-EN 927-6:2007.

²⁸ Drewno klonów niemal nie różni się od siebie wyglądem, jednak podstawowe gatunki klonów można podzielić na dwie grupy: twarde (ang. *hard maple*) – np. klon srebrzysty (*Acer saccharinum* L.) i klon czarny (*A. nigrum* Michx. f.) oraz miękkie (ang. *soft maple*) – np. klon czerwony (*A. rubrum* L.) i klon wielkolistny (*A. macrophyllum* Pursh). Gatunki twarde znajdują o wiele szersze zastosowanie w budowie maszyn niż gatunki miękkie (GENERAL TECHNICAL REPORT... 1999). W Polsce w stanie naturalnym występują cztery gatunki klonów: polny (*A. campestre* L.), zwyczajny (*A. platanoïdes* L.), jawor (*A. pseudoplatanus* L.) oraz antropofit, klon jesionolistny (*A. negundo* L.).

samych ścian komórkowych. W drewnie obciążonym wzdłuż włókien, w którym ściany komórek są poddane prostemu stanowi naprężeń (są ściskane lub rozciągane), wytrzymałość zależy jedynie od gęstości drewna²⁹, natomiast przy obciążeniu w poprzek włókien ściany komórkowe podlegają zginaniu, więc mechaniczne właściwości drewna zależą wykładniczo (w potęgze 2/3 lub 2) od jego gęstości (ASHBY i JONES 1996).

Drewno znacznie łatwiej przenosi siły działające wzdłuż włókien (ma większą wytrzymałość) – wraz ze wzrostem kąta odchylenia tych sił od kierunku włókien wytrzymałość drewna zmniejsza się. Przykładowe zakresy wartości wytrzymałości drewna na ściskanie, w zależności od rodzaju drewna, kształtują się w granicach:

- na ściskanie wzdłuż włókien (\parallel) – 16,0-88,0 MPa (gatunki liściaste) i 23-34 MPa (gatunki iglaste),
- na ściskanie w poprzek włókien (\perp) – 4,3-6,3 MPa (gatunki liściaste) i 8,0-13,5 MPa (gatunki iglaste).

Drewno ma dość małą plastyczność. Podczas rozciągania, po przekroczeniu granicy sprężystości, następuje zniszczenie poszczególnych włókien lub cewek, które prowadzi do zerwania próbki. Wartość granicy proporcjonalności odkształcenia do naprężenia (nieco mniejszej od granicy sprężystości) zależy od rodzaju drewna. Nie popełniając istotnego błędu, można przyjąć, że wynosi ona:

- dla drewna liściastego (bez drewna bukowego) – $0,7R_{m'}$,
- dla drewna bukowego – $0,85R_{m'}$,
- dla drewna iglastego – $0,8R_{m'}$

gdzie: R_m – wytrzymałość doraźna na rozciąganie.

Ważnym parametrem wytrzymałościowym drewna jest jego twardość, która wywiera istotny wpływ na przebieg jego obróbki oraz na późniejsze właściwości eksploatacyjne wyrobu. Autorem pierwszej definicji twardości był Heinrich R. Hertz (1857-1894). W latach 1881-1882 opublikował on dwie prace, w których stwierdził, że miarą twardości jest siła docisku dwóch kul o wartości powodującej ich odkształcenie plastyczne (por. HERTZ 1881). Poniżej przytoczono kilka definicji twardości:

Opór stawiany obcemu ciału usiłującemu wcisnąć się do wnętrza budowy anatomicznej drewna jest twardością tego drewna (STIEBER 1922, s. 21).

²⁹ Istnieje sporo wyjątków od tej reguły, jednak gęstość jest stosunkowo dobrym prognostykiem wytrzymałości.

Twardość mierzy się oporem, jaki stawia materiał drzewny przy obrabianiu narzędziami (WRÓBLEWSKI i DE MEZER 1948, s. 11).

Twardość jest to opór, jaki stawia materiał ciałom wciskany w jego powierzchnię; wyraża się ją w kG/cm^2 lub w kG/mm^2 (KRZYSIK 1975, s. 582).

Twardość – odporność materiału na odkształcenia trwałe pod wpływem sił skupionych działających na małą powierzchnię tego materiału (ENCYKLOPEDIA TECHNIKI 1994).

Twardość materiału ma zatem charakter umowny i jest mierzona oporem, jaki wykazuje ciało w czasie wciskania weń wgłębnika przy odkształceniach plastycznych. W porównaniu z innymi materiałami określenie twardości drewna jest trudne, ponieważ jest to materiał niejednorodny, o zróżnicowanej twardości warstw zewnętrznych i wewnętrznych. Na zmierzoną twardość wpływają rodzaj przekroju, wilgotność itp.

Pierwsze próby opracowania metodyki pomiaru twardości drewna zostały opublikowane przez Bügsena w 1904 roku (KRZYSIK 1975). Jego metoda polegała na wbijaniu stalowej igły o określonej grubości na stałą głębokość 2 mm. Wartość siły potrzebnej do wykonania tego zadania przyjmowano za liczbę twardości. Metoda ta dawała niepowtarzające się wyniki, gdyż podczas poszczególnych powtórzeń pomiaru igła trafiała na naczynia oraz grubościennie elementy budowy anatomicznej drewna. Z tego powodu przyjęto metodologię mierzenia twardości drewna metodą Gabriela Janki (1864-1932).

Cyfrową skalę bezwzględnej twardości drewna niektórych rodzajów drzew zestawił Dr. G. Janka [w 1906 roku – JANKA 1906]. Celem badania absolutnej twardości nie używał on siekier, pił lub innych przyrządów obróbki drzewnej, pod działaniem których musiałyby liczyć się ze sprężystością, ciągliwością [plastycznością], łupliwością i t. d., lecz idąc wzorem inżyniera szwedzkiego A. Brinell[a] zastosował wciskanie półkuli żelaznej o średnicy 11,284 mm (przy równoczesnym odczytywaniu manometru). Powierzchnia koła odcisnięta tą półkulą równała się $= 1 \text{ cm}^2$ (ze względu, że i inne wytrzymałości odnoszą się do powierzchni 1 cm^2). Ciężar [wyrażony w jednostkach siły] użyty do wciśnięcia tej półkuli stanowił o twardości materiałów (STIEBER 1922, s. 24).

Wyniki pomiarów twardości metodą Janki wyraża się w megapaskalach. Inną, rzadziej stosowaną metodą pomiaru twardości drewna i tworzyw drewnopochodnych, jest metoda Brinella, w której wartość

tvardości (HB) określa stosunek siły naciskającej do pola powierzchni odcisku stalowej kulki o średnicy 10 mm. W metodzie Janki stała jest wielkość odcisku, w metodzie Brinella – wartość siły.

Twardość drewna zależy od gatunku drzewa, z którego drewno pochodzi. Do gatunków twardych należą m.in.: modrzew, robinia akacjowa (grochodrzew), buk, dąb, grab, jesion, jawor, wiąz, a do miękkich: lipa, olsza, topola osika, topola biała. Drewno miękkie jest znacznie łatwiejsze w obróbce, stąd często jest używane przez rzeźbiarzy (np. ołtarz w kościele Mariackim w Krakowie jest wyrzeźbiony z lipy) i modelarzy. Twardość mierzona metodą Janki przy 15-procentowej wilgotności surowca wynosi: dla krajowych gatunków drewna – od 20 MPa (topola osika) do 88-89 MPa (grab); a dla gatunków tropikalnych – od 4 MPa (balsa – *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb.³⁰), do 197 MPa (gwajakowce – *Guaiacum* spp.). Na ogół twardość drewna od strony przekroju poprzecznego (mierzona w kierunku wzdłużnym – rys. 2-8 a) jest od 1,5 do 2 razy większa niż w kierunku prostopadłym do włókien (stycznym i promieniowym).

Gęstość drewna³¹ wykazuje zmienność w obrębie pojedynczych przyrostów rocznych, pojedynczych drzew, a także pomiędzy drzewami jednowiekowego drzewostanu w zależności od stanowiska drzewa w drzewostanie. Znaczący wpływ na gęstość drewna w obrębie jednego drzewa ma umiejscowienie na przekroju poprzecznym i na wysokości pnia. Największą gęstość wykazuje drewno znajdujące się dalej od rdzenia oraz w części odziomkowej. Zmienność gęstości jest większa w gatunkach iglastych i liściastych pierścieniowonaczyniowych, natomiast w gatunkach liściastych rozpierchłonaczyniowych jest niewielka (FABISIAK 2005). Wydawać by się mogło, że drewno niemal wszystkich gatunków drzew po wysuszeniu (zawartość wody – około 12%) unosi się na wodzie, tymczasem jest co najmniej 27 gatunków, których wysuszone drewno tonie w wodzie. Do najcięższych (i jednocześnie najtwardszych) gatunków drewna należą gatunki tropikalne, zebrano je w tabeli 13, niestety nie wszystkie mają oficjalne polskie nazwy.

Właściwości wytrzymałościowe drewnianej części w dużym stopniu zależą od zastosowanej metody obróbki. Części maszyn wykonywane techniką łupania z uwagi na brak podcięcia włókien mają większą wytrzymałość mechaniczną od części skrawanych. Łupliwość to skłonność

³⁰ Niezalecany synonim to *Ochroma lagopus* Sw.

³¹ Jak już wspomniano wcześniej (s. 32), gęstość substancji drzewnej po wyeliminowaniu wody i przestrzeni powietrznych wynosi około 1540 kg/m³.

Tabela 13

Gęstość pozorna najcięższych gatunków drewna w stanie powietrzno-suchym, $W_o = 12\%$ (WAGENFÜHR i SCHEIBER 1974, RICHTER i DALLWITZ 2006, TERVUREN XYLARIUM... 2008)

Nazwy polskie	Nazwa łacińska	Nazwy angielskie	Gęstość [g/cm ³]
1	2	3	4
Akacja	<i>Acacia nigrescens</i> Oliv.	Knobthorn	do 1,17
-	<i>Brosimum paraense</i> Huber	Satine, bloodwood	0,90-1,06
Brezylka ciernista	<i>Caesalpinia echinata</i> Lam.	Brazilwood	do 1,22
Brezylka (-)	<i>Caesalpinia ferrea</i> Mart.	Leopard tree	do 1,18
Mahoń górski	<i>Cercocarpus montanus</i> Raf.	Mountain mahogany	do 1,11
Satin	<i>Chloroxylon swietenia</i> DC.	East Indian satinwood	0,78-1,02
Dalbergia, palisander	<i>Dalbergia cearensis</i> Ducke	Kingwood, rosewood	do 1,18
Dalbergia czarno- drzew, palisander	<i>Dalbergia melanoxylon</i> Guill. & Perr.	African blackwood	0,90-1,20
Cocobolo	<i>Dalbergia retusa</i> Hemsl.	Palo de rosa, cocobolo, Nicaragua rosewood	0,89-1,35
Heban	<i>Diospyros celebica</i> Bakh. (również <i>D. marmorata</i> oraz <i>D. polyalthioides</i> - 3 gatunki)	Black ebony, streaked ebony, zebrawood, an- daman marblewood	0,95-1,20
Heban, hurma	<i>Diospyros crassiflora</i> Hiern	Benin ebony, African ebony	1,05-1,20
Heban, hurma	<i>Diospyros ebenum</i> J. Koenig	Ceylon ebony, ebony persimmon	0,9-1,05
-	<i>Eucalyptus quadrangulata</i> H. Deane & Maiden	Whitetop-box, grey box, white topped box	ok. 1,01
Tambulian, billian	<i>Eusideroxylon zwageri</i> Teijsm. & Binn.	Billian	0,85-1,10
Gwajak	<i>Guaiacum officinale</i> L.	Guaiac, lignum vitae	1,28-1,37

Tabela 13 – cd.

1	2	3	4
Azobé (ekki, bongossi)	<i>Lophira alata</i> Banks ex C.F. Gaertn.	Ekki, red ironwood	0,95-1,15
Mesua	<i>Mesua ferrea</i> L.	Ceylon ironwood	0,94-1,13
-	<i>Chlorocardium rodiei</i> (M.R. Schomb.) Rohwer et al.	Black-, brown-, yellow-, white greenheart	0,92-1,15
Oliwka wawrzynolistna	<i>Olea capensis</i> L.	Black ironwood	1,10-1,49
-	<i>Olneya tesota</i> A. Gray	Desert ironwood	do 1,13
Drewno węzowe	<i>Brosimum guianense</i> Huber	Letterwood, snakewood	1,20-1,30
Wierzbowiec Lorenza	<i>Schinopsis quebracho-colorado</i> F.A. Barkley & T. Mey.	Quebracho	do 1,2
Wierzbowiec czerwony	<i>Schinopsis balansae</i> Engl.	Soto negro	1,10-1,20
-	<i>Swartzia fistuloides</i> Harms	Pau rosa, pau ferro	0,90-1,05
-	<i>Swartzia leiocalycina</i> Benth.	Wamara, panacoco	do 1,27
Ipe, lapacho	<i>Tabebuia heptaphylla</i> Vell.	Ipé roxo, lapacho negro	0,80-1,20
Pyinkado	<i>Xylia xylocarpa</i> (Roxb.) W. Theob.	Burma ironwood	0,99-1,26

do pęknięcia wzdłuż określonych kierunków. Cecha ta jest (i była) wykorzystywana np. podczas produkcji szprych kół oraz klepek poszycia okrętów³².

Drewno posiada tę właściwość, że pod działaniem klina rozstępuje się, dzielą się jego włókna, czyli drewno łupi się. [...] Łupliwość drewna zależy przede wszystkim od budowy anatomicznej, a więc od kierunku, w którym klin na drewno działa. Najłatwiej łupią się drewna od czola w kierunku promieni rdzennych [w płaszczyźnie YZ (rys. 2-8 a, s. 33)], ciężiej

³² Łupliwość jest przedmiotem wciąż obowiązującej normy PN-D-04106:1954.

Tabela 14

Właściwości fizyczne drewna w stanie powietrzno-suchym (WAGENFÜHR i SCHEIBER 1974, KRZYSIK 1975)

Gatunek drewna	Całkowity skurcz w odniesieniu do wymiarów drewna mokrego [%]				Gęstość [g/cm ³]	Twardość		Średnia wytrzymałość statyczna [MPa]								Udarność [J/cm ²]
	K _V	K _X	K _Y	K _Z		HJ [dN]	HB [MPa]	na ściskanie		na rozciąganie		na ścinanie		na zginanie		
									⊥		⊥		⊥			
Cis	-	-	-	-	0,80	710	-	68,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Sosna	12,4	7,7	0,4	4,0	0,55	300	400	43,5	7,5	104	3,0	10,0	21	78	7,0	
Jodła	11,7	7,6	0,1	3,8	0,45	340	-	31,0	4,5	84	2,3	5,1	27	60	3,5	
Świerk	12,0	7,8	0,3	3,6	0,47	320	320	43,0	6,0	90	2,7	6,7	22	66	5,0	
Modrzew	11,8	7,8	0,3	3,3	0,69	440	530	42,0	6,0	107	2,3	9,0	23	82	5,0	
Lipa	15,5	9,1	0,3	5,5	0,53	330	-	44,0	9,5	85	-	4,5	20	90	5,0	
Topola	14,3	8,3	0,3	5,2	0,45	270	-	30,0	-	77	-	5,0	-	55	5,0	
Brzoza	14,0	7,8	0,6	5,3	0,65	490	-	43,0	-	137	7,0	12,0	-	125	10,0	
Dąb	12,6	7,8	0,4	4,0	0,71	-	660	47,0	11,0	90	4,0	7,5	27	093	7,5	
Grab	19,7	11,5	0,5	6,8	0,83	890	-	66,0	-	107	-	8,5	40	107	8,0	
Buk	17,6	11,8	0,3	5,8	0,78	780	720	53,0	9,0	135	7,0	8,0	29	105	8,0	
Wiąz	13,6	8,3	0,3	4,6	0,64	640	-	41,0	10,0	80	3,9	7,0	27	72	6,0	
Jesion	13,6	8,0	0,2	5,0	0,76	760	650	47,0	11,0	104	7,0	6,5	28	99	8,0	
Jawor	11,8	8,0	0,5	3,0	0,63	670	-	49,0	10,4	82	-	9,0	22	95	6,5	
Olsza	12,6	7,3	0,5	4,4	0,53	440	380	40,0	6,5	-	2,0	4,5	-	85	5,0	
Grusza	14,7	9,1	0,4	4,6	0,74	790	600	46,0	-	-	-	-	-	114	11,2	
Robinia	12,1	6,9	0,1	4,4	0,77	870	-	59,0	13,0	148	4,3	-	-	120	11,5	
Mahoń	8,9	5,1	0,3	3,2	0,70	700	-	49,0	-	-	7,0	8,8	-	110	5,3	
Heban	-	-	-	-	1,16	1 737	-	80,0	-	-	-	-	-	-	-	
Gwajak	-	-	-	-	1,23	1 970	-	106	-	-	-	-	-	-	-	
Balsa	-	-	-	-	0,13	40	-	9,22	-	74	1,0	-	-	-	-	

K_V - skurcz objętościowy, K_X - skurcz w kierunku stycznym, K_Y - skurcz w kierunku wzdłużnym, K_Z - skurcz w kierunku promieniowym, HJ - twardość według metodologii Janki, HB - twardość według metodologii Brinella, || - kierunek wzdłużny (Y wg rys. 2-8 a, s. 33), ⊥ - kierunek promieniowy (Z) i styczny (X) (wg rys. 2-8 a, s. 33).

w stycznej do rocznych stoi [w płaszczyźnie XY]. [...] Przerzywane promienie zmniejszają tупliwość. Zupełnie nietупliwym jest drewno w kierunku pionowym, ostrzem do długości włókien (gdyż w tym wypadku musiałby klin przecinać włókna) [w płaszczyźnie XZ]. Prostoliniowość i prawidłowość budowy komórek i włókien zwiększa tупliwość i przeciwnie, nieprawidłowe skręcenia, pogmatwania włókna zmniejszają silnie tупliwość. Wilgoć rozluźnia komórki, zmniejsza spójność drewna, dlatego drewno świeże jest tупliwsze, ale i zarazem ciąglejsze [tu: plastyczniejsze]. Drewna świeże drzew liściastych są tak silnie rozluźnione, że ciągłość nie odgrywa tu żadnej roli, są przeto w stanie świeżym tупliwsze. Przeciwnie, miękkie drewna drzew liściastych są w stanie świeżym mniej tупliwe [...] niektóre drewna drzew iglastych wysuszone posiadają większą tупliwość (STIEBER 1922, s. 29).

Tabela 14 zawiera orientacyjne właściwości wytrzymałościowe ważniejszych gatunków drewna krajowego i zagranicznego: cisu (*Taxus baccata* L.), sosny (*Pinus sylvestris* L.), jodły (*Abies alba* Mill.), świerku (*Picea abies* (L.) H. Karst.), modrzewia (*Larix decidua* Mill.), lipy (*Tilia platyphyllos* Scop.), topoli (*Populus alba* L.), brzozy (*Betula pendula* Roth), dębu (*Quercus robur* L.), grabu (*Carpinus betulus* L.), buku (*Fagus sylvatica* L.), wiązu (*Ulmus glabra* Huds.), jesionu (*Fraxinus excelsior* L.), jaworu (*Acer pseudoplatanus* L.), olszy (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), gruszy (*Pyrus communis* L.), grochodrzewu (*Robinia pseudacacia* L.)³³, mahoniu (*Swietenia mahagoni* (L.) Jacq.), hebanu (*Diospyros ebenum* J. Koenig), gwajakaku (*Guaiacum officinale* L.) oraz balsy (*Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb.). Zamieszczone w tabeli właściwości fizyczne dotyczą drewna w stanie powietrzno-suchym.

2.2.6. Właściwości akustyczne drewna

Bardzo ważnym obszarem zastosowania drewna w budowie maszyn i urządzeń jest budowa instrumentów muzycznych. Akustyczne właściwości drewna: (1) prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej,

³³ Nazwa gatunkowa *pseudacacia* (FLORA EUROPAEA 2008, VASCULAR PLANTS OF POLAND... 2008) w części literatury występuje w formie *pseudoacacia* (np. GERMPLASM RESOURCES INFORMATION NETWORK 2008).

(2) tłumienie dźwięku³⁴, (3) oporność falowa (impedancja³⁵), współczynnik odbicia, częstotliwość rezonansowa³⁶, szerokość rezonansu – to cechy wywierające wpływ na propagację dźwięków w drewnie. Decydują one o możliwościach i zakresie zastosowania drewna jako materiału rezonansowego części akustycznych instrumentów muzycznych lub elementów dźwiękochłonnych (izolacja akustyczna). Na cechy akustyczne drewna ma wpływ jego budowa anatomiczna (gęstość, udział drewna późnego, wiek kambialny, udział promieni rdzeniowych i przewodów żywicznych itp.), dlatego oznaczanie każdej akustycznej właściwości drewna przeprowadza się w trzech kierunkach anatomicznych (KOKOCIŃSKI 2004). Na akustyczne parametry drewna mają dodatkowo wpływ: wilgotność i temperatura oraz procesy technologiczne (takie jak klejenie i pokrywanie warstwy wierzchniej powłokami). Porowatość drewna przyczynia się do dość dobrego pochłaniania dźwięków, które kształtuje się na poziomie 8-10% (współczynnik odbicia: 0,08-0,10).

(1) Prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej

Prędkość rozchodzenia się dźwięku w substancjach, czyli prędkość przemieszczania się zaburzenia mechanicznego, zależy od różnych czynników, np. od temperatury – w przypadku gazów i cieczy, a od liniowego modułu sprężystości i gęstości – w przypadku ciał stałych. W przypadku drewna prędkość rozchodzenia się dźwięku zależy od:

- kierunku anatomicznego (wzdłuż włókien jest 3-5-krotnie większa od prędkości w poprzek włókien i prostopadle do nich, ponieważ liniowe moduły sprężystości w tych kierunkach są dużo mniejsze i wynoszą około 1/20 wartości modułu wzdłużnego),
- wilgotności i temperatury (prędkość zmniejsza się nieznacznie, proporcjonalnie do zmian liniowego modułu sprężystości, wraz ze

³⁴ Zjawisko polegające na osłabieniu amplitudy fali dźwiękowej w wyniku rozchodzenia się jej w materiale. Współczynnik tłumienia dźwięku to wartość zmniejszenia amplitudy fali (wyrażona w decybelach) przypadająca na jednostkę długości przebytej drogi (wyrażoną w metrach). Współczynnik tłumienia zależy od długości fali, struktury materiału, jego właściwości sprężystych, składu chemicznego i temperatury. Podczas jego pomiaru za parametr charakterystyczny przyjmuje się średnią arytmetyczną współczynników tłumienia dla słyszalnego zakresu częstotliwości 11,3-22 600 Hz (umownie podzielonego na 10 oktaf).

³⁵ Inaczej: podatność akustyczna Z – wielkość charakteryzująca dany materiał. Wyrażona jest zależnością: $Z = \rho c$ (gdzie: ρ – gęstość materiału, c – prędkość dźwięku).

³⁶ Zależy również od geometrii konkretnego kawałka drewna.

wzrostem wilgotności i temperatury – GENERAL TECHNICAL REPORT... 1999).

Zmniejszenie prędkości rozchodzenia się dźwięku zmienia charakterystykę akustyczną drewnianego elementu (np. płyty rezonansowej instrumentu muzycznego) – zwiększa nieznacznie częstotliwość drgań własnych i amplitudę drgań.

Dla ciał stałych izotropowych prędkość rozchodzenia się fal podłużnych opisuje uproszczona zależność (KRZYSIK 1975):

$$v_{dz} = 10 \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

gdzie:

v_{dz} – prędkość rozchodzenia się fal podłużnych [m/s],
 E – moduł sprężystości liniowej [MPa],
 ρ – gęstość [kg/m^3].

Zatem im większy moduł sprężystości i im mniejsza gęstość, tym większa prędkość. W ośrodku anizotropowym, jakim jest drewno, fala podłużna ma składniki poprzeczne. Wzór na prędkość dźwięku w drewnie ma postać:

$$v_{dz} = 10 \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

gdzie: ν – bezwymiarowy współczynnik Poissona³⁷.

Dla materiałów izotropowych, takich jak np. stal, współczynnik Poissona wynosi około 0,29 (dla metali – 0,25-0,35, dla gumy – 0,48-ok. 0,5, dla korka jest bliski zeru, natomiast dla drewna mieści się w szerokich granicach 0,02-0,48) (GENERAL TECHNICAL REPORT... 1999) i zależy od wilgotności oraz kierunku anatomicznego. W tabeli 15 zebrano prędkości rozchodzenia się fal w drewnie i dla porównania w innych wybranych materiałach.

Teoretycznie stosunek prędkości dźwięku wzdłuż i w poprzek włókien powinien wynosić (KRZYSIK 1975):

³⁷ Współczynnik Poissona (ν) jest stosunkiem odkształcenia poprzecznego do odkształcenia podłużnego przy osiowym stanie naprężenia. W przypadku rozciągania współczynnik Poissona jest stałą proporcjonalności w zależności pomiędzy zmianą wymiarów poprzecznych (b) a zmianą wymiarów podłużnych (l), np. rozciąganego pręta, co można zapisać: $\Delta b/b = -\nu(\Delta l/l)$. Współczynnik Poissona jest miarą czułości materiału na odkształcenia poprzeczne przy rozciąganiu (lub ściskaniu).

Tabela 15

Prędkość rozchodzenia się fal dźwiękowych w różnych materiałach

Materiał	Średnia gęstość ρ [kg/m ³]	Średni moduł sprężystości [MPa]		Średnia prędkość podłużnej fali dźwiękowej [m/s]		$\frac{v_{dz\parallel}}{v_{dz\perp}}$
		E_{\parallel}	E_{\perp}	$v_{dz\parallel}$	$v_{dz\perp}$	
Powietrze suche (0°C)	1,2*	-		333*		-
Żelazo	7 900***	92 390***		5 016*		-
Miedź	8 920***	108 000***		3 553*		-
Szkło	2 500***	72 000***		5 991*		-
Ołów	11 340***	16 000***		1 320*		-
Glin	2 700***	68 000***		5 104*		-
Korek	400-1500**	288-3 400**		430-530*		-
Jodła	450*	11 000*	490*	4 890*	1 033*	4,73*
Sosna	520*	12 000*	460*	4 760*	932*	5,11*
Świerk	470*	11 000*	550*	4 790*	1 072*	4,47*
Buk	730*	16 000*	1 500*	4 638*	1 420*	3,27*
Dąb	690*	13 000*	1 000*	4 304*	1 193*	3,61*
Jawor	630*	9 400*	915*	3 826*	1 194*	3,21*
Lipa	530*	7 400*	250*	3 700*	680*	5,44*

*KOLLMANN (1951).

**GENERAL TECHNICAL REPORT... (1999).

***ONDA (2003).

$$\frac{v_{dz\parallel}}{v_{dz\perp}} = \sqrt{\frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}}}$$

gdzie:

$v_{dz\parallel}$ i $v_{dz\perp}$ – prędkość dźwięku wzdłuż i w poprzek włókien,
 E_{\parallel} i E_{\perp} – moduł sprężystości wzdłuż i w poprzek włókien.

W drewnie mogą się również rozchodzić fale poprzeczne:

$$v_g = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

gdzie:

v_g - prędkość rozchodzenia się fal poprzecznych [m/s],

G - moduł odkształcenia postaciowego ($G = \frac{E}{2(1+\nu)}$) [MPa],

ν - współczynnik Poissona,

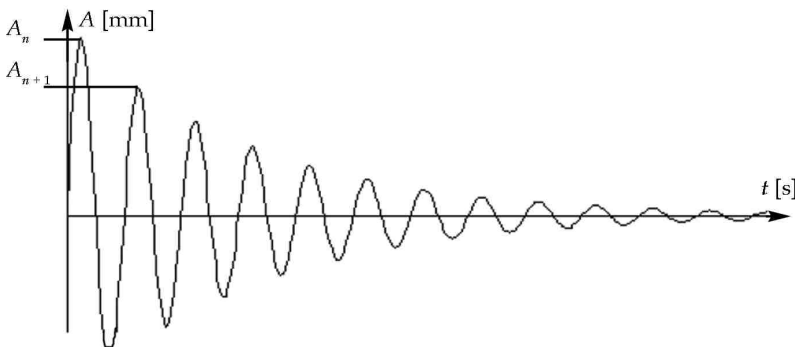
ρ - gęstość [kg/m³].

Podobnie jak w przypadku fal podłużnych, prędkość rozchodzenia się fal poprzecznych zależy od kierunku anatomicznego drewna (od wartości E).

(2) Tłumienie dźwięku

Tłumienie dźwięku (drgań) to zdolność stopniowego zmniejszania amplitudy drgań swobodnych wraz z upływem czasu, związana ze stratami energii układu drgającego. Jest wiele mechanizmów tłumienia wewnętrznego. Niektóre są związane z procesami mającymi określoną stałą czasową; największe straty energii powstają zatem w pobliżu charakterystycznych częstotliwości. Inne, nazywane tłumieniem wywołanym histerezą sprężystą, są związane z mechanizmami niezależnymi od czasu, a absorpcja energii zachodzi w całym zakresie częstotliwości - energia drgań zostaje zamieniona na ciepło. Jednostką tłumienia drgań jest decybel na metr [db/m]. Absorpcja energii fal dźwiękowych jest tym większa, im mniejsza jest sprężystość ośrodka (m.in. dlatego twarde metale bardziej nadają się na dzwony niż metale miękkie). Zmniejszanie się amplitudy drgań na skutek histerezy sprężystej przedstawiono na rysunku 2-9.

Pomijając znane z teorii drgań harmonicznym wyprowadzenia, zjawisko zmniejszania się amplitudy drgań można opisać liczbowo, znając



Rys. 2-9. Zmiana amplitudy drgań na skutek tłumienia

dwie następujące po sobie amplitudy oraz czas upływający pomiędzy nimi. Jeżeli A_n i A_{n+1} oznaczają kolejno po sobie następujące amplitudy wyrażające się wzorami:

$$A_n = A_0 e^{(-\beta t)} \text{ oraz } A_{(n+1)} = A_0 e^{-\beta(t+T)}$$

gdzie T – okres drgań,
to

$$\frac{A_n}{A_{n+1}} = e^{\beta T} \text{ i } \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \beta T$$

i wówczas logarytmiczny dekrement tłumienia można obliczyć z dwóch dowolnych, lecz ściśle określonych w czasie amplitud, np. amplitudy A_n i A_{n+k} , gdzie k jest liczbą naturalną związaną z czasem obserwacji t i okresem drgań T (t wyraża się wzorem $t = kT$). Jeżeli:

$$kD = \sum_{l=0}^{l=k-1} \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \ln \prod_{l=0}^{l=k-1} \frac{A_n}{A_{n+1}} = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$$

to można wyznaczyć logarytmiczny dekrement tłumienia D :

$$D = \frac{1}{k} \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$$

Logarytmiczny dekrement tłumienia D jest miarą intensywności tłumienia drgań harmoniczných wskutek histerezy sprężystej. Z danych zestawionych w tabeli 16 wynika, że różnice między tłumieniem drgań poprzecznych a tłumieniem drgań podłużnych są nieznaczne. Średnia wartość D dla drewna liściastego wynosi 0,035, a dla iglastego 0,025. Powłoka lakierowa zwiększa logarytmiczny dekrement tłumienia mniej więcej o 40%. Moczenie drewna w wodzie (wzrost wilgotności) powoduje zwiększenie tłumienia o blisko 75% (KRZYSIK 1975).

(3) Oporność falowa

Oporność falowa (impedancja akustyczna) Z jest miarą reakcji ośrodka na falę akustyczną. Wielkość ta służy ułatwieniu opisu właściwości akustycznych ośrodka. Impedancja akustyczna Z jest definiowana jako stosunek ciśnienia akustycznego p w dowolnym punkcie medium do prędkości akustycznej V w tym punkcie:

Tabela 16

Logarytmiczny dekrement tłumienia D w drewnie (KRÜGER i ROHLOFF 1938, ROHLOFF i LAWRYNOWICZ 1941)

Rodzaj drewna	Drgania podłużne	Drgania poprzeczne	Rodzaj drewna	Drgania podłużne	Drgania poprzeczne
Sosna	0,029	0,029	Jawor	0,026	0,028
Świerk	0,020	0,024	Okume	-	0,023
Brzoza	-	0,035	Orzech	-	0,032
Buk	-	0,035	Topola	-	0,030
Dąb	0,037	0,034			

$$Z = \frac{p}{V}$$

gdzie:

p – przyrost ciśnienia fali dźwiękowej [Pa],

V – prędkość ruchu cząsteczek ośrodka [m/s].

Dla fal płaskich impedancja akustyczna

$$Z = \rho v_{dz}$$

Przy dużej oporności akustycznej odpowiedź na wzbudzenie falą akustyczną materiału jest mała. Fala przechodzi przez materiał i jest w niewielkim stopniu tłumiona. Przy małej oporności akustycznej materiał, przez który przechodzi fala, zostaje pobudzony do silnych drgań (pochłania dużą część energii fali). Oporność akustyczną (impedancję) różnych materiałów zestawiono w tabeli 17.

Niektóre historyczne zastosowania drewna, zwłaszcza do produkcji płyt rezonansowych instrumentów muzycznych, oraz praktyczne problemy podczas budowy tych płyt opisano na s. 284 i dalszych (podano tam też współczynnik jakości akustycznej, tzw. *współczynnik Andriejewa*), natomiast wybrane współczesne zastosowania opisano na s. 310 i dalszych.

2.2.7. Drewno a inne materiały inżynierskie

O wartości technicznej drewna w produkcji nośnych elementów konstrukcyjnych maszyn i innych urządzeń w znacznym stopniu decydują jego właściwości mechaniczne (głównie wytrzymałościowe). Jak

Tabela 17

Impedancja akustyczna materiałów

Material	Gęstość [kg/m ³]	Impedancja [Ns/m ²]	Prędkość dźwięku [m/s]
Węglik wolframu**	19 250	101,0	6 680
Uran**	19 050	63,0	5 380
Stal*	7 800	38,0690	4 880
Szkło*	2 500	12,980	5 190
Cegła*	1 800	6,480	3 600
Dąb *	750	2,860	4 304
Jesion *	700	3,270	4 670
Sosna *	600	2,510	4 760
Korek*	250	0,120	500
Balsa **	100	0,080	-
Powietrze*	1,2	0,00041	340

*KRZYSIK (1975), **ONDA (2003), || - wzdłuż włókien.

wspomniano wcześniej, na wartości poszczególnych parametrów wytrzymałościowych drewna wpływają m.in. budowa anatomiczna, wilgotność oraz liczebność i rozmieszczenie wad strukturalnych. Techniczna wartość drewna stosowanego w ustrojach nośnych maszyn jest tym większa, im większy jest stosunek jego wytrzymałości do masy właściwej. Stosując drewno o mniejszej wytrzymałości, lecz równocześnie o znacznie mniejszej gęstości niż np. stop metalu, i jednocześnie dostosowując orientację włókien w podzespołach drewnianych do kierunków działania sił, można przy tym samym ciężarze uzyskać z drewna konstrukcje bardziej wytrzymałe³⁸.

Wytrzymałość właściwa (odniesiona do gęstości) drewna wzdłuż włókien może być większa od niektórych gatunków stali. Przykładem może być drewno sosnowe, które ma większe wartości wytrzymałości właści-

³⁸ Z jednym oczywistym ograniczeniem: wytrzymałość połączeń tworzyw drzewnych zwykle mieści się w granicach 30-35% nominalnej wytrzymałości łączonego materiału (SYDOR 2005). W przypadku stopów metali uzyskanie dla połączenia 60% wytrzymałości łączonego materiału zwykle nie nastęca wielu problemów konstrukcyjnych.

wej mierzonej wzdłuż włókien (zarówno pod względem wytrzymałości na rozciąganie, jak i na ściskanie statyczne) niż stal konstrukcyjna węglowa S185. W tabeli 18 porównano wybrane właściwości mechaniczne kilku gatunków drewna z niektórymi innymi materiałami konstrukcyjnymi. Wartości parametrów R_m/ρ oraz K_c/ρ wyrażają (w kilometrach) odpowiednio: długość rozciąganego oraz wysokość ściskanego teoretycznego pręta, który ulegnie zniszczeniu pod wpływem własnego ciężaru (w przypadku ściskania nie uwzględniono zjawiska wybożenia).

Tabela 18

Wytrzymałość właściwa materiałów konstrukcyjnych (wartości uśrednione)

Material	ρ [g/cm ³]	R_r [MPa]	R_m [MPa]	R_m ⊥ [MPa]	R_m/ρ [km]	R_m/ρ ⊥ [km]	K_c [MPa]	K_c/ρ [km]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Materiały drzewne ³⁹								
balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>)	0,16	51,5	73,5	1,0	46,8	0,64	9,22	5,87
sosna (<i>Pinus sylvestris</i>)	0,52	81,6	102,0	2,94	19,0	0,58	46,1	9,04
dąb (<i>Quercus robur</i>)	0,69	61,7	88,2	3,92	13,5	0,58	51,0	7,54
jesion (<i>Fraxinus excelsior</i>)	0,77	71,4	102,0	6,86	13,5	0,91	47,1	6,24
gwajak (<i>Guaiacum officinale</i>)	1,32	-	-	-	-	-	106	8,19
lignostone ⁴⁰	1,25	120,0	160,0	30,0	13,1	2,45	70	5,71
Stop Al - AK20	~2,80	100,0	170,0		6,19		90	2,55
Stop Al - AK9 uleps. ciepl.		180,0	270,0		9,83		160	5,82
Stal - S185 ⁴¹	~7,90	180,0	400,0		5,16		320	4,13
Stal - X60WCrMoV9-5 ⁴²	~8,40	> 1 050	1 765,0		21,20		1 400	17,0
Żeliwo szare - ZI 150	~7,0		100,0		150,0		2,14	140
Stop tytanu - Ti6Al4V ⁴³	4,40		850,0		950,0		22,0	~900
Stop magnezu - GA10 ⁴⁴	1,80		180,0		224,0		12,6	~200
Kauczuk ⁴⁵	0,93		-		027,0		2,96	-
Polistyren	~1,0		-		40,0		4,08	30

Tabela 18 – cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Szkoło (zwykłe – NaCaK)	2,50			-		40,0	1,63	> 400
Granit	2,70			-		< 3,0	< 0,11	120
Beton ⁴⁶ – C8/10	~1,90	-		< 1,6		< 0,09	8,0	0,43
Beton – C100/115	~2,30	-		5,2		0,23	100	4,43

|| – wzdłuż włókien, ⊥ – w poprzek włókien, ρ – gęstość, R_e – granica sprężystości, R_m – doraźna wytrzymałość na rozciąganie, K_c – wytrzymałość na ściskanie.

Opisując właściwości drewna, pominięto całkowicie jego właściwości cieplne. Przewodność cieplna drewna, która jest zdeterminowana jego porowatą strukturą, gatunkiem oraz stopniem wilgotności drewna, dla powietrzno-suchych gatunków iglastych wynosi 0,14-0,17 W/mK i jest około czterech razy mniejsza od przewodności cieplnej betonu i 100 razy od przewodności metali. Przewodność cieplna i inne właściwości cieplne drewna mają znaczenie głównie w jego zastosowaniu w budownictwie; w zasadzie nie odgrywają istotnej roli w budowie maszyn.

2.2.8. Najważniejsze użytkowo krajowe gatunki drewna

Obecnie w Polsce występuje w stanie naturalnym około 50 gatunków drzew rodzimych i introdukowanych. W ciągu ostatnich kilkuset lat

³⁹ Wartość ρ – uśredniona przy wilgotności 12-15%, wartość R_e – oszacowana według informacji na s. 39, wartość R_m w poprzek włókien – uśredniona dla obu kierunków anatomicznych. Dane dla sosny, dębu i jesionu – według KRZYSIKA (1975), za Pieręlginem, dane dla balsy i gwajaku – według WAGENFÜRA i SCHEIBERA (1974).

⁴⁰ Drewno prasowane warstwowo z tworzywami sztucznymi (MERTL 2007).

⁴¹ Stal konstrukcyjna węglowa – oznaczenie i dane według normy PN-EN 10025-1:2007 (stal o właściwościach zbliżonych do stali konstrukcyjnej St0 według dawniej obowiązującej normy PN-H-84020:1988).

⁴² Stal szybkoztańczona – oznaczenie i dane według normy DIN 17100.

⁴³ ASHBY i JONES (1996).

⁴⁴ Przesycony i starzony, składniki stopowe: 9,0-10,2% Al, 0,1-0,5% Mn, 1% Zn. Dane według MAŁEGO PORADNIKA MECHANIKA... (1994).

⁴⁵ Naturalny, wulkanizowany, silnie napęczniony. Dane według MAŁEGO PORADNIKA MECHANIKA... (1994).

⁴⁶ Dane według normy PN-EN 206-1:2003, C8/10 – beton niezbrojony o najmniej szej wytrzymałości, C100/115 – beton niezbrojony o największej wytrzymałości.

struktura gatunkowa lasów na ziemiach etnicznie polskich ulegała zmianom. Od początków polskiej państwowości do połowy XX wieku systematycznie spadał udział drzew gatunków liściastych w drzewostanie na korzyść wzrastającego udziału sosny. Udział drzew liściastych w roku 1945 osiągnął minimum (13%), a od roku 1945, w wyniku prowadzenia planowego zalesiania, zaczął wzrastać i w 2006 roku osiągnął 23,5% (RAPORT O STANIE LASÓW... 2007). Pomimo istnienia kilkudziesięciu gatunków, znaczący udział w wyrobach typu maszynowego ma jedynie kilkanaście szeroko rozpowszechnionych (wraz z ich ekotypami). Wymieniono je poniżej, a w nawiasach podano ich udział w polskim drzewostanie. Są to: sosna z modrzewiem (67,4%), jodła, świerk, jedlica zielona (8,2%), dąb, jesion, klon, jawor, wiąz (6,7%), brzoza (6,3%), olsza (5,3%), buk (5,0%), pozostałe liściaste (1,1%) (RAPORT O STANIE LASÓW... 2007). W Polsce dominują gatunki iglaste, które zajmują 76,5% powierzchni lasów (78,2% ich miąższości). Udział sosny w drzewostanie wynosi – w zależności od województwa od 27,5% (woj. małopolskie) do 87,0% (woj. lubuskie) (RAPORT O STANIE LASÓW... 2003).

Katalog rodzimych i introdukowanych gatunków drzew oraz ich historyczne i współczesne znaczenie w budowie maszyn przedstawiono w tabelach 19 i 20. Pominięto tam kilka mało istotnych gatunków (m.in. szalkak pospolity, głóg jednoszyjkowy, głóg dwuszyjkowy, jałowiec pospolity, jarzab pospolity – rośliny, które najczęściej występują w formie krzewiastej).

Dla ważniejszych introdukowanych w Polsce gatunków drzew, zebranych w tabeli 20, w nawiasach podano wiek, w którym gatunek został wprowadzony na ziemię etnicznie polskie.

Oprócz gatunków wymienionych w tabelach 19 i 29, w Polsce występują: (1) gatunki rzadkie na granicy zasięgu (np. dąb omszony), (2) gatunki rzadkie zagrożone (np. brzoza karłowata, brzoza niska) i narażone (brzozy: ojcowiska, Szafera; wierzby: borówkolistna, lapońska; sosna kosa) (POLSKA CZERWONA KSIĘGA ROŚLIN 2001) oraz (3) gatunki uprawiane, najczęściej ozdobne, antropofity (np. brzoza dahurska, klony: Ginnala, japoński, palmowy, srebrzysty, tatarski; cis pośredni; dąb błotny; jałowiec sawina; jesiony: amerykański, mannowy, ostrowockowy, pensylwański; jodły: grecka, jednobarwna, koreańska, kaukaska; lipa srebrzysta; modrzewie: japoński, syberyjski; sosny: wydmowa, himalajska, żółta, smółowa; topole: balsamiczna, amerykańska, włoska, kanadyjska, wirginijska i osiem innych mieszańców międzygatunkowych topoli oraz cały szereg gatunków drzew owocowych) (VASCULAR PLANTS... 2008). Te gatunki,

Tabela 19

Rodzime gatunki drzew i ich znaczenie w budowie maszyn

Lp.	Gatunek	Znaczenie		Stopień zagrożenia gatunku
		historycz- ne	współcze- sne	
1	Brzoza brodawkowata – <i>Betula pendula</i> Roth	+++	+++	*
2	Brzoza czarna – <i>Betula obscura</i> Kotula	+	–	*
3	Brzoza omszona – <i>Betula pubescens</i> Ehrh.	++	++	*
4	Buk zwyczajny – <i>Fagus sylvatica</i> L.	+++	+++	*
5	Cis pospolity – <i>Taxus baccata</i> L.	+++	–	**
6	Dąb bezszypułkowy – <i>Quercus petraea</i> Liebl.	++	+	*
7	Dąb szypułkowy – <i>Quercus robur</i> L.	+++	++	*
8	Grab zwyczajny (pospolity) – <i>Carpinus betulus</i> L.	+++	+	*
9	Grusza pospolita – <i>Pyrus communis</i> L.	+	–	*
10	Jabłoń dzika – <i>Malus sylvestris</i> Mill.	+	–	*
11	Jarząb pospolity – <i>Sorbus aucuparia</i> L.	–	–	*
12	Jesion wyniosły – <i>Fraxinus excelsior</i> L.	+++	++	*
13	Jodła pospolita – <i>Abies alba</i> Mill.	+++	+	*
14	Klon jawor (jawor) – <i>Acer pseudoplatanus</i> L.	+	+	*
15	Klon polny (paklon) – <i>Acer campestre</i> L.	+	–	*
16	Klon zwyczajny – <i>Acer platanoides</i> L.	+++	+	*
17	Lipa drobnolistna – <i>Tilia cordata</i> Mill.	++	+	*
18	Lipa szerokolistna – <i>Tilia platyphyllos</i> Scop.	++	+	*
19	Modrzew europejski – <i>Larix decidua</i> Mill.	+	+	*
20	Olsza czarna – <i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.	+++	+	*
21	Olsza szara (biała) – <i>Alnus incana</i> (L.) Moench	+	–	*
22	Olsza zielona – <i>Alnus viridis</i> (Chaix) DC.	–	–	*
23	Osika – <i>Populus tremula</i> L.	+	+	*
24	Sosna zwyczajna – <i>Pinus sylvestris</i> L.	+++	+++	*
25	Śliwa – <i>Prunus</i> spp. L.	–	–	*
26	Świerk pospolity – <i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.	+++	++	*
27	Topola biała – <i>Populus alba</i> L.	+++	+	*
28	Wiąz górski (brzost) – <i>Ulmus glabra</i> Huds.	++	+	*
29	Wiąz pospolity (polny) – <i>Ulmus minor</i> Mill.	+	–	*
30	Wiąz szypułkowy (limak) – <i>Ulmus laevis</i> Pall.	+	+	*
31	Wierzba biała (srebrna) – <i>Salix alba</i> L.	++	–	*
32	Wierzba krucha – <i>Salix fragilis</i> L.	++	–	*
33	Wierzba siwa – <i>Salix caprea</i> L.	+	–	*
34	Wiśnia – <i>Cerasus</i> spp.	++	+	*

(–) – gatunek niestosowany lub bardzo rzadko stosowany, (+) – gatunek mało znaczący, (++) – gatunek znaczący, (+++) – gatunek bardzo ważny.

(*) – gatunek niezagrażony wyginieciem, (**) – gatunek narażony (POLSKA CZERWONA KSIĘGA ROŚLIN 2001).

Tabela 20

Introdukowane gatunki drzew i ich znaczenie w budowie maszyn

Lp.	Gatunek	Znaczenie		Stopień zagrożenia gatunku
		historycz- ne	współcze- sne	
1	Czeremcha amerykańska – <i>Padus serotina</i> (Ehrh.) Borkh. (XIX w.)	+	–	*
2	Dąb czerwony – <i>Quercus rubra</i> L. (XIX w.)	+	–	**
3	Jedlica zielona (jedlica Douglasa) – <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco (XIX w.)	+	–	**
4	Klon jesionolistny (jesionoklon) – <i>Acer negundo</i> L. (XVIII w.)	–	–	*
5	Kasztanowiec zwyczajny – <i>Aesculus hippocastanum</i> L. (XVI w.)	–	–	*
6	Grochodrzew – <i>Robinia pseudacacia</i> L. (XVII w.)	++	+	*
7	Sosna Banksa (banka) – <i>Pinus banksiana</i> Lamb. (XVIII/XIX w.)	–	–	*
8	Sosna czarna – <i>Pinus nigra</i> J.F. Arnold (XVIII w.)	–	–	*
9	Sosna wejmutka – <i>Pinus strobus</i> L. (XIX/XX w.)	++	+	***

(–) – gatunek niestosowany lub bardzo rzadko stosowany, (+) – g. mało znaczący, (++) – gatunek znaczący, (+++) – gatunek bardzo ważny.

(*) – gatunek niezagrożony wyginięciem, (**) – gatunek narażony, (***) – gatunek zagrożony (POLSKA CZERWONA KSIĘGA ROŚLIN 2001).

z uwagi na rzadkość występowania i przeznaczenie głównie parkowe, nie miały i nie mają istotnego znaczenia w budowie maszyn.

W dalszej części podpunktu zestawiono alfabetycznie, według nazw polskojęzycznych, wybrane ważniejsze gatunki drzew. Z uwagi na ich niewielką liczbę zrezygnowano z podziału na iglaste i liściaste. Charakterystyki dokonano ze szczególnym uwzględnieniem cech istotnych z punktu widzenia historycznych i współczesnych zastosowań gatunku w budowie maszyn. Informacje zaczerpnięto z kilku monografii⁴⁷. Posłużono się klasyfikacją gatunkową i łacińskimi nazwami botanicznymi, korzystając z trzech baz danych, w pierwszej kolejności według VASCULAR PLANTS... (2008), w drugiej – według FLORA EUROPAEA (2008) oraz w trzeciej – według GERMPLASM RESOURCES... (2008). W przypadku gatunków

⁴⁷ M.in.: SOLSKI (1690), BURGSDORF (1809-1810), KITOWICZ (1840), FELDHAUS (1910), STIEBER (1922), KUŚMIERSKI (1925), PADECHOWICZ (1929), BOREJSZA i IN. (1930), MORBECK (1936), MATERIAŁOZNAWSTWO... (1945), BASIŃSKI (1948), WRÓBLEWSKI i DE MEZER (1948), MILEWSKI (1970), ZENKTELER (1971), KRZYSIK (1975), SZCZUKA i ŻUROWSKI (1999), ZIELSKI i KRĄPIEC (2004), PUDLIŚ (2005), SUWAŁA (2006).

krajowych oraz ważniejszych zagranicznych podano standardowy skrót oznaczenia autora taksonu, zrezygnowano jednak z podawania daty i źródła diagnozy taksonomicznej (zestawienie autorów taksonów znajduje się na s. 369). Angielskojęzyczne nazwy handlowe i regionalne gatunków drzew pochodzą m.in. z baz danych THE WOOD EXPLORER... (2008) oraz z RICHTER i DALLWITZ (2006), niemieckojęzyczne – z trzech austriackich i niemieckich serwisów branżowych⁴⁸ oraz stron internetowych dwóch austriackich szkół drzewnych⁴⁹.

Brzoza brodawkowata (*Betula pendula* Roth, syn. brzoza gruczołkowata – *Betula verrucosa* Ehrh.) należy do rodziny brzozowatych (*Betulaceae*) obejmującej kilkadziesiąt gatunków i jest w Polsce najpospolitszym jej przedstawicielem (stosunkowo licznie występuje też brzoza omszona). Brzoza brodawkowata osiąga wysokość 20-24 m i pierśnicę⁵⁰ 0,40-0,48 m. Kończy cykl wzrostowy w wieku 40-50 lat, dojrzałość rębną osiąga w wieku 80 lat, żyje przeciętnie 100-110 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – brzoza, brzoza brodawkowata, brzoza gruczołkowata, brzoza zwisła, brzezina; niemieckie – Birke, gemeine Birke, Hängebirke, Weissbirke (Weißbirke), Sandbirke, Warzenbirke; angielskie – birch, silver birch, European weeping birch, European white birch, weeping.

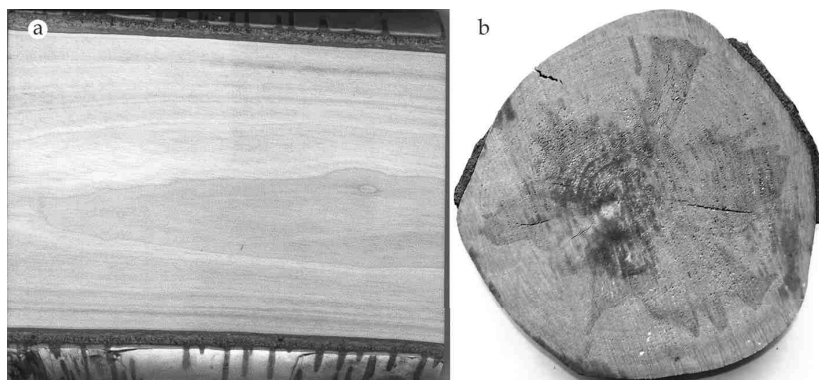
Gatunki podobne oraz podgatunki: występujące w Polsce – brzoza omszona typowa (*Betula pubescens* Ehrh. subsp. *pubescens*), brzoza omszona karpacka (*Betula pubescens* Ehrh. subsp. *carpatica* (Willd.) Asch. & Graebn.), brzoza niska (*Betula humilis* Schrenk.), brzoza żółta (*Betula lutea* Michx.), brzoza karłowata (*Betula nana* L.), brzoza czarna (syn. brzoza ciemna) (*Betula obscura* Kotula), brzoza ojcowska (*Betula pendula* Roth var. *oycoviensis*), brzoza Szafera (*Betula szaferi* Jentys-Szaferowa & Staszak.); inne rozpowszechnione na świecie – brzoza dahurska (*Betula davurica* Pallas), brzoza cukrowa (*Betula lenta* L.), brzoza japońska (*Betula japonica* Siebold).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-10). Niewyraźne słoje i jasno-żółtawa barwa, naczynia i promienie rdzeniowe ledwo widoczne. Liczne plamki rdzeniowe. Drewno beztwardzielowe.

⁴⁸ ProHolz Austria (<http://www.proholz.at>), Das Portal zur Holzwirtschaft (www.holz.de), Woodworker (<http://www.woodworker.de>).

⁴⁹ Höhere Technische Bundes-Lehr- und Versuchsanstalt Villach (<http://www.htl-vil.ac.at>), Holztechnikum Kuchl (<http://www.holztechnikum.at>).

⁵⁰ Pierśnica – średnica pnia drzewa na wysokości 1,3 m (czyli na wysokości klatki piersiowej przeciętnego dorosłego człowieka).



Rys. 2-10. Przekroje drewna brzozy brodawkowatej, skala 1:3: a - w płaszczyźnie stycznej (XY), b - w płaszczyźnie poprzecznej (XZ)

- **CECHY TECHNOLOGICZNE.** Drewno średnio trwałe, twarde, dość sprężyste, o średniej kurczliwości; prawie nie paczy się i nie wykazuje skłonności do pęknięć desorpcyjnych. Jego budowa umożliwia złączanie bardzo cienkich fornirów, a przez to wytwarzanie bardzo cienkiej sklejki wielowarstwowej. Łatwe w obróbce skrawaniem i gięciem. *Drewno brzozy nadaje się znakomicie do wyrzynania wszelkiego rodzaju krzywych linii, [...] a to z tego powodu, że jest równomiernie i silnie zrosnięte więc niema obawy aby się po wyrznięciu tamało. To też przytoczone wyżej właściwości drewna brzozy posiadają dla kołodzieja pierwszorzędne znaczenie, gdyż ma on najwięcej do czynienia z krzywymi liniami* (PADECHOWICZ 1929, s. 24).
- **WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.**
Historycznie: sochy⁵¹, koła pojazdów (dzwona⁵² – brzoza osobliwie potrzebna kołodzicom do kół wozowych – LINDE 1807-1814, t. 1, s. 105), dyszle i drabiny wozów konnych, sklejka lotnicza, szpulki do nici,

⁵¹ Socha – [...] jest to narzędzie rolnicze, zapewne od czasów pogańskich nie uległe zmianie (mówi p. Skotnicki). Konstrukcja nadzwyczaj prosta; składa się z grządzieli tj. dyszla świerkowego tak wybranego, iżby końce były z zakrzywieniami: do tych przytwierdzają się dwie pączki, które służą do trzymania a raczej kierowania narzędziem; w grządziel wprawiona jest socha tj. narzędzie z brzeziny, u dołu z dwoma wyciosanymi końcami, na które wbijają się narogi żelazne z ostrzami do krajania ziemi (gdzie indziej: lemiesz). Prócz tego po bokach są dwie odkładnice zwane deskami (KOLBERG 1885).

⁵² Dzwono – część drewnianej obręczy koła u wozu (najczęściej 1/6 lub 1/8) – por. przypis 138, s. 132.

miotły, styliska narzędzi ogrodowych, oprawy narzędzi, narty, skrzynie wagonów, podeszwy do obuwia, obcasy, kołki, gwoździe drzewne, podstawy obrabiarek, elementy sit młyńskich.

Współcześnie: styliska narzędzi ogrodowych, oprawy narzędzi ręcznych, elementy broni strzeleckiej, obłogi sklejki szklanej (warstwy zewnętrzne), meblowe elementy amortyzujące (sprężyny płaskie wykonane ze sklejki bukowo-brzozowej), modele odlewnicze.

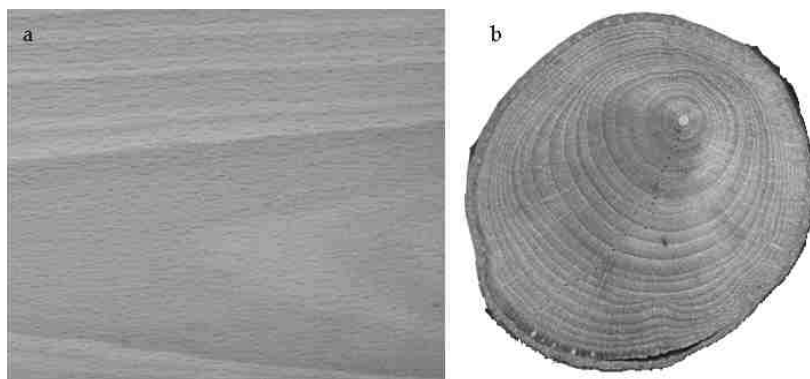
Buk zwyczajny (*Fagus sylvatica* L.), jedno z większych drzew i najpiękniejszych (LINDE 1807-1814, t. 1, s. 192), należy do rodziny bukowatych (*Fagaceae*), do której zaliczają się obok niego ważne użytkowo rodzaje drzew – dęby (*Quercus*) i kasztany (*Castanea*)⁵³. Buk, obok dębu, jest jednym z najczęściej spotykanych polskich drzew liściastych. W Polsce w stanie naturalnym występuje tylko buk zwyczajny, głównie na Pomorzu i na południu kraju; uprawianych jest ponad 37 odmian ozdobnych buka zwyczajnego (np. 'Albomarginata', 'Aurea Pendula', 'Białomarmurkowa', 'Białopstra', 'Black Swan', 'Czerwonolistna', 'Dawyck Gold', 'Dawyck Purple', 'Dębolistna', 'Franken', 'Grzebieniasta', 'Miedziana', 'Okrągłolistna', 'Paprotkowata', 'Powcinana', 'Purple Fontain', 'Tortuosa', 'Trójbarwna', 'Wielkozębna', 'Zwisająca', 'Żółtolistna', 'Żółtopstra' i in.). Poszczególne odmiany różnią się od siebie szybkością wzrostu oraz np. stopniem powyginania konarów. Buk zwyczajny osiąga wysokość 30-40 m i pierśnicę 0,9-1,2 m. Kończy cykl wzrostowy w wieku 100-200 lat, dojrzałość rębną osiąga w wieku 110 lat, żyje przeciętnie do 600 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – buk, buk zwyczajny, buk pospolity, buczyna, bukowina; niemieckie – Buche, gemeine Buche, Rotbuche (nazwa podgatunku lokalnego: Orientbuche (*Fagus sylvatica orientalis* (Lipsky) Greuter. & Burdet.)); angielskie – beech, European beech, common beech (nazwy podgatunków lokalnych: Carpathian beech, Danish beech, English beech, fayard, French beech, Romanian beech, Rumanian beech, Slavonian beech, Yugoslavian beech, Balkan beech, copper beech, purple beech).

Gatunki podobne i ważniejsze podgatunki: buk wschodni (*Fagus sylvatica* L. subsp. *orientalis* Greuter), buk pośredni (*Fagus sylvatica* L. subsp. *moesiaca*), buk wielkolistny (*Fagus grandiflora* Ehrh.).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-11). Drewno beztwardzielowe, jasne o zabarwieniu żółtawoczerwonym; słoje wyraźne, naczynia

⁵³ W Polsce występują jedynie nieliczne egzemplarze kasztana jadalnego (*Castanea sativa* Mill.).



Rys. 2-11. Przekroje drewna buku zwyczajnego: a – w płaszczyźnie stycznej (XY), skala 1:1, b – w płaszczyźnie poprzecznej (XZ), skala 1:4

niewidoczne, promienie rdzeniowe widoczne. W wyniku dłuższego składowania lub też po przejściu przez proces parzenia kolor drewna staje się bardziej intensywny, często w kolorystyce pojawiają się brunatnoczerwone zabarwienia (tzw. *twardziel fałszywa*) lub odcienie szarości (tzw. *twardziel mrozowa*). Twardziel fałszywa, koloru ciemnobrązowego do czarnego występuje najczęściej w części odziomkowej drzewa. Drewno po ścięciu podatne na zaparzenia.

- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno łupliwe, twarde, ciężkie, o strukturze dość jednolitej. *Buk jest między wszystkimi gatunkami drzew tym drzewem, które najlepiej łupać się dać, a z którego najwięcej łupanego Materiału, rękodzielnie potrzebują* (VON BURGSDORF 1810, t. 2, s. 345-346). Występowanie twardzieli fałszywej jest jedną z podstawowych jego wad (drewno takie nie tylko różni się kolorem, lecz także jest znacznie mniej nasiąkliwe oraz mniej elastyczne). Ważną cechą jest duża nasiąkliwość i związana z tym skłonność do paczenia się i pękania. Z uwagi na nasiąkliwość buk jest podstawowym materiałem do produkcji drewna prasowanego. Drewno dobrze się nadaje do obróbki, można je z powodzeniem skrawać, giąć, sklejać, polerować i barwić. Ponieważ chłonie sporo wilgoci, przy suszeniu pęka, a więc nie powinno być eksploatowane w warunkach zmiennej wilgotności. *Użycie drzewa bukowego do budowy w otwartym nie okrytym miejscu wcale jest przeciwnym trwałości; albowiem w krótkim czasie pruchnieie i napaści robaków jest wystawione: Przeciesz bucZYna w suchym okrytym miejscu długo trwa i jest mocna. Nayużyteczniejszy*

zaś budowa z buczyny pod wodą, gdyż tam podług doświadczenia wielu kamienieje (VON BURGSDORF 1810, t. 1, s. 96).

- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.

Historycznie: części wozów (szprychy i dzwona kół, luśnie⁵⁴, rowory⁵⁵, śnice [osady dyszla]), kule do kulbak⁵⁶, kopanice [sanie dwuczęściowe], dyszle, sprężyny do maszyn młyńskich, podstawy obrabiarok, skutnictwo (stęпки i nadbudówki statków, wiosła żeglarskie), elementy pługów i bron (czepigi⁵⁷ i police [półki], kratownice i bilca [zęby]bron), ramy maszyn rolniczych, kleszcze⁵⁸ do chomąt⁵⁹, koła zębate i pasowe, elementy amortyzujące karet, płyty strugnic⁶⁰.

Współcześnie: panewki łożysk ślizgowych, składnik sklejki (lotniczej, skutniczej, tzw. kształtek sklejkowych), meblowe elementy amortyzujące (sprężyny płaskie ze sklejki bukowo-brzozowej), uchwyty narzędzi, części stołów warsztatowych, szpule do nici, czółna tkackie, łoża broni palnej, instrumenty muzyczne (np. gry-

⁵⁴ Luśnia – drążek z twardego drewna, zamontowany z użyciem żelaznego pierścienia na zewnętrznej części osi przedniej; w jego górnej części znajduje się bolec, na którym zawieszona jest drabina; służy jako wzmocnienie kłonicy przedniej, która, ze względu na duże siły rozpięające drabiny, sama nie wytrzymałaby ciężaru ładunku.

⁵⁵ Rozwora – drąg umieszczony podłużnie w wozie gospodarskim, łączący przednią i tylną część podwozia. Umożliwia regulację rozstawu osi.

⁵⁶ [Kulbaki] nie były jednoformne, ale podług gustu każdego jeźdźca rozmaite: łęk, terlica, jarczak i turecka kulbaka, co wszystko podpadało pod imię powszechne „kulbaki”. Łęk był o dwu kulach równych, z przodu i z tyłu w góro podniesionych, między które kule siadał jeździec na poduszkę skózaną, sierścią bydlęcą wypchaną, rzemieniem pod brzuch konia przechodzącą przywiązaną. Terlica była o jednej kuli, z przodu w góro wydanej, i o ławce okrągłej, z tyłu na ćwierć łokcia szerokiej, z poduszką w środku taką jak i łęk. Jarczak była terlica albo łęk gładki, skórą obklejony, bez poduszki, na którym jarczaku chłopcy, ciurowie i towarzystwo rękodajni do twardego siedzenia na koniu bywali przyuczani; turecka kulbaka była podobna do terlicy z tą tylko różnicą, iż przednia kula była wyższa i ostrzejsza, a zadnia ława szersza; miasto zaś poduszki cały wiersz kulbaki miękko wnusiem końskim wystany i sukmem powleczoney; i takiego najwięcej siądzenia husarze do potrzeby zażywali (KITOWICZ 1840, rozdział: O stanie żołnierskim).

⁵⁷ Czepig – uchwyt do mocowania upręży.

⁵⁸ Kleszcze (duha, duga) – dwie owalne boczne części chomąta.

⁵⁹ Chomąto – część upręży w kształcie owalnej ramy zakładanej koniowi na szyję (vide przypis 185 na s. 233 i 234).

⁶⁰ Strugnica (stolarska lub stolarsko-ciesielska) – stół stolarski do ręcznej obróbki drewna. Wykonany z twardego drewna. Składa się z: podstawy, płyty roboczej, docisków (do zamocowania drewna w czasie obróbki), otworów, imaków oraz korytka na narzędzia.

fy gitar, korpusy ze sklejki bukowo-brzozowej), sprzęty gospodarstwa domowego.

Cis pospolity (*Taxus baccata* L.) to długowieczne, iglaste, zimozielone drzewo (w Polsce z powodu niekorzystnych dla tego gatunku warunków klimatycznych często występuje w formie krzewu). W łagodniejszym klimacie *dorasta znacznie wyżej i groboci tak dalece, że go w Szkocji 20. stop⁶¹ w obwodzie grubym widziano. Cis bywa także w Ogrodach pielęgnowanym, gdzie go w Piramidy i inne figury ogrodnicy strzygą* (VON BURGSDORF 1810, t. 1, s. 194). *Cis jest drzewem szpilkowym, rosnącym powolnie w górzystych okolicach do 14 m wysokości* (SKWARCZYŃSKI 1925, s. 228); osiąga pierśnicę około 0,5 m. Kończy cykl wzrostowy w wieku 70-120 lat, żyje do 1000 lat⁶².

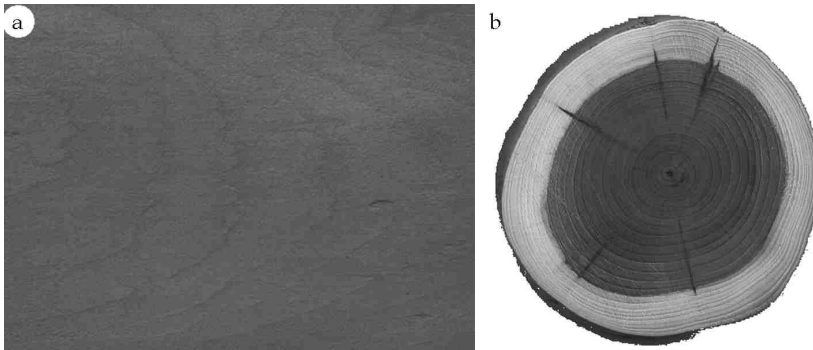
Nazwy handlowe i regionalne: polskie – cis, cis pospolity, cisina; niemieckie – Eifbaum, Ibe, Ifenbaum, gemeiner Taxusbaum; angielskie – yew, European yew, common yew, English yew.

Gatunki podobne: występujące i uprawiane w Polsce – cis pośredni (*Taxus ×media* Rehder) – 17 odmian, cis japoński (*Taxus cuspidata* Sieb.) – 4 odmiany; inne – cis zachodni (syn. cis pacyficzny) (*Taxus brevifolia* Nutt.).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-12). Drewno drobnosłoiste, prostowłókniście i homogeniczne. Biel i twardziel dobrze odgraniczone; biel wąski, biały do żółtawobiałego, twardziel brunatnoczerwona, niekiedy w kolorze mahoniu, a nawet przechodząca w fiolet, błyszcząca.
- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno ma dużą gęstość i twardość (podobnie jak grab i jesion), jest bardzo ciągliwe i elastyczne oraz zwięzłe i trudno łupliwe, bardzo trwałe, odporne na warunki atmosferyczne, niemal niepodatne na biokorozję.

⁶¹ 20 stóp staropolskich to około 11,9 m, co można przeliczyć na mniej więcej 3,8 m średnicy.

⁶² Cis pospolity rosnący w Henrykowie Lubańskim na Dolnym Śląsku jest najstarszym drzewem w Polsce. Jego wiek ocenia się na 1260 lat, ma wysokość 13 m, średnicę pnia na wysokości 1,3-1,63 m. Cis jest najdłużej żyjącym drzewem Europy – za najstarszy okaz uznawany jest słynny *Fortingall Yew* rosnący w miejscowości Fortingall nieopodal Loch Tay (Szkocja); wspomina o nim cytowany wcześniej Burgsdorf. Jest to jednocześnie najokazalsze pod względem obwodu pnia drzewo w Wielkiej Brytanii – w pierśnicy (wg norm brytyjskich jest to 5 stóp, czyli 1,52 m) liczy sobie 5,03 m średnicy. Rośnie on na dziedzińcu kościelnym wśród kamiennych postumentów. Jego nieprawdopodobny pień jest rozdwojony i w znacznym stopniu wypróchniały. Uniemożliwia to precyzyjne określenie jego wieku, szacowanego na co najmniej 3000 lat (ZARZYŃSKI 2008).



Rys. 2-12. Przekroje drewna cisu pospolitego: a - w płaszczyźnie stycznej (XY), przekrój przez twarździel, skala 1:1, b - w płaszczyźnie poprzecznej (XZ), skala 1:4

- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.

Historycznie: łuki, kusze, kołki w połączeniach, czółenka tkackie, przyrządy miernicze, osie wozów.

Współcześnie: przybory kreślarskie.

Dąb (częściej występujący dąb szypułkowy - *Quercus robur* L. - 17 odmian; rzadziej występujący dąb bezszypułkowy - *Quercus petraea* Liebl., syn. *Quercus sessilis* Ehrh. - 3 odmiany) należy do rodziny bukowatych (*Fagaceae*). Są to drzewa liściaste występujące w strefie umiarkowanej półkuli północnej oraz w wyższych partiach strefy tropikalnej. Drewno bardzo cenione - w *Statucie wiślickim są już przepisane kary za ścinanie dębów w cudzym lesie*⁶³ (GLOGER 1900-1903, t. 1, s. 306). Dąb w Polsce osiąga wysokość 40-50 m i pierśnicę 1,5-2,0 m. Kończy cykl wzrostowy w wieku 120-200 lat, dojrzałość rębną osiąga w wieku 120 lat, żyje przeciętnie 600-1000 lat.

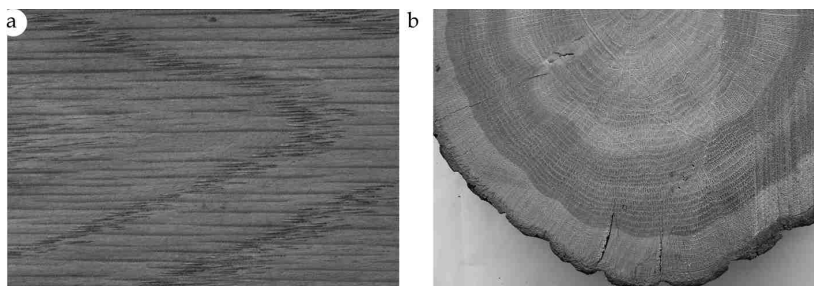
Nazwy handlowe i regionalne dębu szypułkowego: polskie - dąb letni, dębina (nazwy historyczne: dąb pospolity, dąb twardy); niemieckie - Eiche, Sommereiche, Deutsche Eiche, Stieleiche; angielskie - pedunculate oak. Nazwy handlowe i regionalne dębu bezszypułkowego: polskie - dąb

⁶³ Paragraf 86 Statutu, *O wyrąbaniu drzewa w cudzym lesie*, brzmi: *Niektórzy w swej śmiałości wejchawszy w cudzy las albo gaj, jakiegoś ziemianina, bez jego woli, drzewo wyrąbawszy z lasu wywiozą. Przeto uchwalamy, gdyby kto z cudzego lasu dąb wyrąbawszy wywiezie, który nadawałby się na osie do wozu, albo gdyby wywiózł wóz zwyczajnego drewna wtedy temu, czyje są drzewa, ma zapłacić karę zwaną siedemnadzieścia* (Statut wiślicki (1347-1348) ustanowiony przez Kazimierza Wielkiego - BALZER 1947).

zimowy, dębina; niemieckie – Eiche, Traubeneiche, Wintereiche, Späteiche, Spessart-Eiche; angielskie – sessile oak, durmast oak.

Gatunki podobne: występujące w Polsce – dąb czerwony (*Quercus rubra* L.), dąb omszony (*Quercus pubescens* Willd., syn. *Quercus lanuginosa* Lam.), dąb błotny (*Quercus palustris* Muenchh.); inne – dąb biały (*Quercus alba* L.), dąb korkowy (*Quercus suber* L.).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-13). Drewno w przekroju poprzecznym ma barwę żółtobrnatną z połyskującymi promieniami rdzeniowymi, widoczne są duże naczynia zgrupowane pierścieniowo w drewnie wczesnym. Na przekroju promieniowym promienie rdzeniowe w postaci błyszczących smug (błyszcz). Biel wąski, żółtobiały, twardziel brunatna. Dąb szypułkowy ma drewno nieco jaśniejsze od drewna dębu bezszypułkowego.



Rys. 2-13. Przekroje drewna dębu: a – w płaszczyźnie stycznej (XY), skala 1:1, b – w płaszczyźnie poprzecznej (XZ), skala 1:4

- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno ciężkie, łupliwe i trwałe. Drewno wąskosłoiste jest miękkie i łatwe w obróbce, szerokosłoiste – twarde, wytrzymałe i trudne w obróbce. Wojewoda poznański, Jan Ostroróg Młodszy (1565-1622), mawiał: *Kto dębu utnie, jakoby chłopca zabił* (OSTRORÓG 1859).
- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.
Historycznie: kołodziejstwo, szkutnictwo, bednarstwo, konstrukcje nośne samochodów, stoły warsztatowe, uchwyty i części narzędzi, elementy konstrukcyjne pługów rolniczych, zęby bron, wały wiatraków i młynów, kieraty, obudowy młynów, ramy maszyn rolniczych.
Współcześnie: uchwyty i części narzędzi.

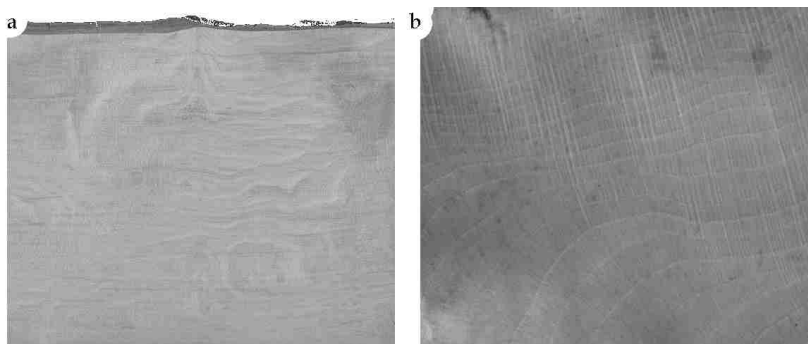
Grab zwyczajny (*Carpinus betulus* L.), syn. grab pospolity, występuje w Polsce w 11 odmianach jako jedyny gatunek rodzimy rodzaju *Carpinus* (jest jeszcze kilka introdukowanych). *Drzewo miernej wysokości; dla twardości i trwałości w rozmaitych rzemiosłach zażywane* (LINDE 1807-1814, t. 2, s. 765). Ma nieregularny, wielokrotny pień o niekołowym przekroju oraz wysoką, miotlastą koronę. *Charakterystyczną cechą grabu jest kancistałość pnia, prawie obca innym naszym drzewom* (PADECHOWICZ 1929, s. 37). Na świecie występuje około 25 gatunków grabu, przede wszystkim w Azji Wschodniej i Ameryce Północnej. Grab osiąga wysokość 14-20 m i pierśnicę 0,6-0,8 m. Kończy cykl wzrostowy w wieku 80-90 lat, dojrzałość rębna osiąga w wieku 60 lat, w korzystnych warunkach żyje 250-300 lat, najczęściej jednak 100-120 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – grabina, grab zwyczajny, grab pospolity; niemieckie – Hainbuche, Weißbuche, Hagebuche; angielskie – European hornbeam, common hornbeam.

Gatunki podobne uprawiane w Polsce: grab sercowaty (*Carpinus cordata* Blume), grab amerykański (*Carpinus caroliniana* Walter), grab luźnokwiatowy (*Carpinus laxiflora* (Siebold & Zucc.) Blume), grab wschodni (*Carpinus orientalis* Mill.), grab japoński (*Carpinus japonica* Blume), grab Czosnowskiego (*Carpinus tchonoskii* Maxim.), grab Turczaninowa (*Carpinus turczaninowii* Hance.).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-14). Drewno ma barwę białą z odcieniem brudnożółtawym; cały przekrój ma barwę jednakową, słoje niewyraźne; warstwy drewna wczesnego mało się różnią od warstw drewna późnego, charakterystyczna jest duża i wyraźna falistość słoje rocznych, która powoduje nieregularny przekrój poprzeczny, o znacznych miejscami wypukłościach lub wklęsłościach. Drewno beztwardzielowe.
- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno twarde, ciężkie, sprężyste i trudne w obróbce. Przy zmianie wilgotności i temperatury otoczenia silnie się kurczy lub pęcznieje. *Grabowe drzewo wrzucić do wody bieżącej, za rok obróci się w kamień, jakiego do ostrzenia brzytwy cyrulicy używają* (SOLSKI 1690, Księga 1, Zabawa 3, Nauka 27)⁶⁴.
- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.
Historycznie: palce kół zębatych napędów (wciągarek, młynów, obrabiarek), trzonki toporów, kliny do ścinki drzew, koła

⁶⁴ Dość zaskakująca uwaga, podobnie o buku napisał, cytowany na s. 61-62, Burgsdorf.



Rys. 2-14. Przekroje drewna grabu zwyczajnego, skala 1:2: a - w płaszczyźnie stycznej (XY), b - w płaszczyźnie poprzecznej (XZ)

wozów, uchwyty narzędzi (strugi, pilniki, młotki), panewki łożysk ślizgowych.

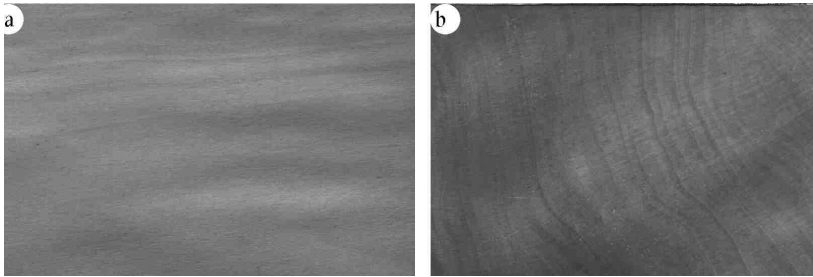
Współcześnie: łożyska ślizgowe, trzonki narzędzi.

Grusza pospolita (*Pyrus communis* L., syn. *Pirus communis* L.). Grusza osiąga wysokość 14-20 m i pierśnicę przeciętnie 0,5-1,0 m, najczęściej jednak jest o wiele niższa i ma zakrzywiony pień. Kończy cykl wzrostowy w wieku 60-80 lat, żyje przeciętnie do 150 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie - grusza, grusza pospolita, grusza domowa, grusza dzika, płonka, ulęgałka; niemieckie - Birnbaum, Schweizer Birnbaum, gemeiner Birnbaum, wilder Birnbaum, echter Birnbaum; angielskie - pear, European pear, peartree.

Gatunki podobne: występujące w Polsce - grusza ussurijska (*Pyrus ussuriensis* Maxim.), grusza wierzbolistna (*Pyrus salicifolia* Pall.); inne - grusza szara (*Pyrus ×canescens* Spach.), grusza polna (*Pyrus ×amphigenea* Domin), grusza kaukaska (*Pyrus caucasica* B. Fedtsch.), grusza oliwnikolistna (*Pyrus elaeagrifolia* Pall.).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-15). Drewno niezróżnicowane na biel i twardziel, o różnych odcieniach: od jasnomatowego przez żółty aż do brunatnego, najczęściej jednak czerwobrazowe z widocznymi słojami rocznymi. Drewno [...] jest bardzo drobno-włókniste o porach gołym okiem prawie niedostrzegalnych (PADECHOWICZ 1929, s. 43).
- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno średniociężkie, twarde, o równomiernej gęstości, podatne na kolonizację przez grzyby i owady; nieodporne na zmiany warunków atmosferycznych. Najważniejszą jednak, a zarazem najcharakterystyczniejszą cechą gruszy, która ją wyróżnia



Rys. 2-15. Przekroje drewna gruszy pospolitej, skala 1:1: a - w płaszczyźnie stycznej (XY), b - w płaszczyźnie poprzecznej (XZ)

z pomiędzy innych drzew, jest to, że daje się barwić na czarno do tego stopnia, że w takim kolorze zamiast hebanu jest sprzedawana. Bezwzględna łatwość imitowania hebanu jest powodem, że drewno to nie tylko w stolarstwie, lecz w ogóle w przemyśle drewniano-galanteryjnym i instrumentarskim [lutniczym] bardzo się ceni (PADECHOWICZ 1929, s. 43). Drzewo [...] gruszy, dla swej twardości i dychtowności [uniwersalności] [stolarzom i tokarzom] przydatne (BURGSDORF 1810, t. 1, s. 151).

- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.

Historycznie: formy drukarskie, czółenka tkackie, obudowy aparatów fotograficznych, obudowy instrumentów muzycznych. Jest to drewno czerwone, twarde, niekrzywiące się, przeto używane jest do wyrobu przyborów rysunkowych, sprzętów drobnych, narzędzi stolarskich, oraz małych modeli odlewniczych, posiadających drobne kontury (KUŚMIERSKI 1925, s. 12).

Współcześnie: łożyska, obudowy instrumentów muzycznych, przyrządy kreślarskie (linijki, trójkąty, przykładnice), modelarstwo, galanteria drzewna.

Jedlica zielona (*Pseudotsuga taxifolia* Britton, syn. dagleżja zielona - *Pseudotsuga douglasii* Carrière, *Pseudotsuga menziesii* Franco). Gatunek północnoamerykański introdukowany w Europie (w Polsce od 1833 roku). Zimozielone drzewo szpilkowe z rodziny sosnowatych. W Polsce dagleżja występuje w czterech odmianach; osiąga wysokość około 35 m (w Ameryce Północnej około 75(100) m)⁶⁵, a pierśnicę 0,4-1,2 m. Kończy

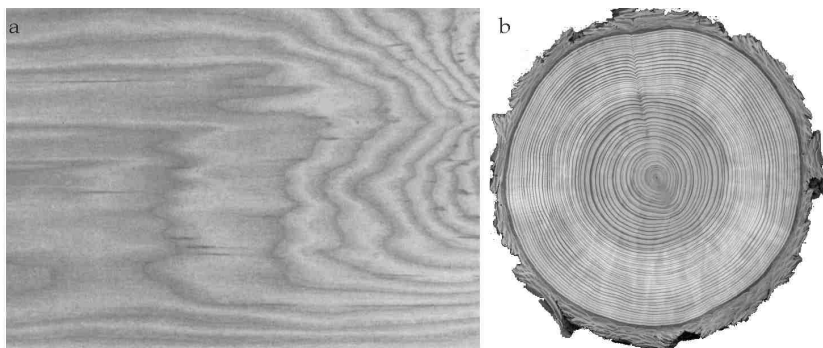
⁶⁵ Najwyższe drzewa na świecie to: jedlica (*Pseudotsuga taxifolia*), eukaliptus (*Eucalyptus regnans*) i sekwoja (*Sequoia sempervirens*). Do tego ostatniego gatunku należą najwyższe obecnie znane i rosnące drzewa: *Stratosphere Giant* o wysokości 112,3 m

cykl wzrostowy w wieku 50-70 lat, dojrzałość rębną osiąga w wieku 80 lat, żyje do 1000 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – daglezja, jedlica, daglezja zielona, jedlica zielona, daglezja Douglasa (nazwy historyczne: tsuga, duglaska, Duglazja – STIEBER 1922, s. 8-9); niemieckie – Douglasie (niezalecane nazwy: Douglastanne, Douglasfichte, Douglaskiefer); angielskie – blue Douglas-fir, Douglas-fir, coast Douglas-fir, Colorado Douglas-fir, inland Douglas-fir, interior Douglas-fir, Oregon Douglas-fir, Columbian pine, British Columbia pine, British Columbian pine, Douglas spruce, Douglas-fir, Oregon pine, puget sound pine, red fir, Rocky Mountain Douglas-fir, yellow fir.

Gatunki podobne: *Pseudotsuga macrocarpa* Mayr. (brak nazwy polskiej), *Pseudotsuga japonica* Beissn. (brak nazwy polskiej).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-16). Biel i twardziel dobrze odgraniczone. Biel prawie biały lub żółtawobiały, rzadko o grubości powyżej 50 mm. Twardziel czerwona lub czerwono-brązowa do żółtej. Przyrosty roczne wyraźne. Drewno pod wpływem światła ciemnieje, uzyskując barwę czerwono-brunatną. Szczególnie drewno wąskosłoiste ma barwę bladożółtą i nazywane jest *yellow fir* w odróżnieniu od drewna średnio- i szerokosłoistego określanego mianem *red fir*.



Rys. 2-16. Przekroje drewna jedlicy zielonej: a – w płaszczyźnie stycznej (XY), skala 1:1, b – w płaszczyźnie poprzecznej (XZ), skala 1:4

(Humboldt Redwoods State Park, USA), *Mendocino Tree* – 112,0 m (Montgomery Woods State Reserve, USA), *National Geographic Tree* – 111,4 m (Redwood National Park, USA) (NOWE NAJWYŻSZE DRZEWA... 2006). Najwyższa żyjąca daglezja przekracza 100 m wysokości, jednak dane historyczne mówią o drzewach osiągających blisko 120 m wysokości.

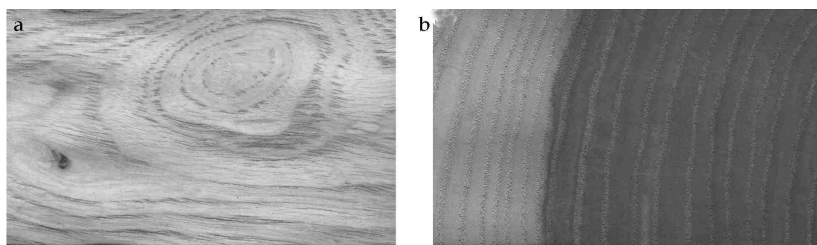
- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno jest jednym z najbardziej wytrzymałych mechanicznie spośród drewna gatunków iglastych; jest twarde i średnio kurcziwe.
- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.
Historycznie: wagony, samoloty, maszty okrętowe, aparatura chemiczna.
Współcześnie: łodzie.

Jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior* L.) należy do rodziny oliwkowatych (*Oleaceae*). Występuje w strefie umiarkowanej półkuli północnej; w Polsce rośnie 16 odmian. Jesion osiąga wysokość 30-40 m i pierśnicę 0,9-1,0(1,5) m. Kończy cykl wzrostowy w wieku 60-70 lat, dojrzałość rębną osiąga w wieku 120 lat, żyje przeciętnie do 300 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – jesion, jesion wyniosły; niemieckie – gewöhnliche Esche, Esche, gemaine Esche, europäische Esche; angielskie – ash, European ash, Vanlig's (Vanlig) ash, common ash, nazwy odmian lokalnych: Belgian ash, English ash, French ash, Hungarian ash, Italian olive ash, olive ash, Polish ash, Slavonian ash, Spanish ash, Swedish ash.

Gatunki podobne: występujące w Polsce – jesion amerykański (*Fraxinus americana* L.), jesion mannowy (*Fraxinus ornus* L.), jesion ostroowockowy (*Fraxinus oxycarpa* Willd.), jesion pensylwański (*Fraxinus pennsylvanica* Marshall, syn. jesion omszony – *Fraxinus pubescens* Lam.), jesion wąskolistny (*Fraxinus angustifolia* Vahl), jesion biltmorski (*Fraxinus biltmoreana* Beadle).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-17). Drewno ma wyraźne słoje, w drewnie wczesnym widoczne duże naczynia, jest jaśniejsze od drewna późnego. Promienie rdzeniowe słabo widoczne. Wąski biel i nieza-barwiona twardziel mają jednakową jasnożółtą barwę i są trudne do odróżnienia, z czasem cała twardziel ciemnieje.
- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno jest twarde, elastyczne, wytrzymałe i ciężkie. Jesion ciemny jest twardszy i bardziej wytrzymały niż dąb. Występuje w kilkunastu odcieniach (im ciemniejszy – tym twardsze drewno). *Materiał tego drzewa [...] jest [...] nadzwyczaj sprężysty, przewyższając pod tym względem wszystkie drzewa krajowe* (PADECHOWICZ 1929, s. 25-26). Wyjątkowo nadaje się do polerowania. Drewno młodych drzew nadaje się do gięcia. Mało odporne w bezpośrednim kontakcie z wodą.
- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.
Historycznie: uchwyty narzędzi (trzonki siekier, młotków); *do wszystkich do czego dębina i buczyna [...] przy rękodzielach użytą był*



Rys. 2-17. Przekroje drewna jesionu wyniosłego: a – w płaszczyźnie stycznej (XY), skala 1:4, b – w płaszczyźnie poprzecznej (XZ), skala 1:1

może, użyć z tym samym skutkiem można drzewa [...] jesionów (BURGDORF 1810, t. 2, s. 357); drewno szerokosłoiste – lotnictwo (elementy konstrukcyjne kadłuba, śmigła), kołodziejstwo (szprychy, dzwonna), sprzęt sportowy (narty, sanki, rakiety tenisowe, kije hokejowe, tyczki, wiosła), narzędzia rolnicze (np. targańce do kosiarek); drewno wąskosłoiste – lotnictwo.

Współcześnie: sprzęt sportowy (kije do baseballu, hurlingu⁶⁶ i bilardu, wiosła), pudła gitar, strojnice fortepianów, wykończenie wnętrza samochodów, samolotów i wagonów kolejowych.

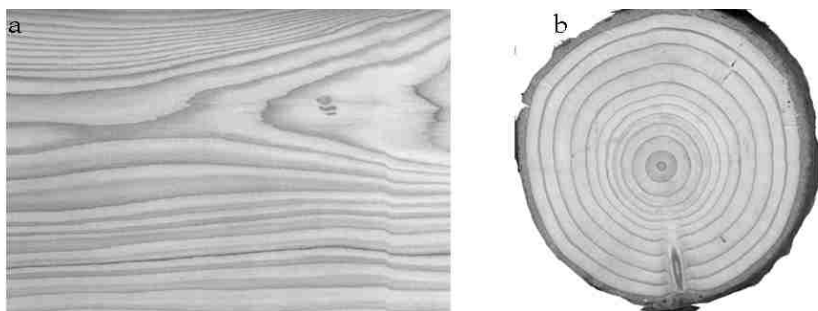
Jodła pospolita (*Abies alba* Mill.) należy do rodzaju zimozielonych drzew z rodziny sosnowatych (*Pinaceae*) obejmującej blisko 50 gatunków występujących na półkuli północnej (w Polsce – pięć odmian jodły pospolitej). Jodła osiąga wysokość około 50 m (maksymalnie 70 m) i pierśnicę około 1,5 m. Okres przyspieszonego wzrostu rozpoczyna się około 15-16 roku życia i trwa do 100 lat, wzrost na wysokość ustaje w wieku 200 lat. Dojrzałość rębna osiąga w wieku 100 lat, żyje do 500 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – jodła pospolita, jodła biała; niemieckie – Weiß-Tanne, Weißtanne, Edeltanne, Silbertanne; angielskie – common fir, silver fir, European silver fir.

Gatunki podobne: występujące w Polsce – jodła grecka (*Abies cephalonica* Loudon), jodła jednobarwna (syn. jodła kalifornijska) (*Abies concolor* Lindl.), jodła koreańska (*Abies koreana* E.H. Wilson), jodła kaukaska (*Abies normandiana* Spach); inne – jodła wonna (*Abies amabilis* Douglas), jodła balsamiczna (*Abies balsamea* (L.) Mill.), jodła olbrzymia (*Abies grandis* (Douglas ex D. Don) Lindl.), jodła syberyjska (*Abies sibirica* Ledeb.).

⁶⁶ Hurling – tradycyjna irlandzka gra zespołowa podobna do hokeja.

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-18). Drewno jest beżowyżyczne, o niezabarwionej twardzieli i o jednolitej, jasnej barwie przechodzącej w szary odcień ciemniejszy od świerka. Wizualnie bardzo podobne do drewna świerkowego.



Rys. 2-18. Przekroje drewna jodły pospolitej, skala 1:4: a - w płaszczyźnie stycznej (XY), b - w płaszczyźnie poprzecznej (XZ)

- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno sprężyste, lekkie, miękkie, łupliwe i skłonne do pękania; w wodzie bardzo trwałe. *W Budowli iedlina ma mniejszą trwałość, iak fofnina a zatym ieft tańszą* (BURGSDORF 1810, t. 2, s. 370).
- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.
Historycznie: wagony kolejowe, szkutnictwo, sklejka lotnicza, *poszukiwaną jest jodła jako materiał oddźwięczny i papierowy* (STIEBER 1922, s. 40).
Współcześnie: instrumenty muzyczne (drewno rezonansowe w pianinach, fortepianach, gitarach, skrzypcach, mandolinach; również do budowy piszczałek organowych), modelarstwo (w postaci sklejki).

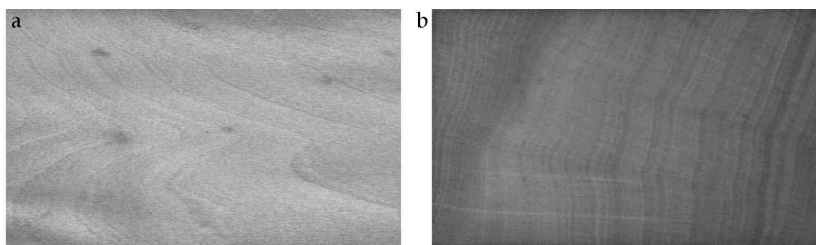
Lipa drobnolistna (*Tilia cordata* Mill.) – gatunek długowiecznych drzew należący do rodziny lipowatych (*Tiliaceae*) występującej w umiarkowanej strefie półkuli północnej. Do lipowatych zalicza się około 30 gatunków. W Polsce występują dwa dziko rosnące gatunki lipy: lipa drobnolistna i lipa szerokolistna (*Tilia platyphyllos* Scop., syn. lipa wielkolistna – *Tilia grandifolia* Ehrh.) oraz gatunek uprawny – lipa srebrzysta (*Tilia tomentosa* Moench). Lipa osiąga wysokość do 30 m i pierśnicę do 2 m. W pierwszych latach lipa drobnolistna rośnie powoli, a w wieku 60-100 lat jej wzrost jest szybszy, około 130-150 roku życia przyrost na

wysokość prawie całkowicie ustaje, natomiast przyrost na grubość może trwać przez setki lat. Dojrzałość rębna osiąga w wieku 100 lat, żyje przeciętnie 300-400 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – lipa (nazwa historyczna: lipa małolistna – STIEBER 1922, s. 38); niemieckie – Linde; angielskie – linden, large leaf, nazwy innych gatunków lipy: lime, common lime, basswood, beetre, tilia, linn wahoo, wichup.

Gatunki podobne: lipa krymska (*Tilia ×euchlora* K. Koch), lipa amerykańska (*Tilia americana* L.), lipa amurska (*Tilia amurensis* Rupr.).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-19). Drewno białe, lekko połyskujące, z odcieniem różowym lub żółtawym. Słoję widoczne (słabiej zarysowane na przekroju podłużnym promieniowym), promienie rdzeniowe niewidoczne na przekroju podłużnym stycznym, na przekroju promieniowym widoczne w postaci jaśniejszych lub ciemniejszych plamek.



Rys. 2-19. Przekroje drewna lipy drobnolistnej, skala 1:1: a – w płaszczyźnie stycznej (XY), b – w płaszczyźnie poprzecznej (XZ)

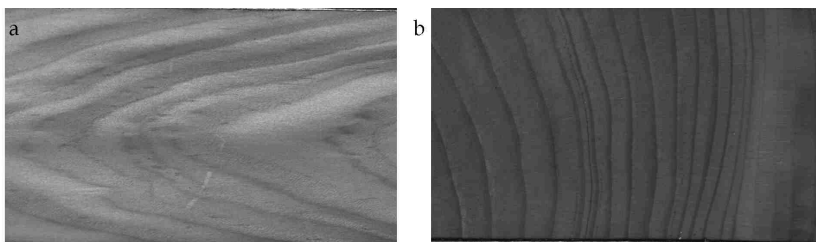
- CECHY TECHNOLOGICZNE. *Materiał lipowy jest nieco twardszy od topoli, więcej żółty i tупliwy, a przytem lekki i ścisły [...] łatwy jest do obróbki, a nie łatwo się patrzy i nie pęka* (PADECHOWICZ 1929, s. 31). *Z powodu swej ścisłości, jednolitej budowy i białości używane bywa do barwienia oraz na cieńkie, jasne forniery* (WRÓBLEWSKI, DE MEZER 1948, s. 50).
- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.
Historycznie: *materiał lipowy cenionym jest przez rzeźbiarzy, tokarzy, fabryki ołówków i rysownic, oraz przez fabryki instrumentów muzycznych (organy) [...]* (STIEBER 1922, s. 38).
Współcześnie: modele odlewnicze, korpusy gitar elektrycznych, obudowy bębnow.

Modrzew europejski (*Larix decidua* Mill., syn. *Larix europaea* DC.) należy do rodziny sosnowatych (*Pinaceae*), która obejmuje 12 gatunków występujących na obszarach umiarkowanych i chłodnych półkuli północnej. Modrzewie należą do jednych z najwyższych drzew w Polsce, osiągają nawet 50 m wysokości. Modrzew europejski występuje w dwóch podgatunkach, jako: modrzew europejski typowy (*Larix decidua* Mill. subsp. *decidua*) oraz modrzew europejski polski (*Larix decidua* Mill. subsp. *polonica* (Racib.) Domin). Obydwa podgatunki mają łącznie osiem odmian (np. modrzew europejski 'Kórnik', modrzew europejski 'Jan' i in.). Modrzew osiąga wysokość przeciętnie 30-40 m, a pierśnicę 80-100 m. Kończy cykl wzrostowy w wieku 60-120 lat, dojrzałość rębną osiąga w wieku 80 lat, żyje przeciętnie 600 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – modrzew, modrzew europejski; niemieckie – europäische Lärche; angielskie – European larch.

Gatunki podobne: modrzew syberyjski (*Larix sibirica* Ledeb.), modrzew japoński (*Larix leptolepis* (Siebold & Zucc.) Endl.), modrzew dahurski (*Larix gmelinii* Rupr.), modrzew amerykański (*Larix laricina* K. Koch).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-20). Drewno ma równe słoje z szeroką strefą drewna późnego. Biel (wąski, żółtawobiały) wyraźnie odcina się od twardzieli (czerwonobrazowa). Przewody żywiczne wąskie i nieliczne.



Rys. 2-20. Przekroje drewna modrzewia europejskiego, skala 1:1: a – w płaszczyźnie stycznej (XY), b – w płaszczyźnie poprzecznej (XZ)

- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno żywiczne wytrzymałe mechanicznie, łupliwe i trudne w obróbce (skłonne do pękania); *drewno to*

należy do najtwardszych i najtrwalszych drewn iglastych; nie podlega toczeniu przez robaki (WRÓBLEWSKI i DE MEZER 1948, s. 51)⁶⁷.

- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.

Historycznie: szkutnictwo (maszty), łuki, wały napędowe w młynach i wiatrakach, kadzie i urządzenia w przemyśle chemicznym, beczki.

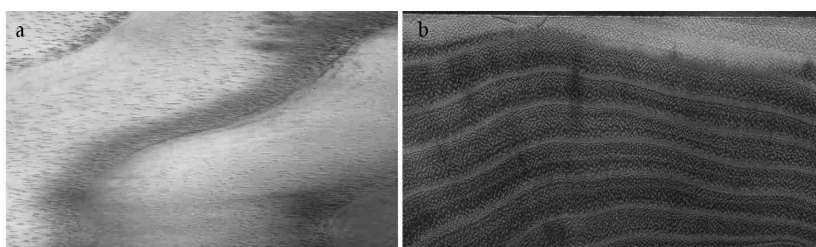
Współcześnie: jachty, łuki.

Robinia akacjowa (*Robinia pseudacacia* L.) to gatunek północnoamerykański introdukowany w Europie w 1630 roku. Robinia osiąga wysokość 25-30 m, a pierśnicę do 1,2 m. Kończy cykl wzrostowy w wieku 30-40 lat, dojrzałość rębną osiąga w wieku 80 lat, żyje przeciętnie 100 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – robinia, robinia akacjowa, robinia grochodrzew, grochodrzew, robinia akacja, akacja, akacja biała, grochowiec; niemieckie – gewöhnliche Robinie, Robinie, falsche Akazie, Akazie, Scheinakazie, Silberregen; angielskie – black locust, false acacia, robinia.

Gatunki podobne: robinia lepka (*Robinia viscosa* Vent.), robinia bujna (*Robinia luxurians* C.K. Schneid.).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-21). Biel (wąski i żółtawy) i twardziel (zielonożółta o matowym połysku, szybko ciemniejąca do barwy złotobrazowej) nie są ostro odgraniczone. Drewno jest zwykle prostowłókniste o strukturze średniodrobnej z ostro zaznaczonym kontrastem pomiędzy porowatą strefą drewna wczesnego a spoistą strefą drewna późnego.
- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno elastyczne i jednocześnie wytrzymałe mechanicznie. *Drewno akacjowe [...] jest ciężkie [...], a zarazem*



Rys. 2-21. Przekroje drewna robinii akacjowej, skala 1:1: a – w płaszczyźnie stycznej (XY), b – w płaszczyźnie poprzecznej (XZ)

⁶⁷ Modrzew zaś, [...], ze względu na ostrą gorycz swego soku zabezpieczony jest przed próchnicą i działaniem robaków (WITRUWIUSZ 27-13 p.n.e. – Liber II, Capitulum 9). [Modrzew] w suchu trwa wiekami, robak się go nie chwytła [...] (BURGSDORF 1810, t. 1, s. 209).

więcej giętkie od dębowego, bardzo wytrzymałe, gdyż dłużej opiera się rozbiciu niż dąb, ciągle i nietatwe do obróbki (PADECHOWICZ 1929, s. 34). Należy do drewna nasiąkliwego [...] przyjmuje łatwo zaprawy (STIEBER 1922, s. 37).

- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.

Historycznie: W użyciu u kołodziei, mniej u tokarzy i stolarzy, w budowie okrętów oddaje znaczne usługi (STIEBER 1922, s. 37); skutnictwo (przede wszystkim na maszty).

Współcześnie: sprzęt sportowy.

Sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.) należy do rodziny sosnowatych (*Pinaceae*) obejmującej ponad 100 gatunków drzew i krzewów. Sosna jest szeroko rozprzestrzenionym gatunkiem w całej Europie, zwłaszcza w północnej i północno-wschodniej jej części aż do Syberii i Azji. W Polsce jest najczęściej spotykanym gatunkiem (stanowi około 65% drzewostanu – RAPORT O STANIE LASÓW... 2007). W XIV wieku trzy drzewa sosnowe były warte tyle co jedno dębowe⁶⁸. Znaczna różnorodność środowisk, w jakich występuje sosna, sprzyja powstawaniu licznych jej odmian. Najważniejsze to: (1) *Pinus sylvestris* var. *scotica* Schott – sosna zwyczajna ‘Szkocka’, (2) *Pinus sylvestris* var. *lapponica* Hartm. – sosna zwyczajna ‘Lapońska’, (Norwegia, Szwecja, Finlandia), (3) *Pinus sylvestris* var. *engadinensis* Hegi – sosna zwyczajna ‘Alpejska’ (Tyrol, Alpy Engadyńskie), (4) *Pinus sylvestris* var. *rigensis* Asch. – sosna zwyczajna ‘Litewska’ (południowa i wschodnia Skandynawia, Litwa), (5) *Pinus sylvestris* var. *turfosa* Willk. – sosna zwyczajna ‘Torfowa’ (południowo-zachodnie Niemcy, Dania, północna Skandynawia, północna Azja).

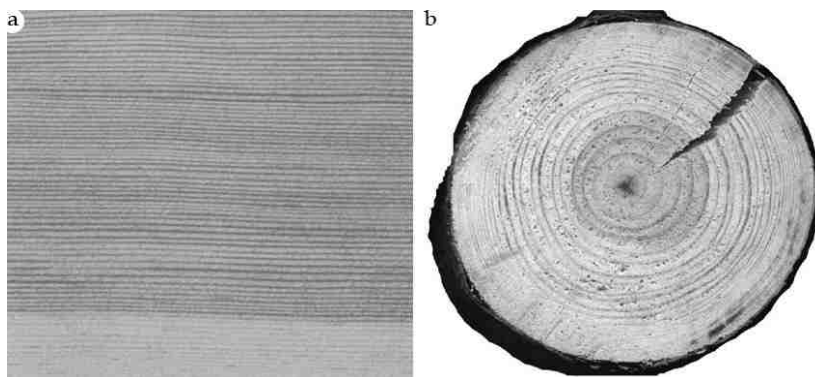
Sosna zwyczajna osiąga przeciętną wysokość 25-30 m (maksymalnie 40-48 m) i pierśnicę do 1,5 m. Okres przyspieszonego wzrostu sosny występuje między 15. a 25. rokiem życia, około 50. roku przyrost słabnie, a w wieku 100-120 lat zupełnie ustaje. Dojrzałość rębna sosna osiąga w wieku 80 lat. Żyje przeciętnie 300-350 lat (maksymalnie do 500 lat).

Nazwy handlowe i regionalne sosny zwyczajnej: polskie – sosna, sosna zwyczajna, sosna pospolita, sośnina; niemieckie – Kiefern, gemeine Kiefer, Waldkiefer, Rotföhre, Forche, Forlen, Föhren; angielskie – pine, Scots pine, Riga pine, Norway pine, Mongolian pine dla var. *mongolica* (nazwy historyczne: Scots fir, Scotch fir).

⁶⁸ W Statucie wiślickim, w paragrafie 150, napisano: *mają być karani [karą grzywny siedemnadzieścia] ci, którzy porąbiają trzy sosny* – jest to taki sam wymiar kary, jak za ścięcie dębu (vide przypis 63 na s. 64).

Gatunki podobne występujące w Polsce: sosna limba (syn. limba) (*Pinus cembra* L.), sosna kosa (syn. kosodrzewina, kosodrzew) (*Pinus mugo* Turra, syn. *Pinus mughus* Scop., *Pinus pumilio* Haenke), sosna wejmutka (*Pinus strobus* L.), sosna błotna (*Pinus × rhaetica* Brügger)⁶⁹.

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-22). Drewno ma szeroki jasnożółty biel i czerwobrunatną twardziel. Największy udział bielu mają tzw. sosna bielasta (najbardziej ceniona w przemyśle sklejkowym) oraz sosna czarna – 2/3 promienia pnia. Udział drewna twardzielowego o zabarwieniu czerwobrunatnym, będącym wynikiem wysokiej zawartości związków żywicznych, zwiększa się wraz z wiekiem drzewa. Przykładowo drewno 85-letniej sosny wejmutki (*Pinus strobus* L.) może zawierać nawet około 85% twardzieli. Twardziel po ścięciu drzewa ulega ciemnieniu na skutek utleniania się związków twardzielowych. Na przekroju promieniowym promienie rdzeniowe widoczne są pod lupą. Sloje roczne są wyraźne. Zawartość żywicy, odgrywającej rolę ochronnego czynnika antyseptycznego, w bielu sosnowym może dochodzić od 4,0% do 5,25% w odniesieniu do suchej masy drewna. Struktura drewna sosny pospolitej jest zwykle prostowłóknista, na niektórych siedliskach krętowłóknista.
- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno jest stosunkowo łatwe w obróbce, sprężyste, o dobrej wytrzymałości mechanicznej. Biorąc pod uwagę



Rys. 2-22. Przekroje drewna sosny zwyczajnej, skala 1:4: a – w płaszczyźnie stycznej (XY), b – w płaszczyźnie poprzecznej (XZ)

⁶⁹ Takson słabo ustabilizowany pochodzenia mieszańcowego *Pinus mugo* Turra × *Pinus sylvestris* L. (STASZKIEWICZ 1993).

wytrzymałość na rozłupanie, drewno sosnowe jest porównywalne z drewnem dębowym i bukowym – gatunek ten zalicza się do grupy drewna o dużej łupliwości. Wadą są liczne sęki, często przesycone żywicą, co utrudnia obróbkę i zmniejsza wytrzymałość na zginanie statyczne (np. w przypadku drewna sosnowego z sękiem wytrzymałość ulega zmniejszeniu o 35% w stosunku do drewna bezsęcznego) oraz rozciąganie i ściskanie podłużne. Duży udział żywicy w drewnie niektórych drzew zwiększa trwałość, równocześnie jednak utrudnia jego obróbkę.

- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.

Historycznie: maszty okrętowe, wały napędowe we młynach, skrzydła wiatraków, obudowy maszyn młynarskich, sklejka lotnicza, elementy nośne konstrukcji szkieletowych samolotów, skrzynie wagonów kolejowych, obudowy maszyn rolniczych, pokłady statków.

Współcześnie: sklejka stosowana na ramy rowerów, sprzęt sportowy, w budownictwie okrętowym i jachtowym, w modelarstwie, zabawki, obudowy instrumentów muzycznych.

Świerk pospolity (*Picea abies* (L.) H. Karst., syn. *Picea excelsa* (Lam. & DC.) Link) – rodzaj wiecznie zielonych drzew z rodziny sosnowatych (*Pinaceae*), który obejmuje około 35 gatunków. Występuje na obszarach chłodnych i umiarkowanych półkuli północnej.

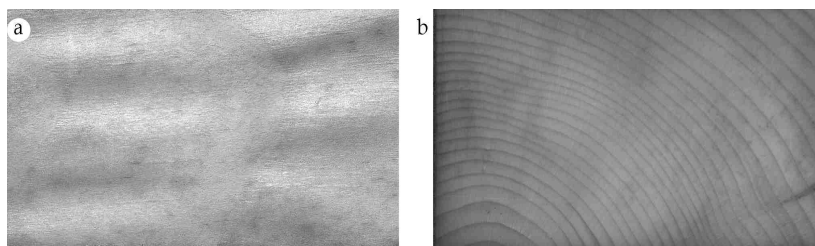
Świerk jest najwyższym drzewem europejskim, osiąga wysokość nawet do 50 m i pierśnicę 1,5-2,0 m. W młodości rośnie wolno; okres przyspieszonego wzrostu następuje między 30. a 50. rokiem życia, z wiekiem szybkość wzrostu się zmniejsza, jednak utrzymuje się do końca życia. Dojrzałość rębną osiąga w wieku 80 lat, żyje przeciętnie 250 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – świerk, świerk pospolity (nazwa historyczna: smrek); niemieckie – gemeine Fichte, Rottanne (nazwy historyczne: Kamm-, Bürsten-, Plattenfichte); angielskie – spruce, Norway spruce, white spruce⁷⁰.

Gatunki podobne: występujące w Polsce (wszystkie są uprawiane) – świerk Engelmana (*Picea engelmannii* W. Parry ex Engelm.), świerk biały (*Picea glauca* (Moench) Voss), świerk serbski (*Picea omorica* (Pančić) Purkyně), świerk wschodni (*Picea orientalis* Link), świerk kłujący (*Picea pungens* Engelm.), świerk sitkajski (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière); inne – świerk syberyjski (*Picea obovata*, syn. *Picea abies* subsp. *obovata*).

⁷⁰ Wspólna nazwa ze świerkiem białym (*Picea glauca* (Moench) Voss) (GERMPLASM RESOURCES... 2008).

- **CECHY MAKROSKOPOWE** (rys. 2-23). Drewno barwy żółtawej, niekiedy z lekkim odcieniem czerwonym, lekko błyszczące. Warstwy drewna późnego są, podobnie jak u wszystkich iglastych, wyraźnie ciemniejsze od warstw drewna wczesnego, jednak różnice w drewnie świerkowym są mniej ostre niż u sosny pospolitej, a tym samym granice pomiędzy poszczególnymi słojami są również o wiele mniej wyraźne. Kierunek włókien jest przeważnie prosty, częściowo występują mniejsze lub większe spirale (skręt włókien). Charakterystyczną cechą jest skłonność do tworzenia się pęcherzy żywicznych. Drewno świerkowe ustępuje nieco drewnu jodłowemu: [...] *świerczyzna to wszystko użytkowe i opałowe dostarcza drzewo, iakiego iedlina dostarcza; oprócz że świerkowe ieft w swej własności podleyfzym* (BURGDORF 1810, t. 2, s. 380).



Rys. 2-23. Przekroje drewna świerku, skala 1:1: a - w płaszczyźnie stycznej (XY), b - w płaszczyźnie poprzecznej (XZ)

- **CECHY TECHNOLOGICZNE.** Drewno na ogół lekkie i miękkie, łatwo łupliwe, jednak pochodzące z drzew rosnących w górach bywa często bardzo twarde i trudne w obróbce - obróbkę skrawaniem utrudniają liczne, twarde sęki. Do obróbki gięciem nadaje się tylko drewno młode. Drewno świerkowe jest mało kurczliwe, daje się suszyć szybko, lecz w trakcie suszenia łatwo pęka. Cechą bardzo cenioną tego drewna są właściwości ostrzegawcze - trzeszczy ono przed zawaleniem się konstrukcji (ważne przy drewnie kopalniakowym).
- **WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.**
Historycznie: lotnictwo, konstrukcje szkieletowe samolotów⁷¹, wagony, szkutnictwo (zwłaszcza maszty), duże modele odlewnicze.

⁷¹ Samoloty braci Wright miały skrzydła w postaci kratownicy świerkowej pokrytej płótnem. Płaty dwupłatowca były stężone stalowymi linkami.

Współcześnie: lutnictwo (pudła oraz płyty rezonansowe gitar, mandolin, wiolonczel itp., płyty rezonansowe w pianinach), klawisze fortepianowe.

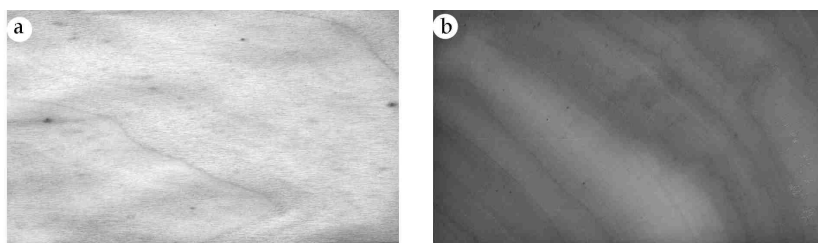
Topola biała (*Populus alba* L., syn. białodrzew) – gatunek drzew z rodziny wierzbowatych (*Salicaceae*). W Polsce występują trzy rodzime gatunki topoli: topola biała, topola czarna (*Populus nigra* L., syn. topola nadwiślańska, sokora), topola osika (*Populus tremula* L.)⁷² oraz naturalny mieszaniec topoli białej i topoli osiki – topola szara (*Populus ×canescens* (Aiton) Sm., syn. *Populus alba* L. × *Populus tremula* L.). Spośród topól tylko topola osika jest typowym gatunkiem leśnym, reszta występuje na ogół poza granicami lasów.

Topola osiąga wysokość 30-35 m (maksymalnie 40 m) i pierśnicę 2 m (maksymalnie 3 m). Rośnie szybko: w wieku 20-30 lat osiąga 25-30 m wysokości i 50-70 cm w pierśnicy. Dojrzałość rębną osiąga w wieku 30 lat, żyje przeciętnie 200-300 lat.

Nazwy handlowe i regionalne: polskie – topola, topola biała, białodrzew; niemieckie – Silberpappel, Weißpappel; angielskie – white poplar.

Gatunki podobne uprawiane w Polsce: topola balsamiczna (*Populus balsamifera* L.), topola amerykańska (czarna topola amerykańska) (*Populus deltoides* Marshall), topola kandyjska (*Populus ×canadensis* Moench, syn. *Populus serotina* R. Hartig), topola wirginijska (*Populus virginiana* Foug.).

- CECHY MAKROSKOPOWE (rys. 2-24). Biały biel i żółtawa twardziel; barwa całego przekroju jest jednolita z lekkim odcieniem szarawym



Rys. 2-24. Przekroje drewna topoli białej, skala 1:1: a – w płaszczyźnie stycznej (XY), b – w płaszczyźnie poprzecznej (XZ)

⁷² Strzedz się potrzeba ofikom dać zestarzeć się, gdyż po swym doizdreniu [dojrzeniu] zaraz niższeią, a gdy cokolwiek pruchnieć zaczną do niczego niezdatne (BURGSDORF 1810, t. 1, s. 112).

w partiach centralnych; drewno jednorodne, praktycznie nie można wyróżnić podziału na drewno wczesne i późne oraz słoje rocznych i naczyń, drewno drobnowłókniste. Zawiera plamki rdzeniowe.

- CECHY TECHNOLOGICZNE. Drewno miękkie, lekkie, łupliwe, łatwe w obróbce mechanicznej, nie jest skłonne do paczenia się, ma niewielką kurczliwość i niewielką skłonność do pęknięć desorpcyjnych. Nadaje się do gięcia na gorąco. Nieimpregnowane drewno topolowe zastosowane w budowlach pracujących w zmiennych warunkach wilgotnościowych jest dość odporne na grzyby i owady.

- WYKORZYSTANIE W BUDOWIE MASZYN.

Historycznie: deseczki do rozpalania ognia⁷³, klepki beczek, skrzynie ładunkowe wozów konnych, łyżki, rysownice. *W pułnocnej Azji są kraje gdzie prawie innego budowniczego drzewa nie znają, iak topole, i nawet używają go do budowy okrętów niedługiej trwałości* (BURGSDORF 1810, t. 1, s. 108).

Współcześnie: ołówki, korpusy instrumentów muzycznych (gitar elektrycznych, bębnow), galanteria drzewna (szczególnie drewno odziomkowe).

2.2.9. Kilka uwag o drewnie gatunków tropikalnych

Drewno tropikalne w porównaniu z drewnem ze strefy umiarkowanej ma o wiele bardziej zróżnicowane cechy zewnętrzne (barwę, rysunek, połysk) oraz właściwości fizyczne (gęstość, wytrzymałość, kurczliwość, przewodność cieplną itp.), dlatego jego udział w drewnie stosowanym w technice wzrasta. Drewno tropikalne może mieć zabarwienie od żółtego (drewno satynowe) przez czerwone (pernambuk), fioletowe (drewno amarantowe) do czarnego (heban). Dodatkowo bardzo trudno dobrać jednolity kolor drewna jednego gatunku zakupionego w różnych źródłach lub w różnym czasie (pochodzącego z różnych transportów).

Klejenie drewna tropikalnego wymaga użycia specjalnych klejów – kleje do drewna europejskiego mogą się nie nadawać do tego celu. Niektóre gatunki tropikalne wymagają też specjalnych, przeznaczonych tylko dla nich środków impregnujących i konserwujących.

⁷³ Późnopaleolityczna metoda rozpalania ognia polegała na wykonywaniu oscylacyjnych ruchów twardym wiertnikiem w deseczce z otworami.

Drewno tropikalne bardzo twarde bywa nazywane żelaznym (ang. *ironwood*). Żelazne drzewa spotyka się na całym świecie, pod tą nazwą kryje się kilka rodzin i około 80 gatunków. Zdarza się, że dodatkowy, drugi człon nazwy nie usuwa niejednoznaczności, np. *red ironwood*, może oznaczać afrykańskie drewno *Lophira lanceolata* Tiegh. ex Keay (syn. *Lophira alata*) (nazwy handlowe: azobé, bongossi, ekki), karaibskie *Reynosa septentrionalis* Urb., australijskie *Erythrophleum chlorostachys* (F. Muell.) Baill. lub amerykańskie *Exothea paniculata* (Juss.) Radlk. Inne gatunki, które są określane mianem *ironwood*, to m.in.⁷⁴: oliwka wawrzynolistna (ang. *black ironwood*, łac. *Olea capensis* L.), Brazil ironwood (*Caesalpinia ferrea* Mart. ex Tul. var. *leiostachya* Benth.), brezyłka ciernista (ang. *brazilwood*, łac. *Caesalpinia echinata* Lam.), pyinkado (ang. *Burma ironwood*, łac. *Xylia xylocarpa* (Roxb.) W. Theob.), mesua (ang. *Ceylon ironwood*, łac. *Mesua ferrea* L.), cocobolo (ang. *cocobolo rosewood*, łac. *Dalbergia retusa* Hemsl.), desert ironwood (*Olneya tesota* A. Gray) (FUJIWARA i IN. 1998, RICHTER i DALLWITZ 2006).

W Polsce również spotyka się rośliny zaliczane do żelaznych. Są to gatunki introdukowane z różnych stron świata, uprawiane u nas jako rośliny ozdobne: północnoamerykański grab karoliński (*Carpinus caroliniana* Walter), wiązowiec zachodni (*Celtis occidentalis* L.) i chmielgrab wirginijski (*Ostrya virginiana* (Mill.) K. Koch).

W nazewnictwie gatunków drewna tropikalnego stosowanym w Polsce panuje duża niekonsekwencja, spowodowana brakiem polskich nazw większości sprowadzanych gatunków. Firmy sprowadzające drewno stosują lokalne nazwy obowiązujące w kraju, w którym je zakupiono, lub często niejednoznaczne nazwy angielskojęzyczne. Zdarza się, że drewno jakiegoś gatunku u innego importera występuje pod zupełnie inną nazwą (np. drewno rodzaju *Anisoptera* Korth⁷⁵ jest sprowadzane z Indonezji jako mersawa, a z Tajlandii jako krabak).

Bywa także, że drewno o podobnej strukturze jest nazywane jednako w handlowej nomenklaturze angielskojęzycznej. Mianem *teak*, zwyczajowo zarezerwowanym dla drewna teczyny wyniosłej (*Tectona*

⁷⁴ Nie wszystkie mają polską nazwę.

⁷⁵ Dostępna literatura podaje, że znanych jest około 10 gatunków rodzaju botanicznego *Anisoptera* (ich drewno praktycznie się nie różni) występujących pod nazwą *krabak* i około 15, również tego samego rodzaju botanicznego, występujących pod nazwą *mersawa*. Lokalne nazwy *krabak* i *mersawa* bywają niekiedy stosowane zamiennie do nazwania drewna tego samego gatunku.

grandis), może być nazwane drewno: (1) bankirai (ang. *Borneo teak*, łac. *Shorea* spp.), (2) afromozji (ang. *Afro-teak*, łac. *Pericopsis eleate*), (3) freijo (ang. *Brazilian teak*, łac. *Cordia goeldiana*), (4) iroko (ang. *African teak*, łac. *Chlorophora excelsa*), (5) keruingu (ang. *yang teak*, łac. *Dipterocarpus cornutus*). Pomimo wspólnej nazwy handlowej są to różne gatunki drzew. Podobnie jest z mahoniem: pod nazwą mahoń bywają klasyfikowane gatunki drewna o strukturze podobnej do mahoniu. W przekroju promieniowym charakteryzują się one pasiastym wyglądem, mienia się w zależności od kąta padania światła; barwy mogą być różne: jasno- i ciemnożółte, pomarańczowe, czerwone, czerwono-brązowe, a nawet czarne. Nieporządek terminologiczny powoduje, że niektóre firmy dostarczają inne gatunki drewna (zdarza się, że gorsze) niż w złożonym zamówieniu i tak mahoń, który powinien pochodzić z mahoniowców (*Swietenia* spp.), bywa fałszowany tzw. *zamahoniem*, czyli gruszą afrykańską (*Tieghemella heckelii* Pierre ex A. Chev.) lub acajou (*Khaya grandifoliola* C. DC.), a także eukaliptusami (*Eucalyptus* spp.) i niektórymi gatunkami meranti (*Shorea* spp.), ponieważ jest zagrożony wyginięciem, coraz trudniej osiągalny i coraz droższy. Trzy gatunki mahoniowców (*Swietenia humilis* Zucc., *Swietenia mahagoni* (L.) Jacq., *Swietenia macrophylla* King) oraz wszystkie gatunki gwajakowca (*Guaiacum* spp.) zostały zaliczone do II kategorii ochrony. Kategoria ta obejmuje ścisłą kontrolę ich eksportu. W Brazylii wprowadzono także okres zakazu pozyskiwania jednego z gatunków mahoniowców (*Swietenia macrophylla* King).

Wiele kontrowersji dotyczących nazewnictwa gatunków drewna wyjaśnia polska norma PN-EN 13556:2005 *Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia stosowana w handlu drewnem w Europie*.

2.2.10. Tworzywa drewnopochodne w budowie maszyn

Podstawowym składnikiem materiałów drewnopochodnych jest przetworzone mechanicznie i chemicznie drewno (w postaci mniej lub bardziej rozdrobnionej):

- desek i listew (np. drewno klejone warstwowo – *glulam*, płyty z drewna litego jednowarstwowe i wielowarstwowe: pełne lub pustakowe,
- fornirów (np. sklejka, drewno prasowane warstwowo z tworzywami sztucznymi – LVL),

- wełny drzewnej, tzw. *woliny*⁷⁶ (płyty budowlane, np. *suprema*⁷⁷, materiał wypełniający opakowania, płyty dźwiękoizolacyjne),
- wiórów i mikrowiórów (np. płyty wiórowe⁷⁸, WPC⁷⁹),
- przetworzonych włókien drzewnych (np. płyty MDF⁸⁰, płyty gipsowo-kartonowe⁸¹).

Z punktu widzenia współczesnego zastosowania w budowie maszyn najważniejszymi tworzywami drewnopochodnymi są: (1) drewno lite nasycane i prasowane z tworzywami sztucznymi⁸², (2) forniry prasowane warstwowo z tworzywami sztucznymi⁸³, (3) sklejka.

Mechaniczne właściwości drewna – polimeru naturalnego – są znacznie gorsze niż właściwości jego składnika strukturalnego, jakim jest celuloza, występująca w drewnie w formie trwałej kapilarno-porowatej włóknistej struktury. Te wady drewna w XIX wieku starano się elimino-

⁷⁶ *Wolina* (wełna drzewna), stosowana współcześnie w formie płyt budowlanych, jeszcze w XIX wieku służyła do wielu nietypowych zastosowań. Wypychano nią materace, poduszki, sienniki; po barwieniu była stosowana na maty oraz oploty dywanów. Produkowano z niej także sznury o średnicy od 10 do 60 mm używane do: wytwarzania rdzeni do piaskowych form odlewniczych, owijania butelek z winem, jako części maszyn i mebli. Barwione sznury z wełny drzewnej, rozpięte w postaci girland, mogły być elementem wystroju XIX-wiecznych sal balowych. Wełny drzewnej używano też jako wkład do filtrów do oczyszczania wody lub klarowania piwa i octu. W postaci wacików była także materiałem opatrunkowym w ówczesnych szpitalach i lazaretach (KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2007 a).

⁷⁷ *Suprema* – płyta wykonana z cienkich i długich wiórów drzewnych (specjalnie skrawanych) spojonych pod ciśnieniem.

⁷⁸ Sprasowane cząstki drewniane (wióry) oraz substancje wiążące (syntetyczne żywice melaminowe, rzadziej żywice: mocznikowa, fenolowa lub izocyjanianowa) oraz utwardzacz (formaldehyd).

⁷⁹ WPC (ang. *Wood-Plastic Composite*) – sprasowana mieszanka drzewnych zmielonych odpadów produkcyjnych (wiórów, większych fragmentów drewna tartaczego i pyłu drzewnego) z tworzywem sztucznym (np. HDPE, PCW, PP, ABS, PS, PLA); najczęściej w proporcji 1:1. W pewnych zastosowaniach do WPC dodaje się barwniki, stabilizatory i elementy wzmacniające. Tworzywo jest odporne na wilgoć i biokorozję.

⁸⁰ Płyty pilśniowe o średniej gęstości (ang. *Medium Density Fiberboard*) – włókna drzewne spilśnione z użyciem pary wodnej i następnie sprasowane. Czynnikiem wiążącym jest lignina zawarta w drewnie, możliwe są opcjonalne dodatki spajające i wypełniające: żywice syntetyczne, słoma zbożowa, juta.

⁸¹ Płyty wykonane ze sprasowanej makulatury z dodatkiem kleju.

⁸² Nazwy handlowe: *lignoston*[®], *lignostone*[®] (łac. *lignum* – drewno + ang. *stone* – kamień), *permali*[®].

⁸³ Ang. *Laminated Veneer Lumber* (LVL), nazwy handlowe: *lignofol*[®], *delignit*[®], *panzerholz*[®], *pagholz*[®], *obo-festholz*[®], *lignaco*[®].

wać np. przez ścieśnianie struktury (prasowanie) lub nasycanie różnymi substancjami modyfikującymi w drodze zapelniania porów drewna i międzymolekularnych przestrzeni ścian komórkowych. Te ostatnie metody zmieniają wartości parametrów wytrzymałościowych drewna w pożądanym kierunku, nie powodując niszczenia jego naturalnej struktury.

Drewno lite prasowane z tworzywami sztucznymi (np. *lignoston*) jest wytwarzane przez prasowanie w podwyższonej temperaturze z dodatkiem tworzyw sztucznych⁸⁴, zwykle pod ciśnieniem 30 MPa i w temperaturze 130°C. Technologię jego produkcji opracowano w latach dwudziestych XX wieku. Właściwości fizyczne lignostonu zależą od:

- gatunku drewna,
- ciśnienia i temperatury prasowania,
- rodzaju dodatków.

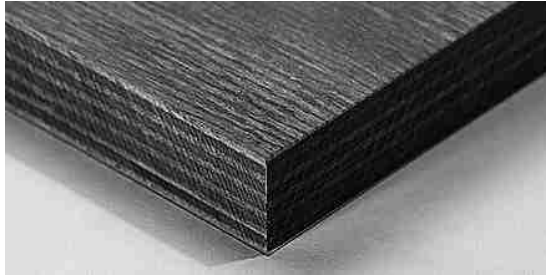
W trakcie prasowania drewno może być jednocześnie nasycane żywicami syntetycznymi, metalami o niskiej temperaturze topnienia, olejami itp. W wyniku tych zabiegów otrzymuje się materiał o gęstości dochodzącej do 1500 kg/m³ i wytrzymałości na rozciąganie (R_m) wzdłuż włókien do 330 MPa (właściwości wytrzymałościowe są lepsze od lignofolu; przykładowo R_m wzdłuż włókien dla wierzby jest równe 100 MPa, a dla jesionu 220 MPa).

Najlepszy efekt daje zastosowanie drewna gatunków liściastych rozprzechłonaczyniowych, ze względu na ich najlepszą zdolność do wchłaniania impregnatów. Najlepsze wartości parametrów mechanicznych uzyskuje się w przypadku drewna buku (s. 61).

Drewno prasowane warstwowo z tworzywami sztucznymi (np. *lignofol*, rys. 2-25), w odróżnieniu od lignostonu, składa się z fornirów, jest jednak formowane tak samo jak drewno lite prasowane z tworzywami sztucznymi. Jego parametry fizyczne zależą od:

- kierunku włókien w poszczególnych warstwach fornirów,

⁸⁴ Na rynkach zagranicznych i handlach, zajmujących się sprzedażą wyrobów z drewna, ukazał się nowy produkt pod nazwą „lignostonu”. Materiał ten otrzymuje się z drzew liściastych, które włożone w odpowiedni przyrząd w rodzaju prasy, przy równoczesnym zastosowaniu wysokiej temperatury, zmniejszają do połowy swą objętość. Wskutek tego drewno staje się zupełnie zbite, prawie nie porowate i nie łupliwe, a jego ciężar gatunkowy wynosi 1,42. Produkt ten wyrobiony jest w dwu gatunkach, a mianowicie w naturalnym i barwionym kolorze, a można go zupełnie, jak drewno obrabiać i politurować. Nowemu temu tworzywu otwiera się szerokie pole zastosowania w miejsce dotychczas używanego drzewa bukszpanowego. Dziś z lignostonu wyrabiają klamki, gałki do szuflad, rączki do pisania, oprawy do brzytw, noży i widelcy, tudzież fajki, rękojeści do lasek, parasoli i pieczętek, oraz wiele innych rzeczy (PADECHOWICZ 1929, s. 94).



Rys. 2-25. Drewno prasowane warstwowo z tworzywami sztucznymi (*lignofol*)

- użytego gatunku (lub gatunków) drewna,
- ciśnienia i temperatury prasowania,
- rodzaju dodatków.

Lignofol, przy gęstości $1000-1200 \text{ kg/m}^3$, jest blisko czterokrotnie twardszy od litego drewna i maksymalnie dwuipółkrotnie bardziej wytrzymały na rozciąganie (jego R_m wynosi $200-250 \text{ MPa}$).

Lignofol występuje w czterech formach (klasach): A - forniry laminowane wzdłużnie, A_w - forniry laminowane wzdłużnie, jednak co kilka arkuszy o wzdłużnym układzie włókien znajduje się arkusz poprzeczny, B - laminowane krzyżowo oraz C - laminowane gwiazdźście (orientacja włókien w każdej kolejnej warstwie - pod kątem 45° w stosunku do włókien w warstwie poprzedzającej). Wytwarza się go z fornirów gatunków liściastych (najczęściej z drewna bukowego, brzożowego lub bukowo-brzożowego o grubości $0,8, 0,6$ lub $0,5 \text{ mm}$) z udziałem żywic sztucznych (najczęściej utwardzalnej żywicy fenolowej) (MILEWSKI 1970, SAECHTLING 1999). Stosuje się co najmniej pięć warstw forniru na 10 mm grubości wyrobu. Zawartość żywicy w drewnie prasowanym może wynosić $7-35\%$ w zależności od tego, czy warstwy forniru są tylko sklezione żywicą, czy również zaimpregnowane (prasowane w warunkach podciśnienia - nasączone żywicą, która przenika do struktury komórkowej drewna). W fazie prasowania pod ciśnieniem $30-40 \text{ MPa}$ w temperaturze $70-160^\circ\text{C}$ następuje utwardzenie żywicy w strukturze drewna. Dzięki temu otrzymany materiał ma znacznie lepsze właściwości wytrzymałościowe niż drewno wyjściowe. Postacią handlową są płyty i kształtki o grubości $4-180 \text{ mm}$, w których warstwy forniru są ułożone równoległe, krzyżowo lub gwiazdźście. Drewno prasowane warstwowo z tworzywami sztucznymi klasy A ma lepsze właściwości mechaniczne niż drewno klasy B. Wynika to

z faktu, że w procesie prasowania krzyżowa orientacja włókien w poszczególnych fornirach uniemożliwia tak gęste ich upakowanie, jak to ma miejsce w przypadku układu równoległego.

Do specjalnych zastosowań wytwarza się lignofol z dodatkiem oleju maszynowego i grafitu. Uzyskuje się w ten sposób samosmarowność wykonanych z tego materiału panewek łożysk⁸⁵, prowadnic itp. „Pancerne” tworzywo o handlowej nazwie *delignit*[®] jest niepalne i kuloodporne⁸⁶. Po nasyceniu związkami boru drewno prasowane z żywicami sztucznymi jest oferowane jako zabezpieczenie przed promieniowaniem (ma zdolność pochłaniania neutronów), co znajduje zastosowanie w medycynie i wojskowości.

W XX wieku na skutek szybkiego postępu fizyki ciała stałego, inżynierii materiałowej i chemii polimerów powstało i rozwinęło się wiele nowych technologii modyfikacji drewna tworzywami sztucznymi. Żywice syntetyczne i monomery są wprowadzane w strukturę drewna w stanie ciekłym, a następnie usieciowywane pod wpływem działania ciepła, inicjatorów chemicznych, promieniowania jonizującego lub energii elektromagnetycznej pól o wysokiej częstotliwości.

Drewno prasowane, szczególnie prasowane warstwowo, znalazło liczne zastosowania w przemyśle maszynowym. Jeszcze w latach siedemdziesiątych XX wieku wytwarzano z niego: wodzidła, listwy prowadzące, sprężyny, podwieszki sit, cichobieżne koła zębate, sprzęgła cierne, pierścienie uszczelniające pomp wodnych, panewki łożysk (szczególnie okrętowych, ale nie tylko), koła pasowe, obudowy maszyn, przekładki dystansowe pił trakowych, blaty obrabiarek, rolki przenośników przemysłowych, części maszyn włókienniczych (czołenka tkackie, wrzeciona, szpule, bijaki, gońce, wały foluszowe), części transformatorów (uchwyty izolujące, wsporniki, izolatory, podkładki izolujące pod szyny, płyty izolujące), śruby, nakrętki, podkładki, trzonki narzędzi, części modeli odlewniczych i wiele innych (PARCZEWSKI i IN. 1969, BARANOWSKI 1986).

Współczesne zastosowanie tworzyw drzewnych, w tym jako materiał łożyskowy, opisano na s. 311 i dalszych.

Sklejka jest jednym z najstarszych tworzyw drewnopochodnych. Jest to materiał powstający przez sklejanie pewnej liczby⁸⁷ cienkich arkuszy drewna (tzw. *fornirów*) zazwyczaj w taki sposób, że w każdej kolejnej

⁸⁵ Współczesne zastosowanie lignofolu do budowy łożysk opisano na s. 330-332.

⁸⁶ Właściwości kuloodporne lignofolu opisano na s. 328-329.

⁸⁷ W zdecydowanej większości przypadków jest to liczba nieparzysta.

warstwie przebieg włókien (kierunek wzdłużny na rys. 2-8 a, s. 33) jest prostopadły do kierunku włókien w warstwie poprzedzającej. Dopiero taki układ zestawu, z którego po sprasowaniu w prasie w wysokiej temperaturze powstanie płyta sklejki, pozwala uzyskać właściwości ortotropowe. Przykłady sklejki w arkuszach oraz tzw. *kształtek sklejkowych* przedstawiono na rysunku 2-26.



Rys. 2-26. Sklejka – płyty i kształtki

Do sklejanego warstw stosuje się kleje na bazie żywic syntetycznych (mocznikowe, melaminowe, fenolowe, rezorcynowe). Żywice stosowane do klejenia fornirów tworzących sklejkę są bardziej wytrzymałe niż drewno. W porównaniu z drewnem litym sklejka jest bardziej stabilna wymiarowo. Wystawiona na działanie wilgoci jest nawet do siedmiu razy bardziej odporna na pęcznienie niż inne materiały drewnopochodne. Ponadto sklejka powraca do swoich pierwotnych wymiarów po wyschnięciu. Charakteryzuje się bardzo dużą udarnością i zachowuje tę właściwość nawet, gdy jest mokra. Jej wytrzymałość mechaniczna jest większa od wytrzymałości drewna, z którego jest zrobiona.

Z reguły arkusz sklejki jest zbudowany z fornirów z różnych gatunków drewna (np. sosna–olsza lub brzoza–sosna). W zależności od rodzaju zastosowanej masy klejowej rozróżnia się sklejki (1) suchotrwałe, (2) wodoodporne z jasną spoiną (półwodoodporne), (3) wodoodporne (tab. 21). Określenia „suchotrwała”, „półwodoodporna” i „wodoodporna” dotyczą tylko i wyłącznie zastosowanych żywic (spoin łączących warstwy fornirów). Same forniry nie są odporne na wodę. Sklejka „wodoodporna” stosowana np. w szklenictwie musi być dodatkowo zaimpregnowana.

Tabela 21

Oznaczenia wodoodporności sklejki według różnych norm

Lp.	Sklejka	PN-EN 636:2005	PN-D-97005.11:1983	BS 1203:2001	DIN 68705-3
1	Suchotrwała, klej na bazie żywicy mocznikowo-formaldehydowej	Do użytkowania w warunkach suchych	Suchotrwała	INT MR	IF 20, BFU 20
2	Wodoodporna (z jasną spoiną), klej na bazie żywicy fenolowo-formaldehydowej	Do użytkowania w warunkach wilgotnych	Półwodoodporna	BR	A 100
3	Wodoodporna, klej na bazie żywicy mocznikowo-melaminowo-formaldehydowej	Do użytkowania w warunkach zewnętrznych	Wodoodporna	WBP	BFU 100 AW 100

2.2.11. Trwałość drewna

Mianem trwałości nazywa się okres, przez jaki drewno stawia opór działaniu czynników rozkładowych i zachowuje swoje właściwości w stopniu pozwalającym na użytkowanie [zgodnie ze stawianymi mu wymogami] (KRZYSIK 1975, s. 290).

Trwałość drewna, czyli czas, w jakim drewno – narażone na czynniki fizyczne (wilgotność, temperatura, oświetlenie), mechaniczne (siły zewnętrzne i wewnętrzne), chemiczne (kwasy i zasady) oraz biologiczne (bakterie, owady, grzyby) – zachowuje swoje właściwości wytrzymałościowe i estetyczne w stanie pozwalającym na jego użytkowanie, zależy od:

- rodzaju i intensywności wspomnianych narażeń,
- gatunku drewna,
- sposobu przygotowania i rodzaju substancji zabezpieczających,
- wieku drzewa, z którego pochodzi drewno,
- gęstości drewna (która może się różnić w obrębie gatunku, a nawet w obrębie tej samej kłody),
- pierwotnego umiejscowienia elementu w rosnącym drzewie (twardziel jest trwalsza od bielu),

- obciążeń mechanicznych,
- czasu ścinki⁸⁸.

Ze względu na trwałość drewno użytkowych rodzajów drzew można sklasyfikować w trzech grupach (KOLLMANN 1951):

- bardzo trwałe, np.: dęby, cisy, modrzewie, cyprysy, robinie, hebanowce, eukaliptusy,
- średnio trwałe, np.: świerki, sosny, jesiony, jodły, buki,
- nietrwałe, np. klony, brzozy, lipy, wierzby, topole, leszczyna.

Drewno o dużej gęstości oraz pochodzące z części twardej, przesyconej zwykle w większym stopniu związkami ekstrakcyjnymi (żywice, olejki eteryczne, garbniki i tłuszcze), jest trwalsze. Najmniej odporna na rozkład jest żywa zawartość komórki (KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2006 a).

W literaturze fachowej można spotkać dużo przeciwstawnych poglądów na temat mechaniki naturalnego starzenia się drewna. Według KOZAKIEWICZA i MATEJAKA (2006 a) w warunkach pomieszczeń zamkniętych, przy niewielkiej wilgotności powietrza:

- drewno ulega stopniowemu utlenianiu prowadzącemu do rozkładu celulozy i ligniny (następuje stopniowe rozluźnienie kompleksu lignino-celulozowego oraz stopniowa depolimeryzacja celulozy),
- wzrasta stopień krystalizacji drewna (powstają nowe wiązania poprzeczne między łańcuchami celulozy, wzrasta udział obszarów krystalicznych).

Bardzo niszcząco na drewno wpływa cykliczna zmienność wilgotności otoczenia. Drewno poza pomieszczeniami zamkniętymi, wystawione na bezpośrednie działanie czynników atmosferycznych ulega rozkładowi w dość krótkim czasie, lecz ma trwałość większą niż drewno stykające się bezpośrednio z glebą. Bardzo dobrym przykładem przyspieszonej korozji drewna w warunkach niestącej wilgotności otoczenia mogą być wkopane w ziemię słupy drewniane, które najszybciej ulegają uszkodzeniom w miejscu zetknięcia z gruntem. Z tego powodu drewniane palowania pod fundamenty budowli zakładano zawsze tylko do wysokości najniższego poziomu wód gruntowych, tak aby drewno było stale pod wodą. Znane są wypadki, że po skanalizowaniu w XIX wieku pewnych obszarów miast, i wskutek tego znacznego obniżenia się na tych terenach

⁸⁸ Uważa się, że drewno drzew ściętych zimą w porównaniu z drewnem drzew ściętych latem: (1) jest bardziej odporne na działanie grzybów, (2) ma mniejszą wilgotność, (3) po wysuszeniu ma taki sam ciężar właściwy, jednak występują w nim głębsze i liczniejsze pęknięcia (zwłaszcza w drewnie liściastym), (4) ma taką samą wytrzymałość mechaniczną.

poziomu wód gruntowych, głowice pali fundamentowych starszych budowli zostały narażone na cykliczne zmiany wilgotności i w bardzo krótkim czasie budowle te ulegały mniejszym lub większym uszkodzeniom (STIEBER 1922).

Utrzymująca się przez dłuższy czas nadmierna wilgotność elementów drewnianych przyczynia się do rozwoju szkodników biologicznych, takich jak grzyby domowe lub grzyby pleśniowe, powodujących stopniową degradację właściwości mechanicznych drewna aż do całkowitego jego zniszczenia (GANOWICZ i GUZENDA 1996). Równie duże straty mogą spowodować owady – techniczne szkodniki drewna. Zniszczenia te dotyczą najczęściej materiału z drewna litego i – z uwagi na znacznie trudniejszą niż przed grzybami ochronę drewna – są liczniejsze od powodowanych przez grzyby. Szkodliwość owadów polega na niszczeniu drewna przez drażnienie w nim chodników larwalnych z otworami wylotowymi na powierzchni, co prowadzi do znacznego zmniejszenia wytrzymałości porażonego drewna (REINFORCING CONCRETE STRUCTURES... 2001).

Niekorzystne zmiany właściwości mechanicznych (np. wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na zginanie, wytrzymałości na rozciąganie, odporności udarowej, twardości) w drewnie ulegającym biokorozji wynikają ze skomplikowanych zmian chemicznych wewnątrz materiału. Te zmiany, łącząc się w związki przyczynowo-skutkowe, w rezultacie dają wielostronne pogorszenie się cech konstrukcyjnych części i podzespołów wykonanych z drewna i z materiałów drewnopochodnych. Zmiany chemiczne mogą być wynikiem rozkładu substancji organicznej drewna w wyniku biokorozji pod wpływem enzymów wydzielanych przez organizmy żywe:

- brunatny rozkład drewna – rozłożeniu na cukry proste, dwutlenek węgla i wodę pod wpływem grzybów ulega celuloza, a nienaruszona pozostaje lignina; drewno brunatnieje, staje się kruche, powstają mikro- i makropęknięcia, efekt rozpadu celulozowej struktury nośnej drewna,
- biały rozkład drewna – rozkładowi ulegają celuloza i lignina⁸⁹,

⁸⁹ Na ogół jest to rozkład niejednolity, w szybszym tempie zniszczeniu ulega lignina. W miejscach początkowych białych plamek tworzą się wydłużone jamki o nieregularnym obrysie, a drewno staje się włókniste. Przy równomiernym rozkładzie celulozy i ligniny drewno początkowo ma białe, nieregularne plamki, staje się miękkie i elastyczne, potem rozpada się na listki równoległe do słoików. W końcowym etapie staje się płatkowate, przypomina płatki ligniny sanitarnej.

- szary rozkład drewna – następuje pod wpływem działania grzybów pleśniowych⁹⁰.

Wskutek biokorozji (rozkładu ligniny i celulozy oraz mechanicznego niszczenia drewna przez owady) maleje w sposób znaczący gęstość drewna, a wzrasta porowatość. Zmiany właściwości mechanicznych wynikające z niszczenia struktury drewna mają charakter niejednorodny (np. najszybciej maleje wytrzymałość na zginanie, a wolniej – wytrzymałość na ściskanie).

W normie PN-ENV 12038:2002 dotyczącej oznaczania trwałości drewna i materiałów drewnopochodnych (odporności na podstawczaki⁹¹) miarą odporności wyrobu z materiału drzewnego jest jak najmniejsza utrata masy próbek wystawionych na atak grzybów. Metoda jest stosowana do niezabezpieczonych (niepokrytych) produktów z tworzyw drzewnych.

Przybliżoną trwałość w latach drewna gatunków drzew europejskich w zależności od warunków otoczenia przedstawia tabela 22. Dane skompilowano z zakresów podawanych przez cytowanych w tytule tabeli autorów. Z tego niepełnego zestawienia można wywnioskować, że bardzo mało wiadomo na temat rzeczywistej trwałości drewna (np. wartości w kolumnie pierwszej różnią się od siebie nawet dziesięciokrotnie). Z tabeli wynika, że niezabezpieczone drewno wystawione na bezpośrednie działanie czynników atmosferycznych może być użytkowane, zależnie od gatunku, przez kilka do kilkunastu lat (drewno na wolnym powietrzu osłonięte dachem – 10-150 lat), natomiast drewno przechowywane w pomieszczeniu w warunkach mniej więcej stałej wilgotności i temperatury może zachować strukturę przez 1000-2000 lat – potwierdzają to znalezione archeologiczne.

O powolności rozkładu drewna przy małej i stabilnej wilgotności świadczą dobry stan elementów z drewna cedrowego znalezionych w komnacie grobowej Tutenchamona, liczących sobie około 3200 lat

⁹⁰ Drewno zaatakowane przez grzyby pleśniowe ma dużą wilgotność, jest miękkie i gąbczaste, zabarwione na kolor brunatnoczarny. Wysychając, pęka wzdłuż i w poprzek na drobne kostki, które odpadają małymi płatkami, co nie pozwala na ustalenie rzeczywistej głębokości porażenia. Rozkład szary nieco przypomina rozkład brunatny, chociaż objawy są mniej wyraźne. Charakterystyczną cechą jest wyraźna granica między warstwą drewna zdrowego i porażonego.

⁹¹ Podstawczaki (*Basidiomycetes*) – klasa grzybów obejmująca około 20 000 gatunków występujących na całym świecie. Wiele z nich tworzy mikoryzę z drzewami leśnymi. W Europie występuje około 4000 gatunków, z czego co najmniej 2650 w Polsce.

Tabela 22

Szacowana trwałość drewna gatunków europejskich (lata) (STIEBER 1922, WRÓBLEWSKI i DE MEZER 1948, ZENKTELER 1971, KRZYSIK 1975, KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2006 a⁹²)

Rodzaj drewna	Na wolnym powietrzu	W suchym pomieszczeniu	W wilgotnym pomieszczeniu	Zanurzone w wodzie
Brzoza	5-40	500	10	< 1
Buk	10-60	200-800	10	20-100
Dąb	40-120	600-1 800	700	100-800
Grab	80	1 000	750	< 1
Jesion	20-95	500	10	30-100
Jodła	10-50	150-1 000	60-70	nietrwale
Klon	10	1 000	10-20	nietrwale
Modrzew	20-95	800-1 800	600	80-700
Olsza	5-40	400	800	100
Osika	3	500	10	nietrwale
Sosna	20-95	700-1 000	500	80-500
Świerk	10-75	100-900	60-70	50-60
Topola	3-35	500	10	< 1
Wiąz	80-100	1 500	1 000	90
Wierzba	5-40	600	20	nietrwale

(KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2006 b). Prawie bez śladów zniszczeń znaleziono również wykonaną z drewna cisowego głowę królowej Teje, żony faraona Amenhotepa III (ok. 1400 rok p.n.e.) W doskonałym stanie zachowało się też drewno cedru libańskiego, który posłużył do wykonania łodzi pogrzebowej faraona Cheopsa (2600 rok p.n.e.) (PUDLIS 2005).

Drewno trwałych gatunków podzwrotnikowych, takich jak *Achras zapota* (syn. *Manilkara zapota*) czy *Caesalpinia platyloba*, przetrwało w stosunkowo dobrym stanie w budowlach Majów. Ornamentyka znalezionych przedmiotów jest doskonale czytelna, mimo że przez blisko 1000 lat pozostawały w warunkach tropikalnych.

⁹² KOZAKIEWICZ i MATEJAK (2006 b) cytują dane Nördlingera z 1860 roku i Vorreitera z 1949 roku.

Mała (poniżej 10%) wilgotność oraz niska (poniżej 0°C) i wysoka (powyżej 40°C) temperatura stosunkowo dobrze zabezpieczają drewno przed biodegradacją. Dużą trwałością odznacza się drewno znajdujące się bez przerwy pod wodą⁹³ lub w wilgotnej ziemi w warunkach beztlenowych⁹⁴. Bardzo dużo informacji na temat trwałości drewna znajduje się na stronie internetowej Canadian Wood Council (www.durable-wood.com).

2.2.12. Wady drewna

Wady struktury drewna pogarszają jego wartość jako materiału do budowy maszyn, a nawet mogą je całkowicie zdyskwalifikować. Zostały one szczegółowo opisane w literaturze i znormalizowane (PN-EN 844-9:2002).

Wady drewna można podzielić na:

- wady kształtu, czyli naturalne odchylenia strzały⁹⁵ zmniejszające jego użyteczność⁹⁶,
- wady budowy anatomicznej i struktury, w tym: (1) sęki (wrosnięte w drewno pnia części gałęzi), (2) pęknięcia (spowodowane zmianami temperatury, szczególnie mrozem, zmianami wilgotności – kurczenie desorpcyjne, działaniem zewnętrznych sił mechanicznych), (3) uszkodzenia mechaniczne – biologiczne spowodowane przez owady lub zwierzęta oraz antropogeniczne (np. obecność ciał obcych, spała żywiczna, zwęglenia itp.), (4) zgnilizna (mursz, czyli chemiczny rozkład ścian komórkowych), (5) zabarwienia, (6) inne⁹⁷.

⁹³ W wodzie słodkiej trwałość drewna jest wyraźnie większa niż w wodzie słonej.

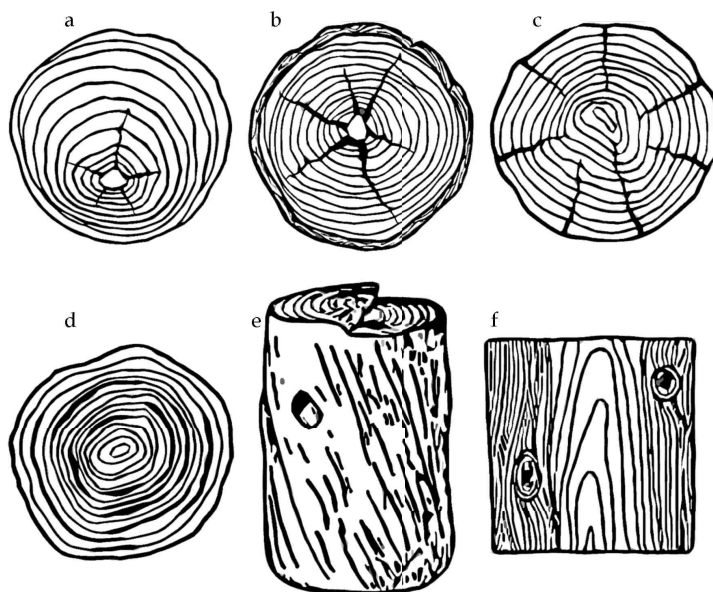
⁹⁴ Drewniane pozostałości osady w Biskupinie przetrwały w dość dobrym stanie około 2500 lat. PADECHOWICZ (1929, s. 20) napisał o drewnie dębu: *nawet zaraz po ścięciu [niewysuszone] przeznaczone do budowli wodnych trwa całe setki lat, aż w końcu staje się twarde jak kamień. [...] Do jakiego stopnia dochodzi trwałość drewna w wodzie, ilustruje następujący przykład: w roku 1858 znaleziono w Dunaju przy t. zw. Żelaznej Bramie, pale dębowe i olchowe, które były pozostałością mostu Trajana z przed 1700 laty, a mimo to zachowały się zupełnie dobrze. Z tego wynika, że sama wilgoć bez dostępu powietrza nie powoduje gnicia lub próchnienia drewna, owszem zwiększa jego trwałość.*

⁹⁵ *Strzała – Cały pień drzewny nazywają leśnicy strzałą. [...] Strzała z obciętym wierzchołkiem, zawierająca w [cieńszym] końcu 7 do 14 cm średnicy i długość nie mniejszą od 8-miu metrów nosi miano dłużycy. Dłużycę drzew iglastych spławiana są tratwami lub przewożone wolami i koleją do tartaków (KUŚMIERSKI 1946).*

⁹⁶ Zbieżystość, krzywizna, spłaszczenie, zgrubienie odziomkowe, napływy korzeniowe, rak, obrzęk.

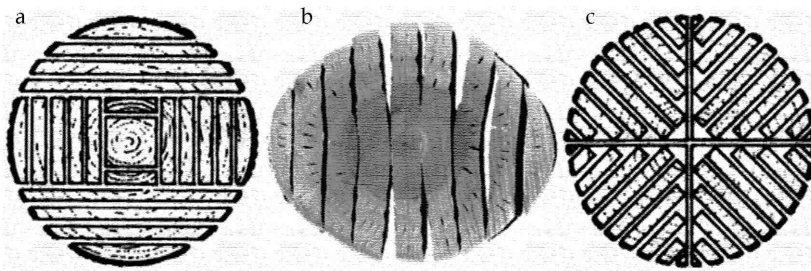
⁹⁷ Zabitka, zakorek, przeżywiczenie, pęcherz żywiczny, drewno ciągliwe, twarżica, nierównomierna szerokość słoików rocznych, wielordzenność, mimośrodowość rdzenia, skręt włókien.

Na rysunku 2-27 przedstawiono wybrane, ważniejsze wady budowy anatomicznej i struktury drewna. Mimośrodowość słoje (rys. 2-27 a) występuje w drzewach rosnących na skraju lasu, które mają niesymetryczną koronę (od strony lasu słoje są cieńsze). Pęknięcia rdzeniowe (rys. 2-27 b) są charakterystyczne dla starszych drzew, w których twardziel może wyschnąć i się skurczyć. Pęknięcia mrozowe (rys. 2-27 c) mogą powstać pod wpływem bardzo niskich temperatur. Pęknięcia międzysłojowe (rys. 2-27 d) są skutkiem działania nadmiernych naprężeń mechanicznych na rosnące drzewo (np. wiatru). Przyczyną tworzenia się skrętu włókien (rys. 2-27 e) są czynniki genetyczne i zewnętrzne (np. wiatr). Sęki (rys. 2-27 f), czyli wrośnięte w drewno pnia części gałęzi o węższych przyrostach rocznych i barwie zazwyczaj ciemniejszej niż otaczające drewno, powstają w ciągu całego życia drzewa. Gałęzie są niezbędne do podtrzymywania aparatu asymilacyjnego drzew i dlatego drewno bezsęczone praktycznie nie istnieje. Najgłębiej położone i najmniejsze sęki znajdują się w części odziomkowej pnia. W pewnych zastosowaniach drewno sęcinate, pomimo mniejszej wytrzymałości, jest cenione za ciekawy rysunek.



Rys. 2-27. Ważniejsze wady budowy anatomicznej i struktury drewna: a - mimośrodowość słoje, b - pęknięcia rdzeniowe, c - pęknięcia mrozowe, d - pęknięcia międzysłojowe, e - skręt włókien, f - sęki

Najczęstszy i najłatwiejszy do przeprowadzenia sposób przetarcia kłód przedstawiono na rysunku 2-28 a, powoduje on jednak, szczególnie w skrajnych deskach, odkształcenia desorpcyjne. Kierunki odkształceń przedstawia rysunek 2-28 b. Jak widać, tylko deska środkowa nie ulega odkształceniom, wszystkie deski boczne, tzw. *mimośrodowe*, ulegają deformacji (paczeniu) na skutek nierównomiernego wysychania drewna. Deski przeznaczone na wyroby, od których wymaga się dużej stabilności wymiarowej, np. instrumenty muzyczne (a zwłaszcza ich płyty rezonansowe) czy klepki beczek, przeciera się w sposób pokazany na rysunku 2-28 c.

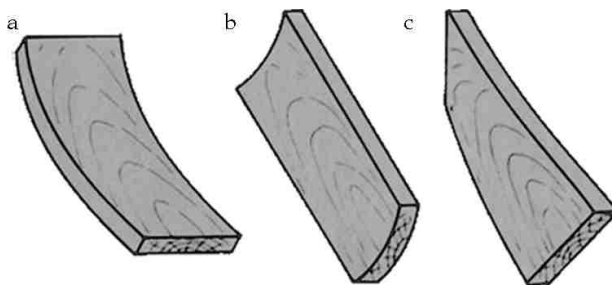


Rys. 2-28. Wybrane sposoby przetarcia: a - przetarcie jednodzielne dwukrotne, b - przetarcie styczne i kierunki odkształceń, c - przetarcie promieniowe

Paczenie się drewna jest związane ze zmianą objętości występującą przy odparowywaniu wody związanej. Paczeniem określa się zniekształcenia (zmianę kształtów) będące następstwem różnych wartości skurczu w kierunkach promieniowym, stycznym i wzdłuż włókien. *Drzewo po utracie soków zmniejsza swój ciężar i objętość, to jest zsiycha się czyli zbiega się; i na odwrót drzewo suche nasiąknąwszy wilgocią na słocie pęcznieje. Oba te objawy nazywają pracowaniem drzewa, które nigdy nie jest jednostajne z powodu niejednolitego złożenia masy drzewnej. Wskutek tego właśnie drzewo połowiczne, deski i dyle podczas wysechania wypaczają się, drzewo wyrosnięte o włóknach zwichrzonych skręca się i jedynie drzewo ćwiartkowe ulega najmniej paczeniu się* (SKWARCZYŃSKI 1925, s. 240).

Wybrane postacie odkształceń desek w wyniku zmniejszenia się wilgotności przedstawia rysunek 2-29 (na rys. 2-29 a i c pokazano przykłady deformacji długich desek, a na rys. 2-29 b - desek szerokich).

Wielkość i rodzaj zniekształcenia zależą od gatunku drewna, wymiarów tarcicy lub elementów, sposobu składowania materiału oraz od tego, z jakiej części przekroju poprzecznego kłody został on wyrobiony.



Rys. 2-29. Przykłady wad kształtu desek powstałych na skutek desorpcji wody: a - wygięcie, b - podwinięcie brze-gów, c - zwichrowanie

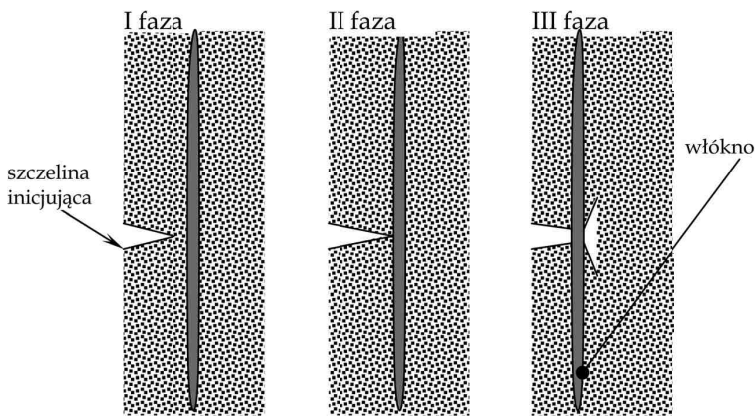
Paczenie bywa przyczyną pojawienia się pęknięć desorpcyjnych. Niebezpieczeństwo powstania pęknięć na czołach i płaszczyznach pojawia się podczas intensywnego suszenia tarcicy. Długotrwałe, niegwałtowne suszenie zapewnia równomierne rozmieszczenie wilgotności na przekroju i wyrównanie wewnętrznych naprężeń (z przesychania i wzrostowych).

Nagłe pękanie drewna

Pękanie jest częściowym lub całkowitym rozdzieleniem na części materiału pod wpływem obciążenia (naprężeń pochodzących od sił zewnętrznych lub naprężeń wewnętrznych spowodowanych np. zmianami wilgotności). W przypadku drewna pękanie jest końcowym stadium lepko-sprężysto-plastycznego odkształcenia materiału. Ze względu na złożoność zachodzących zjawisk dotychczas nie sformułowano ogólnej teorii pęknięcia. Istnieje za to kilka teorii mniej lub bardziej trafnie opisujących różne rodzaje pęknięcia w różnych warunkach eksploatacji (WYRZYKOWSKI i IN. 1999).

Pękanie drewna pod wpływem obciążenia, podobnie jak w przypadku innych materiałów, rozpoczyna się od zarodkowania pęknięcia, które następnie się rozprzestrzenia (propaguje). Pęknięcie jest zarodkowane w miejscu karbu (nacięcia, sęku lub innej nieciągłości struktury), a jego rozprzestrzenianie przebiega zwykle w dwóch stadiach: (1) podkrytyczny wzrost pęknięcia - pęknięcie rozprzestrzenia się względnie wolno, jego propagacja wymaga zwiększenia obciążenia, (2) krytyczny wzrost pęknięcia narastający z prędkością zbliżoną do prędkości dźwięku w pękającym materiale - propagacja nie wymaga wzrostu obciążenia; stadium to kończy proces pęknięcia.

Jeżeli w stadium podkrytycznym pęknięcia nastąpi relaksacja naprężeń (np. spowodowana odkształceniem plastycznym), pęknięcie może stać się stabilne i może nie przejść ze stadium podkrytycznego w krytyczne. Mechanizm hamowania zjawiska propagacji pęknięcia przez włókna w najprostszym przypadku obciążenia jednoosiowym rozciąganiem⁹⁸ w drewnie przedstawia rysunek 2-30. Jak widać, podczas pęknięcia drewna w kierunku poprzecznym do włókien występuje korzystne zjawisko hamowania propagacji pęknięcia przez włókna.



Rys. 2-30. Mechanizm hamowania propagacji pęknięcia w drewnie

Proces pęknięcia postępuje w następujący sposób: powiększająca się szczelina napotyka na swojej drodze włókna drzewne i następuje zahamowanie rozprzestrzeniania się pęknięcia na skutek zwiększenia się powierzchni czoła szczeliny (spada wartość naprężeń). Dalsze rozwarstwianie materiału jest możliwe dopiero po zerwaniu włókna lub wysunięciu się jednego z jego końców z osnowy ligninowej na skutek zerwania hemicelulozowych mostków (rys. 2-6 na s. 29).

Niektóre cechy anatomiczne, jak np. zrosnięte zdrowe sęki czy skrzyżowane włókna, zmniejszają podatność drewna na pęknięcie, zwiększając jego wartość techniczną w niektórych zastosowaniach.

⁹⁸ Taki stan obciążeń występuje w warstwie rozciąganej podczas zginania.

2.2.13. Wymagania wobec tarcicy do budowy maszyn

Tarcica o określonym przeznaczeniu musi odznaczać się pewnymi niepowtarzalnymi cechami⁹⁹.

Tarcica igłasta. Przykładem tarcicy specjalnej może być tarcica okrętowa, przeznaczona do budowy i napraw morskich jednostek pływających. Ze względu na przeznaczenie tarcica okrętowa dzieli się na cztery grupy: (1) tarcica na poszycie burt, (2) tarcica na poszycie pokładów, (3) tarcica na gięte i klejone elementy konstrukcyjne, (4) tarcica na wyposażenie (MILEWSKI 1970). Wymiary i wymagania jakościowe dla poszczególnych grup są bardzo zróżnicowane, dotyczą one wymiarów, kierunków przetarcia oraz jakości. Przykładowo, według PN-D-94012:1976 tarcica okrętowa igłasta powinna mieć co najmniej trzy słoje na 1 cm, praktycznie prosty przebieg włókien, powinna być pozbawiona wad anatomicznych z wyjątkiem niewielkich dopuszczalnych sęków i pęknięć.

Tarcica lotnicza sosnowa nieobrzynana używana na konstrukcyjne elementy lotnicze według BN-67/7111-15 powinna mieć co najmniej cztery słoje na 1 cm. Część użytkową sosnowych bali lotniczych stanowił tylko biel, wymagania jakościowe dotyczyły zatem głównie części bielastej drewna, dopuszczano jednak niewielki udział twardzieli.

Tarcica wagonowa (sosnowa oraz jodłowo-świerkowa) jest przeznaczona do budowy i naprawy wagonów kolejowych. Występuje w wielu sortymentach. Oceny jakości dokonuje się na podstawie oględzin lepszej płaszczyzny i boków. Dopuszcza się występowanie do czterech wad anatomicznych na ocenianej najlepszej płaszczyźnie deski.

Półfabrykaty tarte przeznaczone do wyrobu drewnianych części maszyn rolniczych były produkowane głównie z drewna sosnowego, warunkowo dopuszczano również elementy jodłowe i świerkowe (MILEWSKI 1970). Tarcica, podobnie jak poprzednie, występowała w wielu sortymentach wymiarowych, a pod względem jakości dzieliła się na trzy klasy. Klasę 1, o najwyższych wymaganiach jakościowych, stosowano na elementy ruchomych zespołów maszyn rolniczych (obrotowe, wstrząsowe itp.). Do tej klasy zaliczano materiał ostrokrawędziowy, bezrdzeniowy,

⁹⁹ Taka tarcica podlega normalizacji. Wymagania normalizacyjne dla tarcicy stosowanej w budowie maszyn są zawarte w szeregu norm (w zdecydowanej większości już nieaktualnych – wycofanych bez zastąpienia); przykładami mogą być: BN-66/7116-02, BN-67/7111-15, BN-76/7111-15, PN-D-94006:1977, PN-D-94007:1952, PN-D-94010:1960, PN-D-94012:1976, PN-D-97005-11:1983, PN-L-19000:1952, PN-L-19001:1952, PN-L-19002:1952.

o skręcie włókien do 2 cm/m, zupełnie zdrowy z nieznacznymi smugami i plamami sinizny, prawie bezszęczy (na płaszczyznach dopuszczalne dwa sęki na 1 metr bieżący o średnicy do 1/3 szerokości, ale nie większe niż 20 mm) i praktycznie bez pęknięć (dopuszczalne powierzchowne, zanikające przy obróbce). Klasa 2 była przeznaczona na nieruchome elementy konstrukcyjne maszyn, natomiast klasa 3 – na półfabrykaty elementów wypełniających lub osłaniających.

Tarcica liściasta. Liściaste półfabrykaty przeznaczone do budowy maszyn rolniczych były głównie elementami wykonawczymi lub nośnymi. Wytwarzano je najczęściej z drewna bukowego lub dębowego, rzadziej z jesionowego, brzoźowego i grabowego. Przy ustalaniu wymagań jakościowych kierowano się przede wszystkim przeznaczeniem elementów, warunkami pracy i związanymi z tym wymaganiami wytrzymałościowymi. Półfabrykaty liściaste dzielono na cztery klasy. Klasa 1 to półfabrykaty przeznaczone na elementy gięte – drewno zupełnie zdrowe, o praktycznie prostym przebiegu włókien (dopuszczalny skręt do 2 cm/m), bezszęczne (w strefie gięcia zdrowe sęki do 3 mm średnicy i do 6 mm poza strefą), bez pęknięć, z dopuszczalną fałszywą twardzielą. Klasa 2 była przeznaczona na części maszyn podlegające obciążeniom dynamicznym. Drewno w tej klasie musiało być zupełnie zdrowe, a skręt włókien nie powinien przekraczać 4 cm/m; dopuszczalne były sęki i drobne pęknięcia. Klasa 3 była przeznaczona na elementy obciążone statycznie, natomiast klasa 4 – na elementy narażone na ścieranie. Odrębnym wymaganiom podlegało drewno liściaste przeznaczone na szarpacze maszyn do sprzętu zboża. Drewno bukowe przeznaczone na te elementy musiało być parzone, a czoła tarcicy zabezpieczone parafiną przed wysychaniem.

Wymagania dotyczące tarcicy skutniczej liściastej zebrano w normie PN-D-94007:1952. Produkowano ją przede wszystkim z drewna dębowego, rzadziej z wiązów oraz jesionu. Tarcicę dzielono według przeznaczenia na: stępki, podstępki, dziobnice tylne (stewy rufowe), poszycie burtowe, pokładniki, wzdłużniki i wręgi. Wymiary, stopień obróbki i wymagania jakościowe zależały od przeznaczenia. Wymagania jakościowe wobec tarcicy skutniczej były bardzo duże, ustępowały jedynie wymaganiom stawianym przed tarcicą lotniczą iglastą. Ciekawostką jest fakt, że w niektórych zastosowaniach skutniczych krzywizna była traktowana jako wada dyskwalifikująca, a w pewnych była bardzo pożądana.

2.2.14. Podsumowanie niepowtarzalnych właściwości drewna

Drewno jest rodzajem spienionego kompozytu włóknistego. Jego poszczególne właściwości są wypadkową odpowiednich właściwości jego składników strukturalnych oraz wynikają z ich udziałów i rozmieszczenia w objętości. Stosunkowo dobre właściwości drewna (wytrzymałość, podatność na obróbkę, dostępność) przyczyniają się do dużej uniwersalności jego zastosowania. W związku z tym w drewnie można wyróżnić aż kilkadziesiąt istotnych właściwości konstrukcyjnych, a większość z nich posiada trzy składowe zależności od kierunków anatomicznych. Charakterystyczny jest duży rozrzut wartości właściwości. We współczesnym zastosowaniu drewna w budowie maszyn, w odróżnieniu od zastosowania w przeszłości, decydujące znaczenie mają jego cechy subiektywne (estetyka, dostępność, jakość), a nieco mniejsze – cechy obiektywne (właściwości fizyczne, w tym wytrzymałościowe).

W porównaniu z innymi materiałami inżynierskimi najbardziej charakterystycznymi cechami drewna są:

- anizotropia właściwości wytrzymałościowych,
- zmienność właściwości, nawet w obrębie gatunku; skutkuje to tym, że poszczególne partie drewna różnią się właściwościami (niezmienność właściwości ma znaczenie np. w budowie płyt rezonansowych instrumentów muzycznych – drewno musi pochodzić z jednej kłody – oraz np. w doborze kolorystycznym poszycia jachtu),
- dwie powyższe cechy warunkują konieczność stosowania dużych wartości współczynników bezpieczeństwa w kształtowaniu wytrzymałości wyrobu, ale jednocześnie sprawiają, że projektant może elastycznie dobierać wartości poszczególnych właściwości.

Ważny dla właściwości drewna jest sposób jego pozyskiwania i obróbki (szczególnie suszenia, ale także np. kierunki przetarcia). *Drewno bowiem to jeden z najbardziej kapryśnych surowców. Umiejętnie traktowany oddaje nieocenione usługi, lecz nie znosi nieudolności i ignorancji* (Franciszek Krzysik, jeden z twórców nauki o drewnie, za PUDLISEM 2005, s. 43).

Drewno jest materiałem łatwo obrabialnym, jego kształtowanie nie wymaga stosowania zaawansowanych narzędzi. Jako produkt naturalny jest łatwe w utylizacji i nie stwarza zagrożenia dla środowiska tak jak np. tworzywa sztuczne. Drewniane ścinki i trociny można wykorzystać do wytwarzania kompozytów drzewno-tworzywowych, do produkcji ekologicznego biopaliwa lub jako podłoże w uprawach roślin. Wybrane wyjątkowe cechy drewna zebrano w tabeli 23.

Tabela 23

Cechy drewna istotne z punktu widzenia jego zastosowania w budowie maszyn

Grupa cech	Opis	
Parametry konstrukcyjne i technologiczne	Zalety	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Duża wytrzymałość właściwa wzdłuż włókien ▪ Stosunkowo mała energochłonność produkcji ▪ Małe przewodnictwo cieplne ▪ Właściwości akustyczne (rezonansowe i dźwiękochłonne) ▪ Łatwość transportu ▪ Łatwość obróbki, niewielkie wymagania wobec narzędzi (cechy szczególnie istotne w przeszłości oraz współcześnie na etapie budowania np. modeli odlewniczych) ▪ Uniwersalność zastosowania ▪ Przydatność do wykonywania prototypów
	Wady	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Niestabilność wymiarowa (higroskopijność i związane z tym pęcznienie, kurczenie się i pękanie) ▪ Ograniczona trwałość ▪ Anizotropia i rozrzut właściwości wytrzymałościowych ▪ Duża liczba czynników mogących niekorzystnie zmienić parametry mechaniczne (np. miejsce drzewa w drzewostanie, czas ścinki, proces suszenia)
Subiektywne cechy jakościowe (estetyka, jakość, przyjazność)	Zalety	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Odczucie ciepła, spokoju i harmonii, przyjemność dotyku oraz zapachu ▪ Niepowtarzalność i wyjątkowość barwy i rysunku ▪ Ponadczasowość (mała wrażliwość na trendy mody)
	Wady	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konieczność konserwacji
Dostępność	Zalety	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konkurencyjność cenowa w porównaniu z innymi materiałami ▪ Duża różnorodność gatunków różniących się właściwościami
	Wady	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nieporządek terminologiczny w nazewnictwie gatunków tropikalnych
Cechy ekologiczne i społeczne	Zalety	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Odnawialność ▪ Stosowanie drewna w połączeniu z gospodarką leśną korzystnie wpływa na bilans CO₂ w atmosferze ▪ Nieuciążliwość dla środowiska, możliwość powtórnego wykorzystania (np. w energetyce) ▪ Planowa i przemyślana gospodarka leśna zwiększa areal lasów i korzystnie wpływa na krajobraz
	Wady	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konieczność stosowania powłok, klejów i innych substancji, które mogą być nieobojętne dla zdrowia ▪ Niekorzystne oddziaływanie soków, pyłów na organizm człowieka

2.3. Krótko o maszynie

Bezwzględnie logiczną w czynie jest tylko maszyna
(Aleksander Świętochowski, 1849-1938)¹⁰⁰

Maszyną jest każdy obiekt materialny zaadaptowany lub przetworzony przez człowieka, służący zaspokajaniu jego potrzeb w drodze przekształcania energii lub informacji. Pierwsze *maszyny* budowano z nieprzetworzonych obiektów naturalnych (kamieni, gałęzi), kolejne z materiałów poddanych obróbce (oszczep, łuk).

Źródłosłowem *maszyny* jest grecka *mākhanā*, który to wyraz Grecy mogli utworzyć od hinduskiego *mankana*¹⁰¹, gdzie *man* oznacza pracę, a *kana* – prosty drewniany obracający się wałek – część młynka modlitewnego. W narzeczu doryckim *mākhanā* oznacza *coś, co ma zdolność, możliwość*. Od słowa greckiego utworzono łacińskie *machina*, które przeniknęło do języków europejskich (LIEBFELD 1964). Termin *maszyna* początkowo nie pokrywał się ściśle z dzisiejszym znaczeniem. WITRUWIUSZ (27-13 p.n.e.) w traktacie *De architectura* do budowy *maszyn* zaliczał m.in. wznoszenie tymczasowych trybun. W starożytności mechanika i budowa *maszyn* razem z budownictwem wchodziły w skład *architektury* (łac. *architectura*), która była pojęciem ogólnym mieszczącym w sobie całą antyczną i średniowieczną technikę. Termin *maszyna* w dzisiejszym, węższym znaczeniu pojawił się dopiero w XVI i XVII wieku¹⁰².

Uściślenie pojęcia *maszyna* jest konieczne do sprecyzowaniu tematyki podjętej w książce. Najstarszą znaną definicję *maszyny* przytoczono we wstępie do niniejszej książki (definicja według WITRUWIUSZA 27-13 p.n.e.). Jednak to słownik technologiczny Johana i Jacobssona (1781-1784) dostarcza, najprawdopodobniej najstarszej, funkcjonalnej ogólnej definicji: *maszyna jest narzędziem, które człowiek może użyć na swoją korzyść po to, aby: bądź to poruszyć większy ciężar w krótszym czasie względnie mniejszą siłą, bądź też w określonym czasie osiągnąć przy użyciu tej samej siły więcej niż to zazwyczaj*

¹⁰⁰ GRZENIEWSKI (1984).

¹⁰¹ W literaturze spotyka się: *mēkhanē* zamiast *mākhanā* (np. THE AMERICAN HERITAGE DICTIONARY 2006) oraz *maghana* zamiast *mankana* (np. HOAD 1986).

¹⁰² Np. DI GIORGIO MARTINI (1484 ±2), AGRICOLA (1555-1557), RAMELLI (1588), ZEISING (1607-1614), STRADA (1617-1618), ZONCA (1656).

jest możliwe¹⁰³. Podobnie brzmiącą definicję można odnaleźć w *Słowniku języka polskiego* Samuela Lindego wydanego w latach 1807-1814: *maszyną jest wszelkie narzędzie służące do pomnożenia skutków siły iakielkolwiek* (LINDE 1807-1814). Karol Henryk Marks (1818-1883) w 1867 roku zdefiniował *maszynę* następująco: *maszyna jest mechanizmem, który wprawiony w ruch może za pomocą swoich narzędzi wykonać te same operacje które by wykonał robotnik za pomocą podobnych narzędzi* (MARKS 1951). W jego definicji zawarty jest sens budowy maszyn – zastępowanie pracy człowieka pracą mechanizmów¹⁰⁴. Mankamentem wszystkich trzech przytoczonych wyżej definicji jest błędne koło logiczne (*maszyna* zdefiniowana jest przez *narzędzie* lub przez *mechanizm*).

Określenie *maszyny* sformułowane przez Franza Reuleaux'go (1829-1905) w 1875 roku jest pierwszą definicją *maszyny* we współczesnym znaczeniu tego pojęcia: *maszyna jest to kombinacja ciał sztywnych tak zestawionych, że przy ich pomocy można zmusić mechaniczne siły przyrody do wykonywania pracy realizowanej przez ściśle określone ruchy [poszczególnych części maszyny]*¹⁰⁵ (REULEAUX 1875, s. 38). Krótka i trafna definicja *maszyny* znajduje się w poradniku lotniczym z przełomu lat dwudziestych i trzydziestych XX wieku: *Machinami nazywamy przyrządy, które pozwalają zastosować pracę w sposób najwygodniejszy* (BOREJSZA i IN. 1930, s. 20). Wyjaśnienie terminu *maszyna* tożsame z definicją Reuleaux'go zamieszczono w *Słowniku języka polskiego* – *maszyną nazywamy urządzenie zawierające mechanizm lub zespół współdziałających mechanizmów, służące do przetwarzania energii albo do wykonywania określonej pracy* (SŁOWNIK JĘZYKA POLSKIEGO PWN 1995).

Bardzo ciekawie precyzują terminy związane z *maszynami* prawnicy. Sędziowie Trybunału Rzeszy w swoim orzeczeniu z 17 marca 1879 roku, definiując termin *kolej*, napisali: *Przedsiębiorstwo mające na celu powtarzającą się lokomocję osób i rzeczy na niezbyt małych przestrzeniach po metalowym podłożu, które przez swoją konsystencję, konstrukcję i gładkość umożliwia transport*

¹⁰³ Według Johanna i Jacobssona 1781-1784 (za FELDHAUSEM 1958, s. 11-12).

¹⁰⁴ Rozwijając myśli przedstawicieli ekonomii klasycznej (m.in. Adama Smitha i Davida Ricardo), Marks stał na stanowisku, że źródłem wartości jest tylko i wyłącznie praca człowieka. Tylko taka praca tworzy produkty i wartość. Wszelkie maszyny są jedynie wytworem służącym bogaceniu się kapitalisty kosztem ubożenia robotnika. Podobnie jak angielscy luddyci z początku XIX wieku, był przeciwnikiem mechanizacji produkcji.

¹⁰⁵ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *Eine Maschine ist eine Verbindung widerstandsfähiger Körper, welche so eingerichtet ist, dass mittelst ihrer mechanische Naturkräfte genöthigt werden können, unter bestimmten Bewegungen zu wirken.*

większych ciężarów względnie osiągnięcie dość znacznej szybkości transportu i przez tę swoistą cechę w połączeniu z siłami natury służącymi poza tym do wywołania ruchu (para, elektryczność, siła mięśni zwierzęcych i ludzkich, a przy odpowiednim pochyleniu toru również własny ciężar pojemników transportowych i ich ładunku) zdolne jest przy poruszaniu się wywołać dość gwałtowne (w pewnych okolicznościach tylko częściowo użyteczne albo nawet niszczące życie ludzkie lub szkodzące ludzkiemu życiu) działanie (FELDDHAUS 1958, s. 12).

Niewiele mniej zagmatwane są, zamieszczone w polskim ustawodawstwie, prawnicze definicje *maszyny*, zgodne z prawem wspólnotowym UE (z tzw. *dyrektywami maszynowymi*): obowiązująca do niedawna Dyrektywa nr 98/37/WE¹⁰⁶ oraz aktualna – nr 2006/42/WE¹⁰⁷. W obydwu podkreślono, że maszyna musi zawierać ruchome elementy zasilane energią oraz jest przeznaczona do celowego zastosowania.

We współczesnym szerokim określeniu *maszyna* mieści się wiele funkcjonujących w języku pojęć (mechanizm, narzędzie, elektronarzędzie, przyrząd, agregat, aparat, automat, instrument, robot, obrabiarka); inne się z maszyną zająbiają znaczeniowo, np. urządzenie, instalacja, osprzęt,

¹⁰⁶ Fragment Dyrektywy 98/37/WE definiujący *maszynę* brzmi: *Ileokroć w rozporządzeniu jest mowa o [...] maszynie – należy przez to rozumieć: (a) zespół sprzężonych części lub elementów składowych, z których przynajmniej jeden jest ruchomy, wraz z odpowiednimi elementami uruchamiającymi, obwodami sterowania, zasilania, połączonych wspólnie w celu określonego zastosowania, w szczególności do przetwarzania, obróbki, przemieszczania lub pakowania materiałów, (b) zespół maszyn, które w celu osiągnięcia wspólnego efektu końcowego zostały zestawione i są sterowane w taki sposób, aby działały jako zintegrowana całość, (c) wymienne wyposażenie modyfikujące funkcje maszyny, które jest wprowadzane do obrotu z przeznaczeniem do zamontowania przez operatora do maszyny lub szeregu różnych maszyn albo do ciągnika, o ile wyposażenie to nie stanowi części zamiennej lub narzędzia (ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI... 2003).*

¹⁰⁷ Definicja maszyny w Dyrektywie 2006/42/WE: *maszyna to: (1) zespół wyposażony lub przeznaczony do wyposażenia w mechanizm napędowy inny niż bezpośrednio wykorzystujący siłę mięśni ludzkich lub zwierzęcych, składający się ze sprzężonych części lub elementów, z których przynajmniej jedna wykonuje ruch, połączonych w całość mającą konkretne zastosowanie, (2) zespół określony w tiret pierwsze, jedynie z pominięciem elementów przeznaczonych do jego podłączenia w miejscu pracy lub do podłączenia do źródeł energii i napędu, (3) zespół określony w tiret pierwsze i drugie, gotowy do zainstalowania i zdolny do funkcjonowania w danym stanie jedynie w przypadku, gdy jest zamontowany na środkach transportu lub zainstalowany w jakimś budynku lub na konstrukcji, (4) zespoły maszyn określone w tiret pierwsze, drugie i trzecie lub maszyny nieukończone określone w lit. g), które w celu osiągnięcia określonego efektu końcowego zostały zestawione i są sterowane w taki sposób, że działają jako zintegrowana całość, (5) zespół sprzężonych części lub elementów, z których przynajmniej jedna wykonuje ruch, połączonych w całość, przeznaczony do podnoszenia ładunków, a którego jedynym źródłem mocy jest bezpośrednio wykorzystanie siły ludzkich mięśni (DYREKTYWA 2006/42/WE 2006).*

sprzęt, oprzyrządowanie, aparatura. *Maszyny* w literaturze technicznej są podzielone na cztery klasy¹⁰⁸:

- *maszyny napędowe* (przetworniki i silniki) zamieniające różne postacie energii na pracę mechaniczną (silnik spalinowy, kabestan),
- *maszyny transportowe* (np. statki, pojazdy, dźwignice, samoloty),
- *maszyny produkcyjne* zmieniające kształt materiałów lub przedmiotów (np. obrabiarki, kruszarki, spawarki),
- *maszyny energetyczne* zmieniające wartości parametrów stanu materii (np. pompy, sprężarki, piece, instrumenty muzyczne)¹⁰⁹.

Budowa maszyn jest dziedziną szybko rozwijającą się, nawet ogólna klasyfikacja nie może być ścisła – pewne maszyny mogą pełnić funkcje „pośrednie” – mogą być np. jednocześnie maszyną transportową i maszyną roboczą (vide młyn Solskiego na rys. 3-13, s. 141).

Podsumowując, można stwierdzić, że *maszyna* to układ materialny (system) połączonych w logiczną całość elementów, zorganizowany w celu przemiany informacji i/lub przemiany energii, osadzony w otoczeniu. Elementy maszyny są zespolone związkami (relacjami sprzężeń i przekształceń) dwojakiego rodzaju: związkami zewnętrznymi między zewnętrznymi wielkościami wejściowymi i wyjściowymi oraz związkami wewnętrznymi samych elementów systemu (relacjami przekształceń i sprzężeń wewnętrznych) i otoczone granicą systemu. *Maszyna* posiada strukturę, funkcję, parametry oraz otoczenie; może znajdować się w różnych stanach; jest zbiorem skończonej liczby elementów tworzących podzbiory (układy) o zidentyfikowanych własnościach i właściwościach, które pozwalają wyodrębnić się z innych zbiorów ze względu na pełnioną funkcję (np. układ chłodzenia, sterowania, napędu, smarowania) lub ze względu na budowę (np. podwozie, wysięgnik, naczepa, rama) (BRANOWSKI 2007).

W narzeczu starodoryckim¹¹⁰ określenie *mechené* (μηχανή) (z którego utworzono słowo *mākhanā*) oznaczało *środek pomocniczy*. Zgodnie ze znaczeniem swojego źródłosłowa *maszyny* ułatwiają (lub umożliwiają) zaspokajanie ludzkich potrzeb, wzmacniając i/lub zastępując narządy

¹⁰⁸ W niektórych opracowaniach maszyny napędowe i maszyny energetyczne traktowane są łącznie (np. LEKSYKON NAUKOWO-TECHNICZNY... 1989).

¹⁰⁹ Oprócz wymienionych czterech grup można jeszcze wyróżnić dwie inne: *maszyny elektroniczne* (cyfrowe) przekształcające informację oraz *maszyny biologiczne*. *Maszyny transportowe*, *maszyny produkcyjne* i *maszyny energetyczne* bywają określane łącznie, jako tzw. *maszyny robocze*.

¹¹⁰ *Dorowie* – szczerp starogrecki zamieszkały głównie na Półwyspie Peloponeskim.

człowieka. Realizacja tego celu odbywa się trzema sposobami: (1) przez przekształcanie materiałów (zmiana struktury, stanu i kształtu; łączenie i dzielenie przedmiotów), (2) przez przemieszczanie (osób, przedmiotów i materiałów), (3) przez przekształcanie i selekcję informacji (i podawanie ich w dogodnej dla człowieka formie).

W świetle przytoczonych definicji *maszyna*, zdaniem autora, to każdy nieożywiony obiekt materialny przekształcony lub zaadaptowany przez człowieka do świadomego przekształcania energii i/lub informacji.

Termin *maszyna* może być rozumiane wąsko, w znaczeniu „maszyna robocza lub silnik” (np. obrabiarka, młynek do kawy lub wiatrak), lub bardzo szeroko – jako „każde urządzenie służące do celowego przekształcania energii i/lub informacji”. *Maszyna* w niniejszej książce jest traktowana w takim właśnie szerokim kontekście. *Maszyną* jest ważyca 647 000 t zbiornikowiec turbinowy *Knock Nevis* oraz mikromaszyny stosowane w medycynie, o wadze ułamka grama (np. sprężysty stent zapewniający drożność tętnicy)¹¹¹. *Maszynami* można nawet nazwać dość proste narzędzia, jak młotek, wkrętak czy topór. Służą one przekształcaniu energii i zaliczają się do grupy maszyn, które do swojego działania potrzebują aktywnego udziału człowieka – wymagają manipulacji. Do zbioru *maszyn* można zaliczyć również pewne rodzaje mebli wyposażonych w mechanizmy przekształcające energię (fotele bujane, łóżka z napędami itp.), instrumenty muzyczne (przekształcające energię mechaniczną w energię fal dźwiękowych) oraz sprzęt sportowy (kije hokejowe, wiosła itp.).

¹¹¹ Najmniejszymi maszynami na świecie są będące w stadium koncepcyjnym tzw. *maszyny molekularne* o rozmiarach rzędu 10^{-5} m (vide np. KAY i IN. 2007; online: www.esm.psu.edu/huang/wiki/chem.pdf).

3.

MASZINY Z DREWNA

3.1. Świt maszyn – maszyny proste

Wszak początek zdaje się być więcej niż połową całości i dzięki niemu wyjaśnia się wiele z tego, co jest przedmiotem badań
(Arystoteles, 384-322 p.n.e.)¹¹²

Rozdział trzeci jest przeglądem dziejów maszyn zbudowanych ze znaczącym udziałem drewna. Rozpoczynają go maszyny proste, kluczowe dla powstania wszystkich innych mechanizmów, w dalszej części następuje opis wybranych rodzajów maszyn (okrętów, pojazdów, samolotów, dźwignic, silników, obrabiarek, maszyn stosowanych w przemyśle chemicznym i instrumentów muzycznych). Kolejność nie jest przypadkowa, wybrano maszyny zbudowane z udziałem drewna należące do każdej z czterech klas. Po pewnego rodzaju wstępie, którym jest opis maszyn prostych, przedstawiono: (1) *maszyny transportowe* (okręty, drewniane pojazdy kołowe, dźwignice oraz maszyny latające cięższe od powietrza), (2) wybrane *silniki* i ich zastosowania (koła wodne, koła deptakowe i wiatraki), (3) wybrane *maszyny produkcyjne* (obrabiarki i maszyny portowe), (4) wybrane *maszyny energetyczne* – na przykładzie mechanicznej aparatury chemicznej i instrumentów muzycznych.

Maszyny proste to pewnego rodzaju idealizacje rzeczywistych mechanizmów wprowadzone w celu wyjaśnienia zasad ich działania. Istnieją dwa podstawowe rodzaje maszyn prostych: obrotowe (dźwignia) oraz przesuwne (równia pochyła), a także ich rozwinięcia (np. kołowrót,

¹¹² ARYSTOTELES (1996).

klin itp.). Umożliwiają one lub ułatwiają wykonanie pracy przez zmianę wartości i kierunków działania sił. Wszystkie bardziej złożone urządzenia typu maszynowego wykorzystują zasady maszyn prostych. Maszyny proste z drewna – obrotowe (kij służący za dźwignię jedno- lub dwuramienną) oraz przesuwne (klin wbity w szczelinę i napęczniały pod wpływem działania wody, służący do odłupywania krzemienych skał) – były stosowane przez naszych przodków od niepamiętnych czasów. Łącząc podstawowe maszyny proste, 6000 lat temu w Europie budowano pierwsze kręgi kamienne (z tzw. *menhirów*) i grobowce w formie kamiennych skrzyń lub dolmenów, ułożonych z głazów i przysypanych ziemią. 5500 lat temu zbudowano pierwsze pojazdy (vide s. 133 i dalsze), 4700 lat temu wzniesiono najstarszą piramidę¹¹³, a w III wieku p.n.e. w krajach helleńskich skonstruowano m.in. wielokrążek linowy i pompę tłokową.

Wzorem do zastosowania machin prostych była przyroda, pisze o tym WITRUWIUSZ (27-13 p.n.e.): *Mistrzem, który nauczył budowy wszelkich mechanizmów, była przyroda; dokonała tego, ucząc nas, przez obrót świata, zasad [mechaniki]*¹¹⁴.

Najstarszą maszyną o nieco większym stopniu złożoności od maszyn prostych (składa się z więcej niż jednej części, a jej zasada działania jest wynikiem nie tylko obserwacji natury, lecz także syntetycznego myślenia) jest, liczący sobie według ALLELY'EGO i IN. (1992) co najmniej 30 000 lat (a być może nawet ponad 37 000 lat), łuk autorstwa człowieka rozumnego. Łuk, z punktu widzenia metodologii maszyn, jest rodzajem silnika, ponieważ przekształca jedną postać energii mechanicznej w inną. W okresie paleolitycznym zmagazynowana w drewnianej płaskiej sprężynie (w drzewcu łuku) energia potencjalna zamieniana na energię kinetyczną strzały wydatnie przyspieszyła rozwój techniki. Znaczne zmniejszenie ilości czasu poświęcanego na polowania umożliwiło powstanie pierwszych dzieł sztuki (malowidła naskalne, pierwsze rzeźby) oraz wielkiej liczby nowych rodzajów narzędzi zwiększających możliwości wytwórcze, ale także tworzących zupełnie nowe potrzeby inspirujące do kolejnych wynalazków. Można uznać, że wynalezienie maszyny służącej do gromadzenia

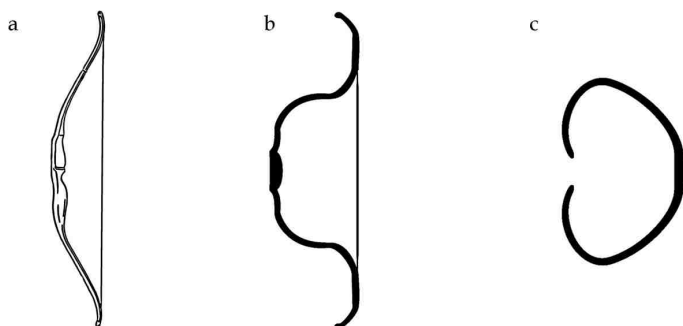
¹¹³ Za najstarszą piramidę uznaje się grobowiec króla Dzesera w Sakkarze (XXVII wiek p.n.e.), który powstał przez rozbudowanie mastaby (archaicznego typu grobowca).

¹¹⁴ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *Omnis autem est machinatio rerum natura procreata ac praeceptrice et magistra mundi versatione instituta* (WITRUWIUSZ 27-13 p.n.e., Liber X, Capitulum 1). Witruwiusz, pisząc o „obrocie świata”, miał na myśli ruch ciał niebieskich, precyzuje to w dalszej części rozdziału 1 księgi X.

i przekształcania energii sprężystości modrzewiowego lub cisowego drzewca w energię kinetyczną trzcinowej lub wierzbowej strzały było najbardziej znaczącym wynalazkiem w historii techniki. Wobec powyższego można stwierdzić, że łuk zapoczątkował gwałtowny rozwój maszyn.

Konstrukcję łuku rozwinęli Egipcjanie, którzy doskonalili umiejętności jego budowy od co najmniej 7500 roku p.n.e. Na początku kształtowania się państwowości egipskiej (okres przeddynastyczny – 3500-3100 rok p.n.e.) były używane łuki proste, najczęściej akacjowe (*Acacia* spp. Mill.). W późniejszym okresie, za czasów pierwszych dynastii (3100-2686 rok p.n.e.), pojawiły się łuki o podwójnej krzywiznie – pierwowzory łuków refleksyjnych (JANKOWSKI 2005). Najstarszymi znaleziskami europejskich łuków są pozostałości: (1) mezolitycznego łuku wiązowego sprzed 8000-9000 lat, znalezione w bagnie pod Holmegaard w Danii, (2) niewykończonego cisowego łuku sprzed 5300 lat, znalezione przy *człowieku lodu* w Alpach¹¹⁵, (3) łuku sprzed 4800 lat znalezione na duńskiej wyspie Sjealand oraz (4) łuku dębowego sprzed 3500-4000 lat znalezione również w Danii na torfowisku koło Viborga.

Istnieją dwie historyczne odmiany konstrukcyjne łuków (rys. 3-1): starszą formą jest *łuk prosty*, młodszą – *łuk refleksyjny*, którego konstrukcja pochodzi z I wieku p.n.e. i jest odpowiedzią na potrzebę miotania strzał z końskiego grzbietu (łuk refleksyjny jest o wiele krótszy).



Rys. 3-1. Podstawowe typy łuków: a – łuk prosty, najstarsza forma łuku, b – łuk refleksyjny z cięciwą, c – łuk refleksyjny bez cięciwy

¹¹⁵ *Człowiek Lodu* (Ötzi) – przydomek nadany człowiekowi, którego z mumifikowane szczątki znaleziono zamrożone w alpejskim lodowcu. Przydomek pochodzi od nazwy doliny Ötz w południowym Tyrolu. Ötzi miał plecak, torbę z kory brzoźowej, kołczan ze strzałami, nóż z krzemienia, siekiere na drzewcu cisowym i cisowy długi łuk.

Łuki proste były wykonywane zazwyczaj z jednego kawałka drewna, łuki refleksyjne były klejonymi łukami kompozytowymi (skóra, kości, kilka rodzajów drewna). Dowody materialne i przekazy ikonograficzne świadczą o tym, że na terenach Europy królował łuk drewniany. Choć jego kształty bywały rozmaite, to typowy łuk europejski był wykonany z jednego kawałka drewna (JANKOWSKI 2005). Żywotność łuków prostych jest mniejsza od żywotności łuków refleksyjnych. Jest to związane z występowaniem znacznych sił rozciągających i ściskających spowodowanych dużymi rozmiarami łuku (długością i przekrojem).

Na ziemiach etnicznie polskich import azjatyckich łuków kompozytowych stanowił konkurencję dla miejscowych rzemieślników wyrabiających łuki cisowe, wiązowe i jesionowe. Obydwa rodzaje łuków konkurowały ze sobą, na wschód od Wisły częściej używano refleksyjnych łuków kompozytowych, na zachód – prostych łuków drewnianych (JANKOWSKI 2005).

Łuk refleksyjny

W Azji ograniczony dostęp do drewna o odpowiednich właściwościach oraz koczowniczy tryb życia i związane z tym masowe wykorzystanie koni wymusiły nieco inny kierunek rozwoju. Łuki azjatyckie były wykonywane z rogów zwierzęcych, pasków drewna oraz ścięgien. Róg nadaje się do przenoszenia sił ściskających, natomiast ścięgna – rozciągających, obie warstwy były separowane od siebie warstwą drewna. Jak wspomniano, azjatycki łuk kompozytowy był krótki, miał też o wiele większą sprawność od łuku długiego (stosunek energii włożonej do otrzymanej), sprzyjało temu przeciwne wygięcie końcówek ramion, tzw. *refleks*. Jak podaje JANKOWSKI (2005), do tego rodzaju łuku należy rekord długości strzału, który wynosi 600 m. Warstwę rdzeniową refleksyjnych łuków kompozytowych stanowiło twarde drewno różnych gatunków drzew lub bambus. Ramiona w łukach tureckich zwykle wykonywano z drewna klonowego, czasami dereniowego lub cisowego, w chińskich z bambusa lub morwy, w koreańskich – z bambusa, a w hinduskich z drewna mango (KARPOWICZ 2000). Drewno było wybierane bardzo starannie; jeżeli stosowano bambus¹¹⁶, to zewnętrzna strona łodygi była zwrócona do warstwy rogowej. Część centralna refleksyjnego łuku kompozytowego (majdan) była łączona z dwoma ramionami. Wszystkie klejone łączenia

¹¹⁶ Łuki bambusowe były wykonane z jednego kawałka bambusa, a drewniany majdan był przyklejony pośrodku.

elementów drewnianego rdzenia wycinano na jaskółczy ogon o długości około 7-10 cm.

Łuki refleksyjne miały różną długość: tureckie były krótsze (typowy łuk bojowy miał około 100-112 cm pomiędzy zaczepami), perskie i hinduskie – trochę dłuższe, chińskie i tatarskie mogły mieć nawet ponad 180 cm długości. Długość zmieniała się w zależności od przeznaczenia.

Sezonowanie drewna na łuk kompozytowy trwało około roku, dopasowywanie, klejenie i suszenie – kolejnych kilka miesięcy. Paski rogowe o grubości 3-6 mm przyklejano do drewnianego rdzenia od strony brzusca budowanego łuku (część ściskana po założeniu cięciwy). Powierzchnie drewna i rogu zadrapywano po stronie klejonej specjalnym przyrządem z ząbkami, pokrywano klejem i owijano sznurem w celu dociśnięcia rogu i drewna, stosując oprzyrządowanie pozwalające na uzyskanie bardzo dużej siły. Używano prawie wyłącznie rogu bawoła (bawół wodny, *carabao*), wyjątkowo w niektórych tureckich łukach wykorzystywano rogi długorogiego bydła, a w Azji centralnej – dzikich kóz. W najlepszych chińskich łukach używano bardzo drogiego, półprzezroczystego, białego rogu. Rogi bawole nie mają bocznego skręcenia, występującego w rogach bydła, co ułatwia pracę rzemieślnika. Róg bydlęcy gotowano, podgrzewano i w celu nadania odpowiedniego kształtu ściskano w specjalnych drewnianych prasach. Opcjonalnie zamiast części rogowej w jednym kawałku przyklejano kilka wąskich pasm.

Grzbiet łuku pokrywano całkowicie ścięgami. Stosowano najczęściej ścięgna bydlęce pochodzące z nóg lub grzbietu. Ścięgno suszono, następnie tłuczono i rozdzielano na włókna. Wiązki włókien moczo w kleju i nakładano na grzbiet łuku. Dwie-trzy warstwy ścięgien (suszono po każdej warstwie) dawały po wysuszeniu warstwę grubości około 3-6 mm.

Po przyklejeniu wszystkich części łuki suszono od kilku miesięcy do nawet roku (Turcja). Z powodu kurczenia się ścięgien i kleju podczas wysychania (a w przypadku łuku tureckiego – stopniowego przeciwyginania) końce ramion dotykały się lub nawet krzyżowały. Wygięcie desorpcyjne powodowało, że późniejsze napinanie łuku i zakładanie cięciwy było dość długą i skomplikowaną czynnością.

Klej sporządzano ze ścięgien zwierzęcych, pęcherzy rybich lub skóry z rybiego podniebienia, czasem (gorszej jakości) ze skór zwierzęcych. Masa kleju w wykończonym łuku niemal dorównywała masie ścięgien. Kleje zwierzęce łatwo pochłaniały wilgoć, powodując, że łuki traciły sprężystość przy dużej wilgotności powietrza i dlatego musiały być przechowywane bez dostępu wilgoci, trzymano je przy ogniu i często suszono na słońcu.

Końcowe kształtowanie łuku kompozytowego polegało na stopniowym zginaniu (czasem połączonym z ogrzewaniem) z równoczesnym minimalnym spiłowywaniem rogowej warstwy w celu równomiernego wygięcia ramion. Ramiona doprowadzano do odpowiedniej krzywizny poprzez wielokrotne ogrzewanie i ochładzanie (to ostatnie odbywało się w specjalnych wygiętych drewnianych formach).

Łuk prosty

Drewno o dobrych właściwościach sprężystych (zdolne do magazynowania dużej energii sprężystej) było w Europie stosunkowo łatwo dostępne. Prawdopodobnie dlatego rozwój łuku europejskiego polegał raczej na jak najlepszym wykorzystaniu właściwości tego materiału niż na poszukiwaniu innych rozwiązań. Łuk drewniany musiał być długi, by nie została przekroczona wytrzymałość mechaniczna materiału (by nie nastąpiło złamanie).

Najbardziej znanym przykładem łuku prostego jest słynny długi łuk angielski (tzw. *longbow*), który wyewoluował z łuku walijskiego w VII-XII wieku. Bardzo dobrze zachowane egzemplarze długich łuków angielskich znaleziono w 1983 roku we wraku *Mary Rose*, statku Henryka VIII zatopionym w 1545 roku¹¹⁷. *Longbow* był łukiem o największej celności – krótkie łuki są z zasady niestabilne podczas strzału. Stabilność łuku długiego była osiągnięta kosztem mniejszej prędkości początkowej strzały. Mniejsza prędkość jest częściowo kompensowana przez dużą masę pocisku.

Typowy *longbow* miał długość 1,8-2,0 m i zasięg skuteczny dochodzący do 350 m. Siła naciągu tego typu łuku nierzadko dochodziła do 500 N (zazwyczaj 300-450 N). Strzelanie z angielskiego długiego łuku, z uwagi na jego dużą siłę naciągu, wymagało długotrwałego treningu. Dla porównania można podać, że siła naciągu typowego historycznego łuku refleksyjnego wynosiła 100-250 (350) N. Zasięg skuteczny wszystkich historycznych rodzajów łuków zawierał się w przedziale od 100 do 300 (350) m. Siła naciągu współczesnych refleksyjnych łuków sportowych, według MATERIAŁÓW SZKOLENIOWYCH PZŁ... (2002), wynosi 68-114 N, natomiast łuków myśliwskich – 182-250 N. Typowe długości współczesnych łuków mieszczą się w zakresie 1,52-1,78 m.

¹¹⁷ Jeden z łuków wydobytych z *Mary Rose* miał ponad 150 (!) słoików na cal (25,4 mm). Były tak gęste, że nie można ich było policzyć nieuzbrojonym okiem. Cis, z którego wykonano łuk, miał około 600 lat i średnicę mniej więcej 20 cm (JANKOWSKI 2005).

W Europie najchętniej używanym materiałem do wyrobu łuków prostych było drewno cisu europejskiego (*Taxus baccata* L.)¹¹⁸ oraz wiązu górskiego (wiązu szorstkiego), czyli brzości (*Ulmus glabra* Huds.), a także wiązu szypułkowego (limaka) (*Ulmus laevis* Pall.), rzadziej jesionu wyniosłego (*Fraxinus excelsior* L.); wyrabiano je również z innych gatunków o odpowiednio twardym i sprężystym drewnie (HARDY 1992).

W Ameryce Północnej stosowano głównie drewno hikory (*Carya ovata* K. Koch), żółtnicy (*Maclura pomifera* C.K. Schneid.) oraz grochodrzewu (*Robinia pseudacacia* L.) i klonu cukrowego (*Acer saccharum* Marshall). Grochodrzew i klon były używane jedynie jako składnik łuków kompozytowych w formie naklejanych cienkich pasków (HAMILTON 1982, HAMM 1991). Klon obecnie jest stosowany w konstrukcjach łuków sportowych jako warstwa oddzielająca laminaty.

Najbardziej poszukiwanym materiałem na europejskie łuki było drewno cisu rosnącego na południu Europy. Z powodu braku surowca¹¹⁹ Anglicy na każdy *długi łuk* z importowanego z południa kontynentu cisu wykonywali kilka łuków z jesionu, wiązu, jarzębiny i leszczyny (HARDY 1992, ALLELY i IN. 1992). Zachowały się zapiski o eksporcie drewna cisu z Polski do Anglii. Szczególnie cenione były drzewa 40-60-letnie. Pewną ciekawostką jest fakt, że cis jest rośliną trującą, jego opary i pył drzewny zawierają silnie trujący alkaloid – taksynę (uznaną za jedną z najbardziej trujących substancji świata). Trujące właściwości cisu były znane już w starożytności – grecki lekarz Anazarby w I wieku i rzymski Galenusz w II wieku przestrzegali przed morderczą trucizną, a Galowie używali go do zatruwania ostrzy strzał. Drewno cisu w średniowieczu było materiałem deficytowym na skutek dużego zapotrzebowania na nie i utrudnionego rozmnażania się drzewa. W 1423 roku król Władysław Jagiełło objął cisińską prawną ochroną: *Jeśliby kto wszedłszy w las, drzewa które znajdują się być wielkiej ceny, jako jest cis albo im podobne, podrąbał, tedy może być przez pana albo dziedzica pojman, a na rąkojemstwo¹²⁰ tym, którzy oń prosić będą, ma być dań* [zapis w Statucie wareckim – prawie ustanowionym przez Władysława Jagiełłę 28 października 1423 roku w Warce].

¹¹⁸ Łac. *taxus* – łuk.

¹¹⁹ Cis trudno się rozmnaża, co jest spowodowane: małą podatnością kwiatów na zapylenie wskutek dwupienności drzewa, często dłuższym niż jeden rok przelegiwaniem nasion do skielkowania, powolnym wzrostem lub zamieraniem siewek oraz ich wrażliwością na duże nasłonecznienie i wilgotność.

¹²⁰ Zobowiązanie rąkojemcy, że obwiniony stawi się na sąd we wskazanym terminie.

Podstawowe gatunki i rodzaje drewna stosowane na europejskie *długie łuki* wymieniono i krótko scharakteryzowano w tabeli 24.

Tabela 24

Charakterystyka ważniejszych rodzajów i gatunków drewna wykorzystywanych w łucznictwie tradycyjnym (JANKOWSKI 2005, CAMELOT 2008)

Drewno	Charakterystyka
Cis (<i>Taxus baccata</i> i <i>Taxus cuspidata</i>)	Tradycyjny średniowieczny materiał oraz współczesny na repliki angielskich <i>longbow</i> . Najlepsze drewno na łuki, stosunkowo lekkie i elastyczne. Mimo że łatwe w obróbce, wiele drobnych sęków sprawia, że wykonanie łuku wymaga sporych umiejętności.
Dęby (<i>Quercus</i> spp.)	Bardzo rzadko wykorzystywane jako materiał na łuki. Drewno jest bardzo twarde i ciężkie w obróbce. Głównym jednak powodem, dla którego nie wytwarzano łuków dębowych, było znaczenie kulturowe tych drzew. W czasach starożytnych dęby były uważane za drzewa święte. Są jednak dowody archeologiczne na to, że takich łuków używali przodkowie wikingów zamieszkujący tereny dzisiejszej Danii. Łuk dębowy miał mieć właściwości magiczne, z broni takiej można było zabić nie tylko wrogów, lecz także demony.
Hikora (<i>Carya ovata</i>)	Drewno pochodzenia północnoamerykańskiego, plastyczne i trwałe. Uznawane za jedno z najbardziej wytrzymałych gatunków na świecie. Nazwa <i>hickory</i> pochodzi z języka Indian i oznacza Drzewo-Łuk.
Jesion wymiosły (<i>Fraxinus excelsior</i>)	Tradycyjny średniowieczny materiał na łuki, bardzo twardy, elastyczny i sprężysty. Wyraźne słoje sprzyjają wyborowi odpowiedniego pnia, a ich czytelność ułatwia obróbkę. Łuk jesionowy ma tendencję do „układania się za cięciwą” (czyli po jej zgięciu pozostaje wygięty).
Klon cukrowy (<i>Acer saccharinum</i>)	Drewno bardzo trwałe i sprężyste, bardzo odporne na pełzanie i twarde. Do wyrobu łuków <i>longbow</i> było masowo używane przez Walijczyków, którzy cenili je na równi z wiązem. Nadaje się do wyrobu cienkich listewek naklejanych na grzbiety łuków wykonanych z innych gatunków drewna. Współcześnie stosuje się jako środkową warstwę oddzielającą laminaty z włókna szklanego.
Grochodrzew (<i>Robinia pseudacacia</i>)	Gatunek o najbardziej plastycznym i bardzo twardym drewnie (twardszym niż jesion i dąb). Takie zestawienie cech powoduje, że łuki akacjowe są odporne na złamania. Robinia została sprowadzona na stary kontynent w XVII wieku. Właściwości tego drzewa znali jednak Indianie Ameryki Północnej. Tam wykorzystuje się robinie do produkcji tradycyjnych łuków myśliwskich. Na grzbiet łuku o wąskich ramionach wykonanego z robinii nakleja się pasek wykonany z innego gatunku drewna. Podobnie jak jesion, układa się za cięciwą.
Wiąz (<i>Ulmus glabra</i>)	Drewno najbardziej, poza cisowym, popularne w średniowieczu. Niezwykle wytrzymałe z powodu bardzo włóknistej struktury.

Wiązy (górski i szypułkowy) niewiele ustępują właściwościami konstrukcyjnymi cisowi, są bardzo wytrzymałe i sprężyste. Wyrabiano z nich wszystkie rodzaje łuków, począwszy od płaskiego, a skończywszy na angielskim długim łuku. Jesion wyniosły był materiałem zastępczym w produkcji łuków. Jego wadą, oprócz mniejszej sprężystości i skłonności do deformacji plastycznej, było nieco trudniejsze wykonanie łuku.

Większość łuków, w tym wymienione długie łuki, starano się wykonać tak, aby od strony grzbietowej znajdowała się bielasta część drewna, natomiast od strony brzusca twardziel, nie było to jednak regułą. Przekrój drzewca łuku często był półokrągły lub zmienny: z półokrągłego w majdanie do płaskiego na ramionach. Deska przeznaczona na łuk musiała spełniać pewne rygorystyczne warunki: mieć równoległe i proste słoje, nie mieć sęków, mieć jak najwięcej słoii na 1 cm (co najmniej siedem), warstwy drewna późnego powinny być jak najcieńsze. Jej minimalne wymiary to: szerokość 60 mm, grubość 45 mm i długość 2000 mm, jednak im większe były te wymiary, tym łatwiej było wytrasować odpowiedni kształt łuku, omijając wady anatomiczne drewna. Łuk był wycinany, a następnie szlifowany. Do konserwacji łuków stosowano oleje roślinne. Końcowym etapem wytwarzania było profilowanie łuku polegające na nadawaniu mu odpowiedniego kształtu na specjalnym wzorniku.

Drewniana sprężyna płaska z łuku tradycyjnego w nowoczesnych łukach bloczkowych została zastąpiona układem bloczków, ramion i kompozytowych sprężyn spiralnych, z tradycyjnego łuku pozostała tylko cięciwa i strzała wyrzucana energią skumulowaną siłą ludzkich rąk w sprężanym materiale.

Można uznać, że łuk zapoczątkował całą serię kolejnych maszyn. O maszynach i ich pochodzeniu cytowany wcześniej WITRUWIUSZ (27-13 p.n.e.) pisze w dalszej części swojego traktatu: *A więc [nasi przodkowie] zaczęli czerpać wzory z natury, naśladując ją. W ten sposób ułatwiali sobie życie przez zastosowanie machin i instrumentów za pomocą ich obrotów, a gdy zauważyli, że coś nadaje się do użytku, starali się to stopniowo ulepszać przez badanie zasad działania i sztukę*¹²¹.

¹²¹ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *Cum ergo maiores haec ita esse animadvertissent, e rerum natura sumpserunt exempla et ea imitantes inducti rebus divinis commodas vitae perfecerunt explicationes. Itaque comparaverunt, ut essent expeditiora, alia machinis et earum versationibus, nonnulla organis, et ita quae animadvertenterunt ad usum utilia esse studiis artium institutis, gradatim augenda doctrinis curaverunt (De architectura, Liber X, Capitulum 1).*

3.2. Maszyny transportowe

Żaden wiatr nie sprzyja temu, kto nie ma wyznaczonego portu
(Michel de Montaigne, 1533-1592)¹²²

3.2.1. Okręty – największe w dziejach świata maszyny z drewna

Jedną z najstarszych dziedzin techniki jest sztuka budowania okrętów. Historia pływania za pomocą wykonanych samodzielnie lub zaadaptowanych do tego celu środków technicznych jest najprawdopodobniej równie stara, jak historia ludzkości. Już człowiek pierwotny pływał po rzekach i jeziorach, wykorzystując pnie drzew. Najpierw były one nieobrobione, później zaczęto je wydrążyć i zaokrąglić na końcach bądź też wiązać po kilka razem. Z wydrążonego pnia powstała łódź (tego typu łodzie dłubanki użytkuje się jeszcze do dzisiaj w wielu częściach świata), a ze związanych pni – tratwa. Pierwsze łodzie i tratwy poruszano i sterowano nimi, odpychając się najpierw drągiem od dna, później wiosłem, jeszcze później – rozpinając nad nim płachtę żagla. Przez tysiące lat, aż do XIX wieku, napędem coraz większych łodzi i statków były wiosła i żagiel.

Pierwsze łodzie pełnomorskie zbudowano co najmniej 40 000 lat temu, posłużyły one do kolonizacji Australii¹²³. Jak podaje SUWAŁA (2006), najstarszym zachowanym zabytkiem szkatniczym są pozostałości drewnianego wiosła, liczącego sobie około 10 000 lat. Wiek resztek dłubanki znalezionej w Szkocji określa się na 8000 lat. Dłubanka odkryta w Wiśle liczy sobie 6000-7000 lat.

Konstrukcja łodzi i statków zależała od dostępności materiałów, przeznaczenia jednostki, wiedzy i zdolności budowniczych, a także od warunków, jakie stawał wodny żywioł. We wszystkich rejonach świata pierwsze łodzie morskie oraz oceaniczne budowano z materiałów dostępnych lokalnie. Jeśli było dostępne, to wybierano drewno, a jeśli nie, to wykorzystywano np. trzcinę. Łódź trzcinowa była stosunkowo łatwa do wykonania, bowiem – w przeciwieństwie do drewna – trzcina nie wymaga obróbki skrawaniem, łodygi trzcinowe można było łatwo łączyć

¹²² MONTAIGNE (1996).

¹²³ Najstarsze szczątki ludzkie znalezione w Australii w osadach jeziora Mungo w 1974 roku, tzw. *Mungo Man* (znane również jako *Lake Mungo 3*), początkowo datowane na 53 000 lat, mają około 40 000 (NEW AGE FOR MUNGO MAN... 2003).

i formować w wymagane kształty. Jej niekorzystną cechą było jednak nasiąkanie wodą, dlatego w trakcie użytkowania łodzi istniała potrzeba jej częstego wyciągania i suszenia. Trzcinowe łodzie i tratwy używane są jeszcze dzisiaj we wschodniej Afryce, w rejonie Zatoki Perskiej i w Ameryce Południowej. Na rysunku 3-2 przedstawiono rekonstrukcję południowoamerykańskiej łodzi trzcinowej o wyporności 22 t wykonaną w ramach *The Lake Titicaca Reed Boat Project*.



Rys. 3-2. Rekonstrukcja południowoamerykańskiej łodzi trzcinowej (THE LAKE TITICACA... 2002)

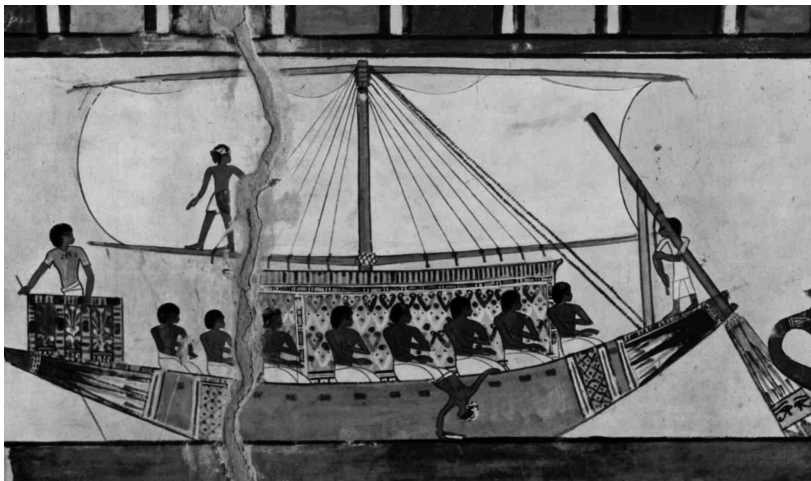
Pierwsze historyczne wzmianki o statkach (pomijając biblijną Arkę Noego) pochodzą z Egiptu (ok. 3500 lat p.n.e.). Z modeli, jakie zachowały się w grobowcach, oraz z rysunków i płaskorzeźb można wywnioskować, że pierwotnym budulcem statków egipskich był papirus, który dopiero w czasach późniejszych zastąpiono niewielkimi kawałkami drewna, a później importowanym wielkogabarytowym drewnem (SOBCZAK 1948).

Konstrukcje skorupowe, poszycie stykowe – statki egipskie

Ponieważ Egipt był niemal bezleśny, kadłuby statków drewnianych budowano z krótkich kawałków drewna cedrowego (*Cedrus* spp.) lub akacjowego (*Acacia* Mill.). Dziób i rufa były silnie zakrzywione do góry i wznosiły się wysoko nad wodą, a wypukłe dno statku podobne było do łyżki. Cedrowe deski poszycia obrabiano kamiennymi toporami i łączono na styk za pomocą kołków osadzonych w otworach wywierconych w wąskich płaszczyznach desek – połączenie wzmacniano linami z włókna palmowego, które po nasiąknięciu wodą ściągały deski. W późniejszym okresie, mimo że do budowy statków sprowadzano odpowiednie

wielkogabarytowe drewno z zagranicy, a wielkość okrętów znacznie wzrosła, sposób budowy pozostał niemal niezmienny. Żeby uzyskać odpowiednią wytrzymałość w kierunku wzdłużnym i zapobiec opadaniu mocno wygiętych końców, Egipcjanie stosowali grubą linę ciągnącą się górną od dziobu do rufy przez środek statku lub usztywniali okręt szeroko rozstawionymi odciągami masztu.

W XV wieku p.n.e. wytrzymałość i dzielność morską statków zostały zwiększone po wzmocnieniu kadłuba poprzecznymi belkami (*pokładnikami*), na których umieszczano pokład. Główny napęd stanowili wiosłarze, jednak podczas pomyślnego wiatru rozwijano żagiel pomiędzy dwoma rejami – górną i dolną. Maszt budowano w formie słupa utwierdzonego odciągami. Kadłuby statków egipskich wzmocniano cięgnami (nierazko oplatano cały kadłub sznurową siecią). Rufa często była zakończona rzeźbą kwiatu lotosu. Typowy okręt egipski z tamtego okresu przedstawia rysunek 3-3.



Rys. 3-3. Statek egipski (grobowiec w Sheikh Abd el-Qurna, 1422-1411 rok p.n.e.)

Na takich statkach z rozkazu królowej Hatszepsut około 1480 roku p.n.e. wypłynęła wyprawa pięciu żaglowców do tajemniczego Puntu, prawdopodobnie dzisiejszej Somalii, skąd przywiozła złoto, kość słoniową, mirrę i inne cenne towary. Egipcjanie z krajem tym mieli stosunki handlowe już za czasów faraona Sahure. Statki przedostały się z Nilu na

Morze Czerwone kanałem, który rozpoczęto kopać już w XX wieku p.n.e. (kanał ten został zniszczony w 767 roku n.e. za czasów władzy kalifów). Na statkach, które jeszcze nie miały stępki i nadal zachowały linię nadpokładową, ale miały już żebra i pokład, Egipcjanie żeglowali nawet do Indii. Relief z XV wieku p.n.e. przedstawiający wyprawę do Puntu zawiera rysunki okrętów o długości 22 m i szerokości 5 m wyposażone w kilkanaście wiosel. Z przodu znajdował się kapitan sondujący głębokość, a z tyłu sternik sterujący za pomocą dwóch dużych wiosel.

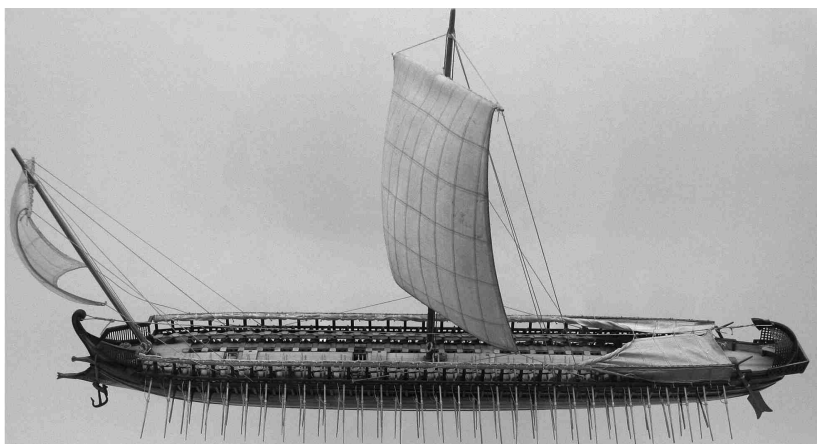
Wydaje się, że napęd wiosłowy odgrywał w starożytnej żegludze większą rolę niż prymitywne żagle, ponieważ bardzo wcześnie pojawiły się okręty poruszane za pomocą wiosel umieszczonych w dwóch, a nawet trzech rzędach jeden nad drugim. W końcu VI wieku p.n.e. trirema (trójrzędowiec), czyli okręt poruszany przez trzy rzędy wiosłarzy (gr. *τρίρης*, łac. *triremis*), stała się podstawową grecką jednostką bojową. Z czasem okręty wiosłowe okazały się zupełnie nieprzydatne – ich miejsce zajęły żaglowce, wymagające mniejszej załogi i mogące zabrać więcej ładunku.

Około VII wieku p.n.e. konstrukcja okrętów zmieniła się. Zmiany konstrukcyjne zapoczątkowali najprawdopodobniej Fenicjanie. Na największych starożytnych statkach zaczęto instalować do 15 wiosel na każdej burcie – pojawiły się okręty wielorzędowe. Rysunek 3-4 przedstawia asyryjski okręt o konstrukcji zbliżonej do okrętów egipskich, z dwoma rzędami wiosłarzy na każdej burcie. Jak widać, zrezygnowano z masztu, a okręt wyposażono w taran i pomost bojowy.



Rys. 3-4. Asyryjski okręt wojenny z VII wieku p.n.e.

W kolejnych wiekach Grecy udoskonaliли i zwiększyli wymiary fenickich okrętów wiosłowych, nie wprowadzając jednak istotnych zmian konstrukcyjnych. Początkowo Grecy budowali małe okręty jednorzędowe z masztem składanym, na którym rozpinano żagiel tylko w razie wiatru od rufy. Na przełomie VI i V wieku p.n.e. rozwinął się w Grecji typ okrętu wiosłowego o trzech rzędach wiosel – słynna triera ateńska. Jej konstrukcja i proces budowy różniły się zasadniczo od średniowiecznych galer weneckich. Grecy budowali najpierw burty, tworząc skorupę, którą później wzmacniali żebrami. Jako materiał konstrukcyjny preferowali gatunki iglaste (początkowo sosnę i jodłę, później również modrzew, który razem z klonem stosowano do budowy wewnętrznych części okrętu). Największe ateńskie triery miały do 40 m długości i do 6 m szerokości, wysokość kadłuba wynosiła około 3 m, z czego mniej więcej połowa była zanurzona. Po bokach okrętu znajdowały się trzy rzędy otworów na wiosła, przypuszczalnie czterometrowej długości. W górnym rzędzie triery znajdowało się 31 wiosel, a w dwóch dolnych po 27, całkowita liczba wiosłarzy wynosiła 170 osób¹²⁴ (SOBCZAK 1948). Rekonstrukcję ateńskiej triery przedstawiono na rysunku 3-5.



Rys. 3-5. Model ateńskiej triery

¹²⁴ Słynna rzymska *Quinquerema* (pięciorzędowiec) z IV wieku p.n.e. była właściwie *triremą* (trójrzędowcem), przy dwóch górnych rzędach wiosel sadzano po dwóch wiosłarzy. Liczba wiosłarzy *Quinqueremy* wynosiła: 58 w górnym rzędzie, 58 w środkowym i 34 w najniższym – razem 300 osób.

Ze względu na ciasnotę i ograniczoną liczbę wiosłarzy niemożliwe było stosowanie kilku zmian przy wiosłach, dlatego też zasięg pływania triery i jej szybkość nie mogły być duże. Z przekazów historycznych wiadomo, że maksymalna szybkość trier wynosiła kilkanaście kilometrów na godzinę i to na względnie krótkich odcinkach. Historyk grecki Tukidydes (ok. 465-ok. 398 p.n.e.) podaje, że jedna z trier ateńskich przebyła odległość równą 268 km w ciągu doby, co dawałoby bardzo dobrą średnią prędkość 3,1 m/s (11,1 km/h). Inny historyk grecki – Ksenofont (430-ok. 355 p.n.e.) – pisze o trierze, która przez dłuższy czas płynęła z szybkością 4 m/s (ponad 14 km/h). Najprawdopodobniej był to jednak jednorazowy wyczyn.

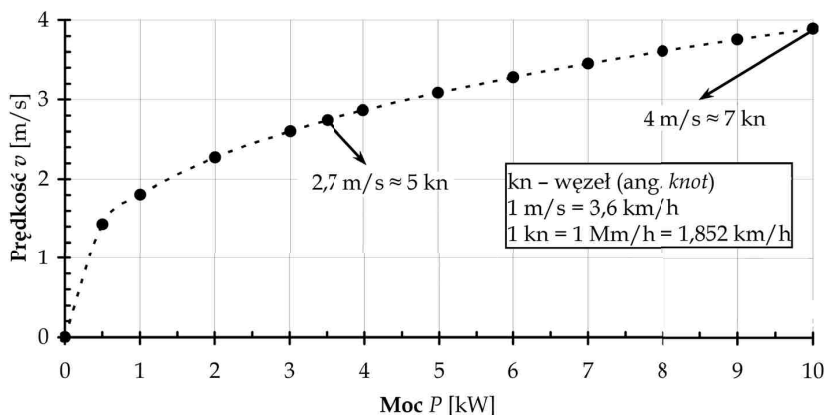
Moc człowieka da się określić jako 1/10 konia mechanicznego (SKWARCZYŃSKI 1925, HARRISON 1939). Można więc przyjąć, że 170 wiosłarzy triery mogło wygenerować ciągłą moc rzędu 12,5 kW. Jeśli się założy, że sprawność napędu (sprawność wiosłowania) wynosi około 80%, to można przyjąć, że do napędu galery była użytkowana moc mniej więcej 10 kW. Opór stawiany kadłubowi przez ośrodek wodny (tzw. *opór hydrodynamiczny wzdłużny* – działający równolegle do osi symetrii statku i przeciwdziałający ruchowi do przodu) można z dużym przybliżeniem określić prostą metodą E.E. Papmiela (metoda ta jest efektem empirycznym badań modeli kadłubów w basenie doświadczalnym). Znając średnią prędkość maksymalną możliwą do utrzymania przez dłuższy czas ($v = 14$ km/h, czyli ok. 4 m/s) oraz odpowiadającą tej prędkości moc napędu ($P = 10$ kW), wartość oporu c_p można odczytać z wykresu Papmiela:

$$c_p = 0,17 \left[\frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^2} \right]$$

Odczytana wielkość oporu pomija wpływ ośrodka powietrznego i nosi nazwę *oporu holowania*. Obejmuje opory: falowy, tarcia, ciśnienia oraz opory dodatkowe. Odnosi się to do wody spokojnej (brak falowania). Po dokonaniu prostych przekształceń znanych zależności między mocą, prędkością i energią kinetyczną można wyprowadzić zależność na szacunkową prędkość w funkcji mocy dla triery (moc w kilowatach):

$$v = \sqrt[3]{\frac{P}{c_p}}$$

Powyższą zależność przedstawiono graficznie na rysunku 3-6. Analizując wykres, można stwierdzić, że stosunkowo niewielka moc, około 3,5 kW,



Rys. 3-6. Zależność pomiędzy mocą napędu a prędkością triery

możliwa do wytworzenia przez 1/3 wiosłarzy, zapewniała średnią prędkość triery około 2,7 m/s (niecałe 5 węzłów).

Gdyby nie trudności w aprowizacji licznej załogi, triera mogłaby dość sprawnie pokonywać duże odległości dzięki wiosłarzom wiosłującym na trzy zmiany. W praktyce okręt tego typu musiał co dwa - trzy dni zawijać do portu celem uzupełnienia zapasów wody i aprowizacji. Galery pływały głównie przy brzegu.

Żeglarze na starożytnych statkach używali jako steru pionowo ustawionych wiosł bądź drewnianej pletwy sterowej, umieszczanych od strony prawej burty (zwanej sterburtą). Dopiero w średniowieczu, około XIII wieku, ster został przeniesiony z prawej burty na tył okrętu i umieszczony w osi symetrii kadłuba.

Konstrukcje skorupowo-szkieletowe, poszycie zakładkowe - okręty europejskie

W Europie we wczesnym średniowieczu nie sporządzano planów ani projektów statków. Ostateczna forma każdego średniowiecznego europejskiego statku w przypadku każdego konstruktora była inna. Nie zachowały się żadne kompletne szczątki wczesnych okrętów, dlatego dziś można odtworzyć jedynie hipotetyczny wygląd okrętu morskiego z tamtego okresu, poza ikonografią i pieczęciami nie istnieje bardziej rozbudowany opis tych jednostek. Przy braku ścisłych projektów i przy pewnej dowolności trzymano się jednak wypracowanych ogólnych zasad budowy okrętu, np. stosowano proporcje wymiarowe kadłuba

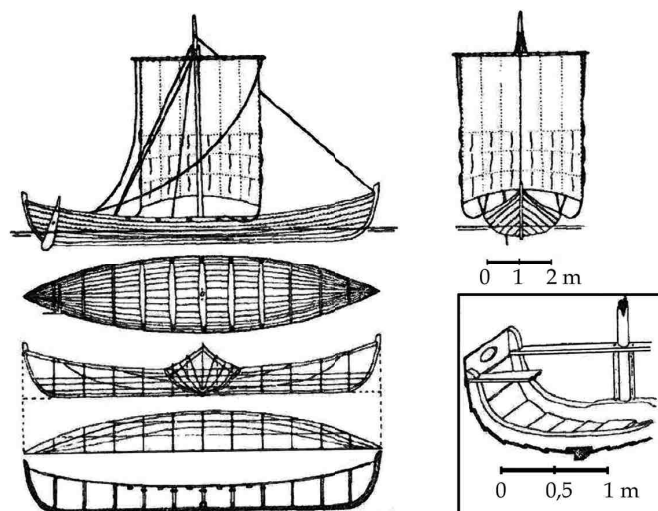
w formie 3:2:1 (3 – długość kadłuba, 2 – długość stępki, 1 – szerokość kadłuba).

Okręty wczesnośredniowieczne, podobnie jak duże współczesne jednostki oceaniczne, były konstrukcjami skorupowo-szkieletowymi. Szkielet tworzyły: stępka, nadstępka, wręgi¹²⁵, poprzeczne belki usztywniające, dziobnica i tylnica, natomiast poszycie było zbudowane w formie skorupowej z długich desek¹²⁶ układanych na zakładkę (tzw. *poszycie zakładkowe* lub *klinkierowe*). Budowę zwykle rozpoczynano od ułożenia stępki, do której przymocowywano dziobnicę (stewę dziobową) i tylnicę (stewę rufową). Następnie układano poszycie burt z długich desek (klepek). Pierwszą klepkę na stępce umieszczano w rowku wykonanym w jej górnej części, jedną lub dwie kolejne klepki układano na styk, resztę na zakładkę. Jako uszczelnienie stosowano mech, wełnę owczą lub końskie włosie. Budowaną jednostkę poszywano nieco ponad wysokość konstrukcyjnej linii wodnej i dopiero na tym etapie dokonywano pierwszego poprzecznego usztywnienia kadłuba, polegającego na zamocowaniu bardzo charakterystycznych dla tego okresu elementów – poprzecznych belek usztywniających (zazwyczaj czterech – sześciu). Końce tych belek wystawały ponad zewnętrzną część poszycia, ściągając je ku środkowi (na bokach znajdowały się nieociosane gałęzie służące zakotwiczeniu belek o klepki poszycia). Po ukończeniu poszycia burt konstrukcję uzupełniano o dodatkowe elementy usztywniające – denniki, wręgi oraz nadstępkę, w której znajdowało się gniazdo masztu. Wręgi były mocowane do poszycia kołkami. Funkcję pokładników (elementów podtrzymujących pokład) pełniły belki układane wzdłuż osi okrętu. Na pokładnikach układano poprzeczne klepki pokładu, które mogły być wyjmowane, dzięki czemu uzyskiwano łatwy dostęp do ładowni.

Słowianie budowali statki zbliżone do statków skandynawskich, były one jednak od nich krótsze i bardziej płaskie różniły się też kształtem dziobu i rufy. Nie były wprawdzie tak łatwe w manewrowaniu jak łodzie wikingów, były za to stabilniejsze i bezpieczniejsze na wzburzonym morzu (TARAS i TRZCIŃSKI 2008). Według reliefu z drzwi katedry gnieźnieńskiej z XII wieku na dziobnicy i tylnicy statków znajdowały się zdobienia w kształcie głów węży lub smoków. Maszt był przymocowany do środkowej wręgi za pomocą specjalnego drewnianego złącza (rys. 3-7), a żagle

¹²⁵ Wręga – zebro sosnowe lub dębowe w statku wodnym, zwykle z krzywej gałęzi lub większego konaru tukowato wyrobione (GLOGER 1900-1903, t. IV, s. 467).

¹²⁶ Tzw. *planek* – klepek kadłuba i pokładu o długości równej długości statku.



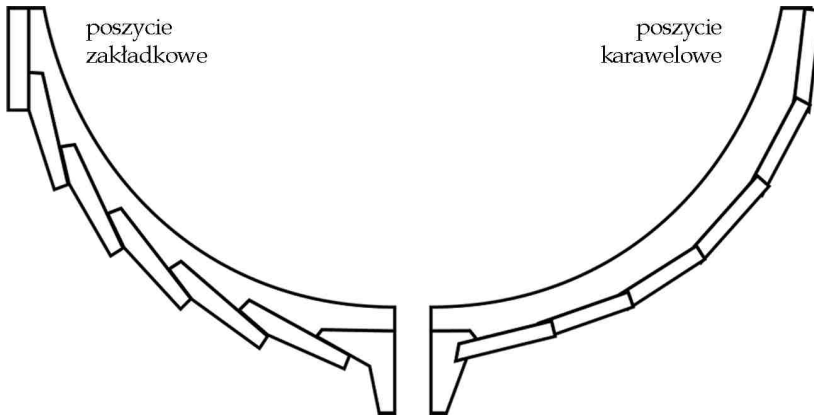
Rys. 3-7. Rekonstrukcja okrętu słowiańskiego (IX wiek)

sporządzano wyłącznie z płótna. Za ster służyło szerokie wiosło, a koticę tworzył przewiercony kamień, osadzony niekiedy w drewnianej ramie. Duże handlowe łodzie słowiańskie, zwane *korabami*, były szersze i miały większe zanurzenie od *vindaskipów* (od nazwy Wenedowie), czyli słowiańskich okrętów. Inne, mniejsze jednostki (*dziesiątki*, *dwudziestki*) były używane na wodach przybrzeżnych i rzekach.

Kazimierz Ślaski w opracowaniu *HISTORIA POMORZA* (1969) rozróżnił trzy typy drewnianych łodzi słowiańskich stosowanych na Bałtyku w okresie od IX do XIII wieku. Do pierwszej kategorii zaliczył łodzie wojenne (*naves loagane*), szybkie i smukłe, odznaczające się płytszym zanurzeniem. Były one mniejsze niż łodzie wikingów, lecz według kronikarza duńskiego Saxo Grammaticusa z XI wieku mogły zabrać na pokład 44 mężczyzn i jednego konia. Głównym ich napędem były wiosła. Nie udało się dotychczas odnaleźć łodzi, o których mówią podania, a które byłyby wielkością porównywalne z *langskipami* wikingów. Niewiele różniły się od nich łodzie drugiej grupy, służące do celów transportowych i handlowych. Były nieco szersze, miały głębsze zanurzenie, a oprócz wiosel miały maszt i żagiel. Trzeci typ stanowiły rozmaite czółna rybackie, zarówno dłubanki z jednego pnia, jak i wyposażone w kil.

Połączenie konstrukcji szkieletowej i poszycia stykowego

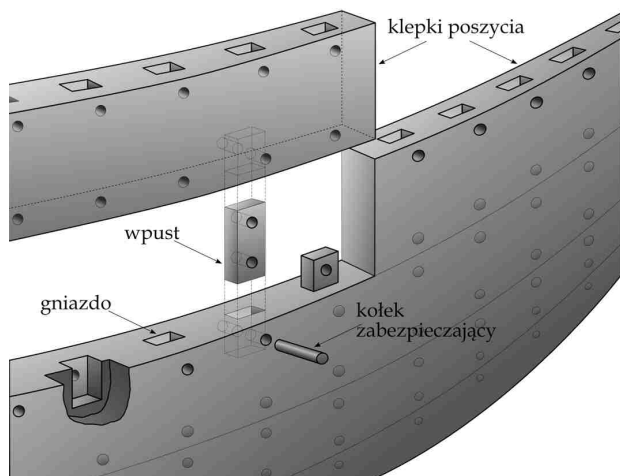
W krajach basenu Morza Śródziemnego opracowano inną koncepcję budowy statków – budowę szkieletową, odmienną od skorupowej, jaką stosowano w Europie Północnej. Weneckie galery miały poszycie stykowe (karawelowe, zwane również klepkowyn – rys. 3-8), co w połączeniu z lekką budową szkieletową dawało dobre właściwości hydrodynamiczne.



Rys. 3-8. Porównanie poszycia zakładkowego stosowanego w Europie Północnej z poszyciem karawelowym stosowanym w krajach basenu Morza Śródziemnego

Dwie główne cechy konstrukcyjne (poszycie stykowe i konstrukcję szkieletową) po raz pierwszy połączyli i wykorzystali mieszkańcy Wenecji i Genui, jednak najsłynniejsze okręty o konstrukcji szkieletowej to XV-wieczne hiszpańskie i portugalskie karawele. Podstawowymi elementami szkieletu karaweli były: stępka (kil) – główna belka konstrukcyjna jednostki, dwie stewy (dziobowa i rufowa), stanowiące przedłużenie stępki, oraz wręgi, odchodzące od stępki na boki i do góry. Pewna liczba wręgów, połączona w górnej części podłużnymi belkami, była łączona w początkowym etapie budowy w zamkniętą trwałą ramę. W kolejnych etapach budowy w razie potrzeby szkielet był jeszcze uzupełniany dodatkowymi wręgami i dennikami.

Poszycie karawelowe, umocowane na szkielecie przenoszącym obciążenia eksploatacyjne, było zespolone za pomocą wpustów zabezpieczonych kołkami (rys. 3-9).



Rys. 3-9. Konstrukcja poszycia karawelowego

Ponieważ idealne dopasowanie klepek było niemożliwe (ze względu na kształt kadłuba, a zwłaszcza zmiany szerokości klepek pod wpływem wody), styk klepek musiał być uszczelniany różnymi metodami, a pełną szczelność poszycie osiągało dopiero po nasiąknięciu wodą. Pozorna prostota poszycie stykowego w rzeczywistości wymagała ogromnego doświadczenia w projektowaniu układu klepek, doborze drewna i samym poszywaniu kadłuba. Drewno musiało być bardzo długo sezonowane, ale nie mogło być nadmiernie wysuszone. W najbardziej rozwiniętej postaci poszycie stykowe składało się ze stosunkowo wąskich klepek mahoniowych, tekowych lub dębowych, dopasowanych kształtem i krzywizną do kształtu kadłuba, uszczelnionych za pomocą szczeliwa bawełnianego lub konopnego. Sam proces uszczelniania był bardzo pracochłonny i wymagał bardzo wysokich kwalifikacji, ponieważ pracujące w warunkach zmiennej wilgotności klepki przy zbyt mocnym ubiciu szczeliwa mogły popękać lub nawet zniszczyć wręgi, natomiast zbyt słabo ubite szczeliwo nie spełniało swojej roli.

W luksusowych jachtach XIX i pierwszej połowy XX wieku poszycie stykowe było dzięki użyciu najlepszej jakości materiałów i bardzo pracochłonnemu wykończeniu niezwykle efektowne i dosyć trwałe. W porównaniu z poszyciem zakładkowym miało dużo lepsze właściwości hydrodynamiczne, ale było niezbyt wytrzymałe mechanicznie i wymagało starannej i pracochłonnej konserwacji. Obecnie poszycie stykowe

w klasycznej postaci jest praktycznie niestosowane, nawet w replikach historycznych jednostek, i jest zastępowane przez odmiany poszycia zakładkowego lub wręcz imitowane przez atrapy klepek z obłogów.

Średniowiecze przyniosło coraz większą przewagę żagla jako napędu statków. Wraz z rozwojem napędu żaglowego w Europie nastąpił przyspieszony rozwój szkutnictwa stymulowany odkryciami geograficznymi. Pojawienie się karaweli, jednopokładowego, dwu- lub trójmasztowego żaglowca o wysokich nadbudówkach dziobowej i rufowej, pozwoliło zdobywać morza i oceany. Wzrastała wyporność okrętów. Obok wojennych pojawiało się coraz więcej żaglowych statków handlowych. W XV wieku wyporność największych okrętów przekroczyła 300 t. Era dużych żaglowców rozpoczęła się w XVI wieku, w czasach merkantylizmu, od wielomasztowych i wielopokładowych galeonów (tab. 25).

Od zbudowania pierwszych konstrukcji łodzi problemem było ich odpowiednie uszczelnienie i zabezpieczenie drewna przed niekorzystnym wpływem wody. Prehistorycznym sposobem zabezpieczenia łodzi było suszenie, a następnie zwęglanie zewnętrznej powierzchni poszycia (STIEBER 1922). Od czasów starożytnych stosowano olej lniany lub tran do impregnacji drewna. Jednym z najstarszych służących temu celowi środków była również smoła drzewna¹²⁷ lub mieszanina smoły i dziegciu¹²⁸, używana również do uszczelniania poszycia. Barwa jej była w zasadzie czarna, jednak mogła być szara – zależnie od stopnia rozcieńczenia tłuszczem zwierzęcym.

W czasach rzymskich stosowano już podwójne poszycie w ten sposób, że pokrywano szkielet okrętu oszalowaniem zewnętrznym i wewnętrznym, wypełniając szczeliny między deskami kalafonią lub sierścią zwierzęcą nasyconą smołą. Tych samych materiałów używano przy uszczelnianiu poszycia wewnętrznego. Dna statków zaczęto pokrywać w tym czasie cienkimi płytami z ołowiu lub cyny. Stosowano również

¹²⁷ Smoła otrzymywana przy rozkładowej destylacji drewna iglastego i liściastego (również kory i karpiny) (LEKSYKON NAUKOWO-TECHNICZNY... 1989).

¹²⁸ *Dziegieć* – rodzaj smoły drzewnej (tzw. prasmoły lub smoły niskotemperaturowej) otrzymywanej z kory brzoźowej przez wytłewanie (czyli rozkładową destylację) zwykle w temperaturze około 500-600°C. Ciecz ciemnobrunatna o ciężarze właściwym 1,05-1,18 kg/dm³, mieszanina związków fenolowych (krezot), węglowodanów i terpenów. Stosowano go jako smar do piast kół, środek impregnujący liny i skóry, klej do mocowania grotów strzał, maź, do której w pastkach (pułapkach) przyklejały się ptaki, a także jako uniwersalny klej i uszczelniacz (BRZEZIŃSKI i IN. 1990, AMBROSIEWICZ 2002).

Tabela 25

Rozwój konstrukcji ważniejszych typów drewnianych okrętów europejskich

Nazwa	Okres	Opis
Galera	VI w. p.n.e.- -V w. n.e.	Grecka i rzymska, wiosłowa i żaglowo-wiosłowa, konstrukcja stykowa (najpierw budowano poszycie, później szkielet).
Korab	(V) IX-XIII w.	Słowiański, konstrukcja zakładkowa (opis na s. 124-126).
Galera	do XV w.	Wenecka (najpierw budowano szkielet, później poszycie).
Langskip	VI/VII-XI w.	Normański, poszycie zakładkowe, stosunek długości do szerokości - 7:1, długość do 45 m (tzw. <i>drakkar</i>).
Koga/Holk	XI/XII- -XIV/XV w.	Północnoeuropejski jednomasztowy płaskodenny żaglowiec. Poszycie zakładkowe z desek ciosanych (do linii wodnej - stykowe). W kodze elbląskiej po raz pierwszy w historii tych statków - ster zawiasowy (1350), z kogi wyewoluował holk (do 300 t wyporności). Dwie szkoły budowy: hanzeatycka i gdańsko-elbląska.
Karawela	XV-XVII w.	Zachodnioeuropejski jednopokładowy, dwu- lub trójmasztowy żaglowiec o wysokich nadbudówkach na dziobie i rufie, poszycie stykowe, ożaglowanie tylko lacińskie (skośne) - później mieszane (rejowe i lacińskie).
Karraka	XV-XVI w.	Śródziemnomorski trzy-, rzadziej czteromasztowy żaglowiec. Pierwsze europejskie statki oceaniczne. Około 800 t wyporności. Z karraki rozwinął się galeon.
Galeon	XVI-XVII w.	Śródziemnomorski trzy-, rzadziej czteromasztowy żaglowiec. W porównaniu z karraką - smuklejsze kształty kadłuba; 600-700 t wyporności.
Fregata	XVIII w.	Żaglowa i parowo-żaglowa, 3-4 maszty, 1000-2000 t.
Klipper	XIX w.	Żaglowy, 3-4 maszty i ożaglowanie dodatkowe, 1000 t, smukłe i wąskie kadłuby, 50 m długości i 10 m szerokości.

malowanie dna wapnem, które w tym wypadku miało barwę niebiesko-białą. Karaki Vasco da Gamy (1469-1524), *São Gabriel* i *São Rafael*, zaprojektował i zbudował w 1497 roku inny znany podróżnik - Bartolomeu Dias (1450-1500). Według zapisków uszczelniono je pakułami z tłuszczem i niegaszonym wapnem (!), co miało zapobiec toczeniu drewna przez świdraki¹²⁹, gdyż: *Najzawziętym wrogiem materiałów zanurzanych w sło-*

¹²⁹ Świdrak okrętowiec (łac. *Teredo navalis*) - małż morski o wydłużonym, miękkim ciele (o długości około 200 mm i średnicy około 8 mm), wyposażony w muszlę; żyje na drewnianych palach, słupach, kadłubach łodzi i statków, drążąc skomplikowane

nej wodzie jest owad „*Teredo navalis*”. Owad ten rozmnaża się z przestraszającą szybkością i przedziurawia najzupełniej dna statków (STIEBER 1922, s. 133). Od wewnątrz styki klepek zabezpieczano listwami, na zewnątrz – ołowianą blachą, a dna i burty statków pokrywano mieszaniną smoły (najprawdopodobniej dziegiu), loju i tranu¹³⁰. Żelazne gwoździe i ołowiana blacha pod wpływem wody morskiej ulegały zjawisku korozji elektrolitycznej, która niszczyła zarówno drewniany kadłub, jak i jego metalowe części. Poza tym obicie metalowe znacznie obciążało drewniany okręt, zmniejszając jego ładowność (SOBCZAK 1948).

Aż do końca XVIII wieku dość nieskutecznie walczono ze świdrakami i innymi gatunkami flory morskiej powodującymi biokorozję klepek poszycia dna i burt poniżej linii wodnej. Przez pewien czas używano, podobnie jak w starożytnym Rzymie, blachy ołowianej, później zaczęto stosować pasy blachy miedzianej. Blacha miedziana faktycznie chroniła przed pasożytami, ale w błyskawicznym tempie korodowały żelazne śruby i nity. Trzeba je więc było zastąpić miedzianymi. Miedziana blacha zmniejszyła obrastanie dna wodorostami, tym samym wzrosła średnia prędkość okrętów. Dodatkowym zabezpieczeniem przed wodnymi pasożytami, wodorostami i muszlami była rdza pochodząca ze stalowych gwoździ, którymi przybijano poszycie do szkieletu (poszycie karawelowe, diagonalne). Gwoździe miały specjalne, bardzo szerokie łebki, uodpornione odpowiednimi zabiegami na zbyt szybką korozję. Wbijano je w poszycie co kilka centymetrów. Rdza, która je powoli pokrywała, rozszerzała się na całą powierzchnię drewnianego kadłuba.

Protoplasta angielskich liniowców, galeon *Ark Royal* zbudowany w 1587 roku, miał kadłub impregnowany mieszaniną oleju, tranu, żywicy i terpentyny. Zbudowany nieco wcześniej (1571) polski galeon *Smok* (znany też jako *galeona Zygmunta Augusta*) miał spoiny klepek burtowych i pokładowych *udychtowane* włóknem z konopi, a całość smołowano na gorąco i zużyto do tego celu 36 beczek smoły.

chodniki; potrafi trawić celulozę; łatwo się rozmnaża; powodował znaczne szkody w drewnianych okrętach (ŚWIDRAKI... 2008).

¹³⁰ O zastosowaniu tranu, wapna, powierzchniowym zwęglaniu, pokrywaniu dna statków płytami miedzianymi i nabijaniu gwoździami pisze Stieber w 1922 roku jako o sposobach przestarzałych. Zaleca nasycanie drewna terem metodą Rüpinga: *Nienasycone buczyny wytrzymują w słonych wodach lat trzy, sośniny lat siedm, dębiny lat dwanaście, nasycone lat 30, 15, 20. [...] długi czas, bo do roku 1905 nasycano drewna świeże wyłącznie siarczanem miedzi. Dopiero gdy wynaleziono sposób nasycania oszczędnościowego „Rüping Rüdger” okazało się że ter jest stosunkowo środkiem najlepszym* (STIEBER 1922, s. 134-135).

Uszczelnianie pakułami spoin w drewnianym kadłubie, a później zalanie ich smołą było procesem skomplikowanym. Najpierw przygotowywano pakuły lub targan. Na dawnym żaglowcu robiło się je z nitek mozolnie wyciąganych ze starych, zużytych lin konopnych lub manilowych. Była to stara, tradycyjna kara w marynarce wojennej: skazany na uwięzienie marynarz musiał wysupłać funt pakuł dziennie. Było to również zajęcie dla wielu starych, niedołączonych ludzi w wytwórniach lin na lądzie. Przy uszczelnianiu pracowało zawsze dwóch ludzi. Jeden przykładał do spoiny tzw. *uszczelniak*, rodzaj szerokiego dłuta, a drugi w odpowiednim momencie uderzał w nie ciężkim, dębowym młotem, zwanym *ubijakiem*, i wbijał pakuły w szew.

W połowie XIX wieku cała europejska flota wojenna i handlowa, licząca ponad 40 000 jednostek, była uzależniona od dostępności drewna sosnowego do wyrobu masztów i dębiny na kadłuby. Na jeden okręt liniowy¹³¹, którego żywotność szacowano na 15-20 lat, trzeba było przeznaczyć około 11 300 m³ drewna najwyższej klasy. W tym czasie znacząca część potęgi armady elżbietańskiej opierała się na surowcu drzewnym pochodzącym z etnicznych ziem polskich. Rosja, rozbudowująca swoją flotę, sięgnęła po drewno z Puszczy Białowieskiej. Ukazem cara Mikołaja I z 1838 roku nakazano wyrąbać tam i spławić do Kronsztadu 2135 dębów, 215 sosen masztowych oraz 700 sosen na poszycie tratw dębowych. Tyle drzew wymagały tylko dwa okręty liniowe (!). Najlepsze drzewostany dębowe, sosnowe i jesionowe znajdujące się w pobliżu spławnych rzek nazywano *gajami okrętowymi* (PUDLIŚ 2005). Intensywny wyrąb surowca drzewnego trwał do lat osiemdziesiątych XIX wieku.

Era żaglowców zakończyła się w latach sześćdziesiątych XIX wieku z chwilą wprowadzenia okrętów z napędem parowym. Zmiana rodzaju napędu zbiegła się w czasie ze zmierzchem zastosowania drewna w budowie okrętów. Francuski pancernik *La Gloire* (zwodowany w 1859 roku, wyporność 5630 t) był pierwszym opancerzonym stalowymi płytami okrętem, natomiast brytyjski HMS *Warrior* (zwodowany w 1860 roku, wyporność 9200 t) – pierwszym wielkim okrętem o całkowicie metalowym

¹³¹ Najsilniejsze okręty, zdolne do walki w szyku liniowym (szyk najodpowiedniejszy w walce artyleryjskiej), nazywano *okrętami linii* (ang. *ship of the line*), skąd powstała nazwa *okręt liniowy* lub *liniowiec*. Były to drewniane okręty żaglowe o wyporności do 2500 t. Pierwsze okręty liniowe pojawiły się w II połowie XVII wieku, kiedy to głównym sposobem walki morskiej przestał być abordaż, a stał się pojedynek artyleryjski.

kadłubie. Pierwsze parostatki, szczególnie niewielkie rzeczne, budowano aż do początku XX wieku z drewna.

Wyjątkowo niezwykle zastosowanie drewna planowali Anglicy w 1943 roku. W ramach *Project Habakkuk* autorstwa Geoffreya Pyke'a opracowano plan budowy lotniskowca o długości 610 m, szerokości 91 m i wysokości 61 m. Jego planowana wyporność to 2 000 000 t (!). Monstrualnych rozmiarów statek miał być wykonany z tworzywa konstrukcyjnego o nazwie *pykrete* wynalezionej przez Maxa Perutza. Pykrete (lub *picolite*) składał się w 86% z lodu i w 14% z trocin (lub pulpy drzewnej – czyli spłśnionych parą włókien drzewnych). Materiał miał wytrzymałość na ściskanie około 25 MPa¹³². Burtę lotniskowca, o grubości 12 m, planowano chłodzić sprężarkowym systemem chłodniczym, zewnętrzne i wewnętrzne części burt miały być dodatkowo izolowane gumą i płytami z tworzyw sztucznych. Przystąpiono do badań modelowych na jednostce wykonanej z bloków lodu umieszczonych w drewnianej ramie, gdzie burty i pokład były pokryte warstwą izolacji termicznej. Zwodowany na kanadyjskim jeziorze Patricia w stanie Alberta model miał długość 18 m i szerokość 9 m. Z uwagi na trudności technologiczne (głównie z chłodzeniem, podatnością na wykruszenia, dużą masą własną i związaną z tym niewielką manewrowością), które pojawiłyby się w zwiększonej skali na obiekcie o wyporności 2 000 000 t, duże przewidywane koszty oraz sprzeciw premiera Churchilla zaniechano kontynuacji projektu (COLLINS 2002).

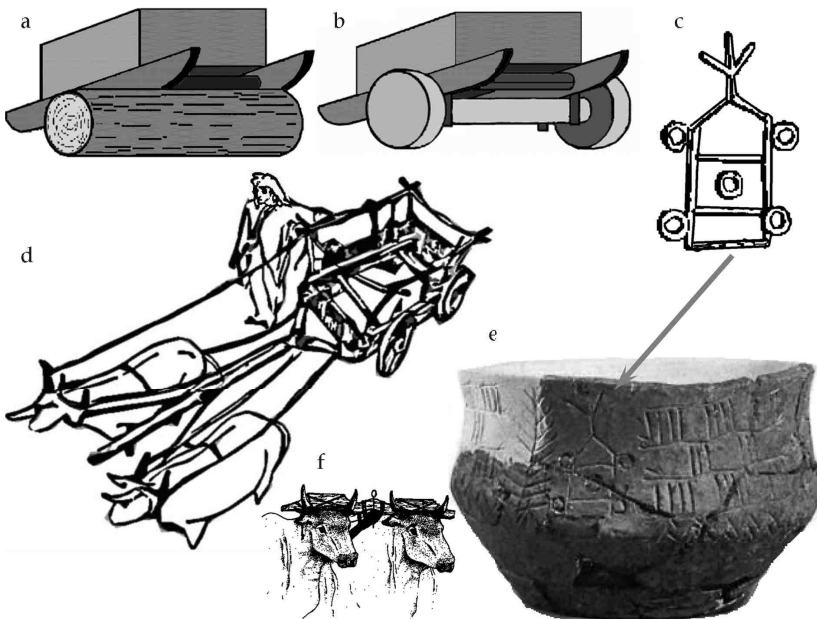
Największym na świecie współczesnym okrętem o drewnianej strukturze jest *Al-Hashemi-II* (Kuwejt) – ma 83,7 m długości i 18,5 m szerokości. Statku tego jednak nigdy nie odważono się zwodować, jest użytkowany na brzegu, jako muzeum i restauracja.

3.2.2. Pojazdy

Pierwszym pojazdem lądowym w historii ludzkości były sanie. Ten rodzaj drewnianej maszyny transportowej był wykorzystywany zarówno zimą, jak i latem do przemieszczania ciężarów (latem zmniejszano tarcie, lejąc pod płozy wodę). Bezpośrednim przodkiem pojazdu kołowego najprawdopodobniej były właśnie udoskonalone sanie, tzw. *tragi*

¹³² Dla porównania: wytrzymałość drewna na ściskanie mieści się w dość szerokich granicach. W zależności od gatunku wynosi: wzdłuż włókien – 16-88 MPa (gatunki liściaste) i 23-34 MPa (gatunki iglaste), a w poprzek włókien – 4,3-6,3 MPa.

na szpuli¹³³ (rys. 3-10 a, b), które mogły powstać w wyniku usprawnienia metody transportu ciężkich ładunków stosowanej przy budowie obiektów megalitycznych, polegającej na podkładaniu okrągłaków pod płozy (rys. 3-10 a). Ze względu na dużą przydatność takiego rozwiązania było ono stopniowo udoskonalane, co doprowadziło do zbudowania wozu dwu- i czterokołowego z obrotowymi osiami (rys. 3-10 d).



Rys. 3-10. Pierwsze pojazdy: a – pojazd o obrotowej osi, b – tragi na szpuli, c – jeden z piktogramów wozu z wazy BR III z Bronocic, d – rekonstrukcja wozu i zaprzęgu przedstawionego na piktogramie, e – waza BR III z Bronocic (lata 3491-3060 p.n.e.), f – jarzmo przyroźne (a, b – SYDOR 2007, c, e – na podstawie INSTYTUTU ARCHEOLOGII... 2007, d – na podstawie MILISAUSKASA i KRUKA 1991)

Zastosowanie koła w transporcie jest osiągnięciem całkowicie oryginalnym – natura nie stosuje koła do poruszania się. Autorem koncepcji

¹³³ Wehikuly składające się z *trag* (*traga* – platforma sań, na której spoczywa ładunek), zaopatrzone w dwa gniazda na każdą oś (od spodu). *Traga* każdą parą gniazd współpracuje z jedną *szpulą*. *Szpula* to pewnego rodzaju oś tworząca całość z kołami i przypominająca nieco zestaw kołowy stosowany w kolejnictwie. Dzięki wspomnianym gniazdom *szpula* nie wyjeżdżała spod *trag* (opis na podstawie MOSZYŃSKIEGO 1967).

transportu kołowego najprawdopodobniej nie był jeden neolityczny wynalazca, a proces twórczy przebiegał w sposób ewolucyjny. Do niedawna przyjmowano, że koło zostało wynalezione około 5000 lat temu na Bliskim Wschodzie (Mezopotamia)¹³⁴, jednak znaleziska archeologiczne z połowy lat siedemdziesiątych XX wieku wskazują, że mogło to nastąpić kilkaset lat wcześniej (w pierwszej połowie IV tysiąclecia p.n.e.) w Europie Środkowej (!). Mogą o tym świadczyć następujące europejskie znaleziska archeologiczne: (1) rysunki wozów wyryte na naczyniu ceramicznym oznaczonym *BR III* z Bronocic w województwie świętokrzyskim (lata 3491-3060 p.n.e.), (2) ornament na naczyniu ceramicznym symbolizujący przypuszczalnie wóz czterokołowy (Ostrowiec Świętokrzyski – druga połowa IV tysiąclecia p.n.e.), (3) dwa naczynia – modele wozu z okolic Budapesztu (schyłek IV tysiąclecia p.n.e.), (4) ryt na kamieniu grobowym przedstawiający pojazd dwukołowy ciągnięty przez parę wołów z okolic północnej Hesji (Niemcy) (przełom IV i III tysiąclecia p.n.e.), (5) dość liczne fragmenty wozów pochodzących z pierwszych wieków III tysiąclecia p.n.e. – głównie koła i osie, które ugrzęzły w bagnach i zachowały się dzięki braku dostępu tlenu (SYDOR 2007).

Na podstawie wyników datowania izotopem węgla C^{14} przeprowadzonego dla stanowiska, na którym znaleziono wazę *BR III* z Bronocic (rys. 3-10 e), można było pośrednio określić wiek naczynia na lata 3491-3060 p.n.e. (KRUK i MILISAUSKAS 1999). Górna część wazy jest obwiedziona ornamentem składającym się z kilkunastu piktogramów. Jednym z nich jest, powtórzony najprawdopodobniej pięciokrotnie, rysunek wozu czterokołowego (zachowały się dwa kompletne zarysy i znaczna część trzeciego). Drugim, łatwym do odczytania, komponentem ornamentu jest drzewo. Pozostałe są trudne do wytłumaczenia. Nawijając jednak do różnych prób interpretacji przedstawień, można je uważać za rysunki pól z drogami (układy domostw w osadzie?) i wyobrażeń rzeki (wody?). Narrację ornamentu można zatem tłumaczyć jako, czterokrotnie powtórzoną na obwodzie naczynia, następującą sekwencję znaczeń: las (drzewo) – wóz – pola (domy?) – drogi – rzeka (woda?) (KRUK i MILISAUSKAS 1985, 1991, 1999).

¹³⁴ Najwcześniejszym znaleziskiem jest kredowy model koła wozu odkryty w 1974 roku na stanowisku Jebel Aruda nad środkowym Eufratem w Syrii przez ekspedycję holenderską. Przedmiot ten datowano trzykrotnie metodą C^{14} , uzyskując wyniki: 3340-3105 p.n.e., 3340-3040 p.n.e. oraz 3335-2890 p.n.e.

Najważniejszym składnikiem ornamentu z Bronocic są jednak rysunki wozu. Przedstawiono tam pojazd czterokołowy – z ramą w rzucie z góry, a kołami w rzucie bocznym. Na podeście wozu – pomiędzy osiami – znajduje się rysunek koła o nieznanym symbolice (czyżby mechanizm skrzętu przedniej osi, a może koło zapasowe?). Wóz jest wyposażony w dyszel z rozdwojeniem (na jednym rysunku z potrójnym zakończeniem), stanowiącym zapewne ilustrację v-kształtnej formy jarzma przyroźnego (rys. 3-10 f). Może to świadczyć o zaprzęgnięciu jednego lub pary zwierząt. Wśród szczątków kostnych znalezionych w Bronocicach znajdują się poroża wołów z charakterystycznymi śladami zużycia, powstałymi przypuszczalnie od wiązań uprzęży, pochodzą one jednak z późniejszego okresu rozwoju osiedla (KRUK i MILISAUSKAS 1999).

Datowanie względne naczyń z Bronocic zostało zweryfikowane absolutnym oznaczeniem wieku wykonanym w Laboratorium Radiowęglą w Groningen w Danii. Posłużyły do tego kości zwierzęce znalezione wraz z opisywanym zabytkiem, datowane na lata 3635-3370 p.n.e., co odpowiada oczekiwaniom wynikającym z relatywnego oznaczenia wieku naczyń oraz absolutnej chronologii faz rozwoju osiedla. Bezwzględne datowanie zabytku ma duże znaczenie – jest przesłanką do uznania go za najstarszy dowód używania koła (KRUK i MILISAUSKAS 1999).

Rozwój łożyskowania

Tarcie zewnętrzne, czyli występowanie oporu podczas względnego przemieszczania się dwóch stykających się ciał¹³⁵, jest zjawiskiem powszechnym, wpływającym bezpośrednio na sprawność, trwałość i niezawodność maszyn i urządzeń. Nierzadko eliminacja lub istotne zmniejszenie tarcia umożliwia skonstruowanie nowatorskiego urządzenia.

Milowym krokiem w rozwoju techniki było zastąpienie tarcia posuwistego tarciem tocznym – skonstruowanie łożyska. Niewątpliwie najstarszym materiałem stosowanym na łożyska ślizgowe jest drewno. Ślizgowe łożyska drewniane były wykonywane z twardego drewna (np. grabu lub dębu). Dla zwiększenia sprawności smarowano je najczęściej dziegciem (vide przypis 128 na s. 129). Jako środek do smarowania osi kół w wozach dziegieć był niezastąpiony aż do chwili upowszechnienia się smarów otrzymanych z ropy naftowej. Z dziegciem jako smarem wiąże

¹³⁵ W odróżnieniu od tarcia wewnętrznego, spowodowanego: w płynie – lepkością przemieszczających się względem siebie cząsteczek, w ciele stałym – jego właściwościami tłumiącymi.

się pewne, bardzo znane, porzekadło: *kto smaruje, ten jedzie*; początkowo miało ono odniesienie jedynie komunikacyjne, zupełnie już dzisiaj zapomniane... (AMBROSIEWICZ 2002). Do smarowania stosowano także smołę drzewną¹³⁶. Smarowano też tłuszczem pochodzenia zwierzęcego (płatami słoniny lub polewano roztopionym łojem) (KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2005 b) oraz wodą lub używano... owocnika grzyba (według informacji ustnej prof. Mieczysława Matejaka).

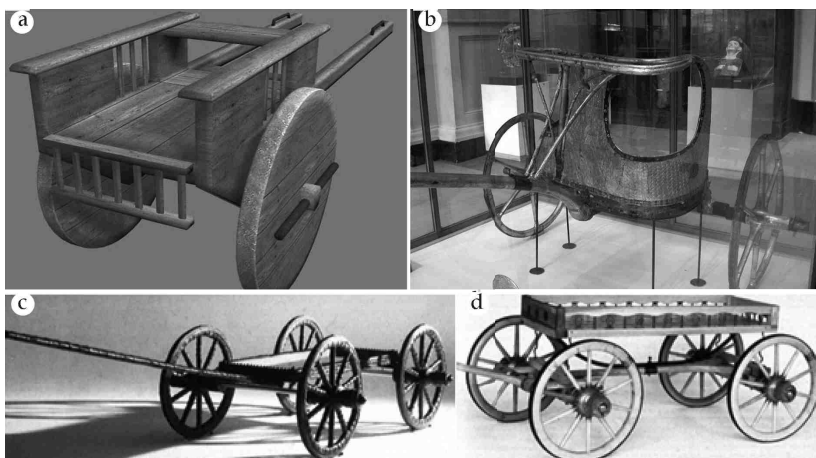
Wraz z rozwojem techniki w konstrukcji łożysk drewnianych stosowano nowe materiały – metalowe kłamy spinające, metalowe czopy. Starano się w ten sposób wyeliminować największą wadę drewna – niewielką wytrzymałość w kierunkach stycznym i promieniowym w porównaniu z wytrzymałością w kierunku równoległym do włókien. Wykonywanie podzespołów łożysk za pomocą skrawania powoduje przecinanie włókien i w efekcie znaczne osłabienie konstrukcji. Kolejną niekorzystną cechą drewna jest skłonność do zmian objętości wraz ze zmianą wilgotności. Zmiana wymiarów przyczynia się do powstawania pęknięć oraz zmian kształtu. Wysychająca panewka łożyska drewnianego może zaciskać się na czopie lub zupełnie popękać (KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2005 b). Twarde drewno łożyskowe jest na ogół dość kruche, podcięte podczas obróbki włókna, narażone na zmiany wilgotności, mogą stosunkowo łatwo pękać, szczególnie przy długocyklowych obciążeniach dynamicznych promieniowym biciem wału.

Rozwój pojazdów

Na terenach dzisiejszego Iraku już około 3500 roku p.n.e. używano pojazdów o obrotowej osi z pełnymi drewnianymi kołami (rys. 3-11 a). Znaleźiska archeologiczne wskazują, że około 2000 roku p.n.e. na całym Bliskim Wschodzie posługiwano się na dość szeroką skalę budowanymi z drewna pojazdami kołowymi. Od 2000 roku p.n.e. wozy o obrotowej osi zastąpiono pojazdami o kołach osadzonych niezależnie w łożyskach ślizgowych. Kolejnym etapem było wprowadzenie kół szprychowych o zdecydowanie większej wytrzymałości mechanicznej w stosunku do wagi. Miało to bezpośredni związek z udomowieniem konia i skonstruowaniem rydwanów (rys. 3-11 b).

W starożytności dominowały pojazdy dwukołowe, w ostatnich stuleciach p.n.e. skonstruowano mechanizm skrętu przedniej osi (tzw.

¹³⁶ Do smarowania osi służył maźnica ze smołą i z kijkiem do mieszania tejże (KOLBERG 1885).



Rys. 3-11. Ewolucja pojazdów (rekonstrukcje): a – wóz z jedną obrotową osią o kołach pełnych, Europa Środkowa, 3000 rok p.n.e., b – rydwan z kołami szprychowymi, Egipt, 1300 rok p.n.e., c – wóz czterokołowy ze skrętną osią, Niemcy, 600 rok p.n.e. (Württembergisches Landesmuseum w Stuttgarcie), d – wóz czterokołowy resorowany, Francja, VI-V wiek p.n.e. (Museum für Antike Schifffahrt w Mainz)

*kierownik*¹³⁷ – rys. 3-11 c, d), co umożliwiło wytwarzanie efektywnych konstrukcji czterokołowych. W początkowym okresie wytwarzania pojazdów czterokołowych ze skrętną osią nie ustrzeżono się pewnych wad, w pierwszych konstrukcjach tego typu bardzo często koła przednie ocierały o pudło pojazdu.

Na ziemiach etnicznie polskich pojazdy budowano już w X wieku, świadczy o tym relacja Ibrahima Ibn Jakuba, żydowskiego kupca, który odbył podróż do krajów słowiańskich w latach 965-966.

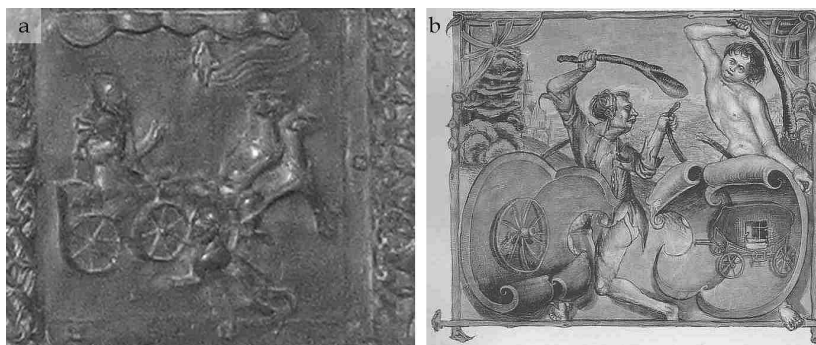
Królowie ich podróżują wozami wielkimi, [...] wzniesionymi na czterech kołach. W czterech rogach ich [tj. tych wozów] są ustawione cztery mocne

¹³⁷ *Kierownik* – ruchoma poprzeczna część drewnianego wozu, w nim są osadzone kłonicie. *Kierownik* jest umocowany ruchomo do poprzecznego progu podłużnej ławki za pomocą pionowego sworznia skreću. (Części wozu zwyczajnego są: kłonicie (cztery kije czy deszczułki nad kołami w kwadrat spojone), kierownik, dyszel (u parokonnego wozu), rozwora (deska z otworem do sworznia i tylnikiem), luśnie (co się drabiny przesykują), i u koła: oś, ryfa (żelazna), lon (zatyczka do koła), piasta, dzwono, sprycha; drabie (drabiny) ustawione są po nad kłonicami [...]. Wozy takie używane i w samej Warszawie (lubo bez drabi) (KOLBERG 1885).

*belki, z których zwisa na mocnych łańcuchach kolebka wyścielona brokatem, tak że siedzący w niej nie trzęsie się podczas wstrząsów wozu. Przygotowują te [wozy z kolebkami] również dla chorych i rannych [...]*¹³⁸.

Najstarsze historyczne polskie źródła ikonograficzne przedstawiające polskie pojazdy kołowe – wozy paradne przystosowane do zaprzęgu wielokonnego – pochodzą z połowy XII wieku. Jednym z nich jest płytką z Drzwi Płockich¹³⁹ przedstawiająca proroka Eliasza na paradnym czterokołowym wozie o prostej, krótkiej skrzyni ozdobionej fryzem z geometrycznym motywem kratownicy (rys. 3-12 a). Wóz Eliasza jest wyposażony w zaprzęg parzysty w uprzęży tzw. *nowożytniej*, szorowej (vide przypis 185 na s. 233) z postronkami przymocowanymi do orczyicy (vide przypis 146 na s. 146). Skrzynia jest położona bezpośrednio na osiach, bez amortyzacji oraz bez mechanizmu skrętu przedniej osi.

Podobna scena z prorokiem Eliaszem jest przedstawiona na kielichu z kościoła Kanoników Regularnych w Trzemesznie z drugiej połowy XII



Rys. 3-12. Rozwój pojazdów w Polsce: a – najstarsze przedstawienie wozu, Drzwi Płockie (1154), b – bójka stelmachów, Kodeks Baltazara Behema (1505) (BUCHER 1889, tab. 11)

¹³⁸ Relacja Ibrahima Ibn Jakuba (vel Ibrahima Ibn Yaquba al-Tartushiego) w przekładzie Al. Bekriego w: *MONUMENTA POLONIAE HISTORICA* (1960).

¹³⁹ Drzwi Płockie zostały ufundowane w 1154 roku przez biskupa Aleksandra z Malone. Są jednym z arcydzieł odlewnictwa romańskiego w Polsce. Dzieli się na 48 kwater ukazujących sceny ze Starego i Nowego Testamentu, alegorie i portrety fundatorów. Niestety, drzwi w katedrze płockiej to jedynie kopia z 1981 roku. Oryginał znajduje się od XIV wieku w Soborze Mądrości Bożej w Nowogrodzie Wielkim w Rosji (DYLEWSKI 2004).

wieku. Kolejnym przykładem jest miniatura z tzw. *Kodeksu ostrowskiego*, przechowywanego w Kanadzie (*Legenda o świętej Jadwidze Śląskiej* – 1353), na której przedstawiony jest wóz czterokołowy z szorowym zaprzęgiem parzystym, o konstrukcji nieresorowanej ramowej, również bez mechanizmu skrętu. Znaczny rozwój techniki budowy pojazdów nastąpił w Polsce w wiekach XV i XVI (ŻURAWSKA 1982). W tym okresie istniało wiele konkurujących ze sobą manufaktur. W krakowskim Kodeksie Baltazara Behema z 1505 roku (BEHEM 1505), przechowywanym w Bibliotece Jagiellońskiej, znajduje się miniatura przedstawiająca potyczkę na maczugi dwóch stelmachów¹⁴⁰ (rys. 3-12 b).

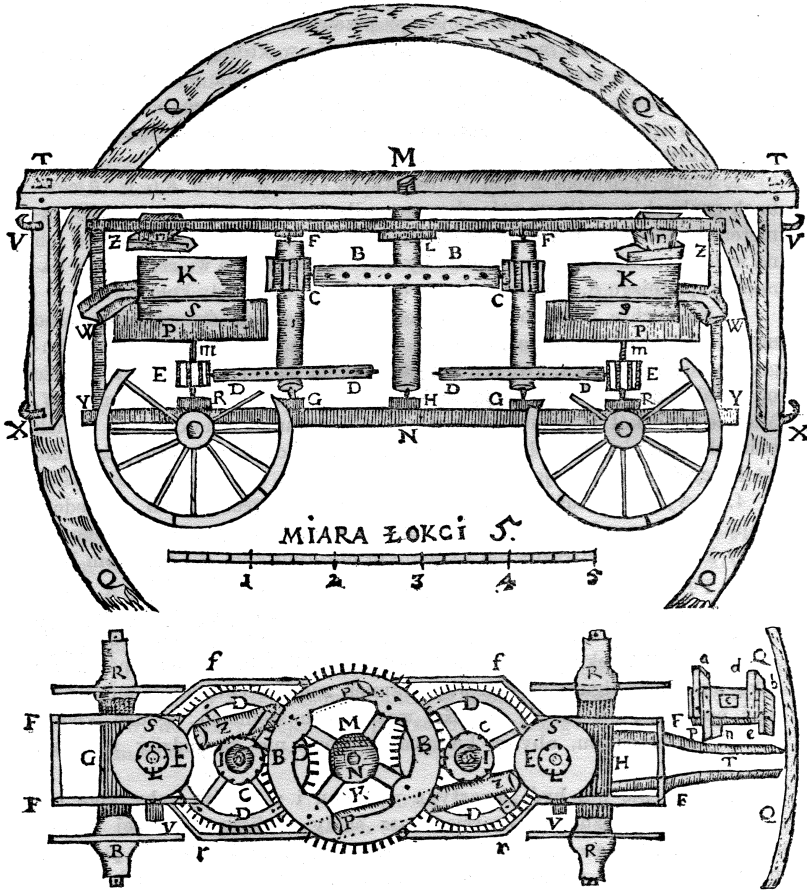
Oprócz zadań transportowych pojazdy drewniane mogły pełnić funkcje specjalne. Przykładem tego typu pojazdu jest przewoźny młyn zbożowy przedstawiony na rysunku 3-13. Młyn był przeznaczony do zastosowania w wojsku ([...] którzy doświadczyli, jaka jest niewygodą, gdy się trafi obóz lokować daleko od młynów, na takowe kosztu żatować nie będą, które by na wozie jednym osadzone, mąkę mlec mogły na dwa kamienie tak sposobnie jako wodne [...], SOLSKI 1690). Autor tak opisuje rysunek: *Sporządzenie tedy wozowego mlyna będzie takowe, jakie pokazują 2 figury: jedna reprezentująca stojące wały kół, wysokość cewów¹⁴¹ i kamieni grubość, druga dyjamentry [średnice] albo rozłożystość wałów, kół cewów i kamieni [...]* (SOLSKI 1690, Księga II, Zabawa II).

Rysunek 3-13 jest interesujący z jeszcze jednego powodu: otóż Solski przedstawił swój *młyn wozowy* w rzutach prostokątnych, które weszły do powszechnego użycia znacznie później i są stosowane w zapisie konstrukcji do dziś. Innym istotnym elementem szkicu jest podziałka rysunkowa, która ułatwia szybką orientację co do wymiarów poszczególnych części. Młyn był napędzany przez dwa konie, poruszające za pomocą kieratu wał MH z osadzonym na nim kołem zębatym B. Ruch koła B był przekazywany na cewy C, z nich przez wał FG na koła D, które z kolei przekazywały ruch obrotowy na cewy E napędzające kamienie młyńskie K.

Innego rodzaju pojazdem specjalnym był wózek mierniczy (rys. 3-14), którego zasada użytkowania polega na zliczaniu obrotów koła L o znanym obwodzie (5 łokci $\approx 2,98$ m). Zasadnicze elementy wózka mierniczego

¹⁴⁰ *Stelmach* – rzemieślnik co spód [podwozie] pojazdu robi (LINDE 1807-1814, t. 5, s. 397).

¹⁴¹ *Cewy* (sześciornia, cywie, cewia) – koło kątovej przekładni zębatej zbudowane z dwóch pierścieni z otworami (tzw. *ryfek*), w których były umieszczone palce (cewki).

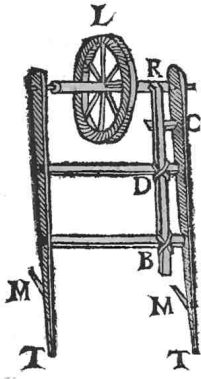


Rys. 3-13. Młyn zbożowy przewoźny (SOLSKI 1690, Księga II, Zabawa II)

to *szybiste* [tu: zaokrąglone], osadzone na wale koło L, palec R o długości dwóch cali (~ 50 mm), palec C o długości 3-4 cali (~74-99 mm) oraz pręt zamocowany w punktach BD.

W instrukcji użytkowania wózka SOLSKI (1683) *napisał: Niech się poda okazyia przemierzać Łęg iaki długi, albo drogę od terminu do terminu opisanym Wózkiem Miernicznym. Tedy ieden człowiek niech się nągotuje do ráchowania głósów, które sprężyná drewniána R D B, podnieśiona od pálcá R y spuszczone ná pálec C, muśi wydawać. A ten powinien mieć grochu ziarn z pięć set w kieszeni, y woreczek albo pudełko ná ich odkładanie po każdym głósie sprężynki dziesiątym*

W równych Polách nie wymyślił nic sposobniejszego nad Wózek, który zwąć będą, *Wózek Mierniczy*. Figurá iego składa się *naprzód*: z kołką prostego L, nie tzybistego, máiącego wyłokości łokci półtora, y



calow 2. y *nád* to dwie części, ná iákich *xi* może byđz podzielony cal ieden: á obwodu łokci 5, zupełna, ná wálcu zczopámi żeláznymi, wzwiazániu nákształt káry. *Potym*: má mieć ná wálcu, pálec R, długi ná dwa pálcá, iákcie bywáá w kole Młynárckim, obracájącym Cewy pod kámiénie. *Po trzecie*: Má mieć drugi pálec C w rámieniu R C T, długi ná trzy, álbo ná cztery Cal. *Po czwarte*: Przy B, y D, má mieć przywiazáne drewno gibkie, przestájące áz do pálcá R; *ktoreby* podniesione od tegoż pálcá R, zá káżdym obrotem kołá L, wderzáło w pálec C, y dáwáło znać o zupełnym obrocie kołá L, odmierzájącego ná równi, łokci 5. *Nákoniec*: Przy rękoiestáich T zwiazánia, niech má nożki M, dla sposobniejszego stáwiánia.

Rys. 3-14. Wózek mierniczy z instrukcją wykonania (SOLSKI 1683, Rozdział I, Zabawa VII)

[...] (SOLSKI 1683, Rozdział I, Zabawa VII). W dalszej części opisu wózka podane są przestrogi dla kołodzieja, szczególnie dotyczące koniecznej precyzji wykonania koła o odpowiedniej średnicy, tak aby uzyskać dokładny obwód wynoszący 5 łokci.

Przełom XVII i XVIII wieku to okres wielu znaczących innowacji konstrukcji wozów konnych zakończony powstaniem pierwszych pojazdów silnikowych. W tym okresie w Europie używano około 60 typów różnych wozów konnych (osobowych, osobowo-towarowych, towarowych, paradnych, specjalnych). Wiele nowych rozwiązań wprowadzono w pojazdach osobowych, pojawiło się oświetlenie, hamulce, zadbane o amortyzację. Około roku 1770 zastosowano we Francji znaczącą innowację – system resorów Dalema (tzw. *á la Dalem*). Polegał on na zawieszeniu pudła karety na czterech pionowych, wielowarstwowych resorach piórowych wykonanych ze stali lub drewna w formie wyciągniętej litery S, pochylonej ku pudłu karety (rys. 3-15 a).

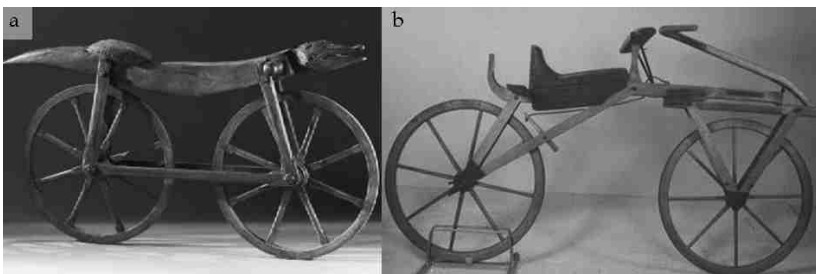
Uzupełnieniem systemu *á la Dalem*, chociaż nie zawsze, były dwie długie, poziome sprężyny płaskie umieszczone pod pudłem, umocowane za pomocą skórzanych pasów zszywanych z kilku warstw skóry. Inny konstruktor francuski, Polignac, zastosował wielowarstwowe drewniane resory piórowe w kształcie litery C (rys. 3-15 b). W roku 1804 Anglik Obadiah Elliott skonstruował resory eliptyczne (rys. 3-15 c), które



Rys. 3-15. Amortyzacja pojazdów resorami piórowymi: a – system S-kształtnych pionowych drewnianych resorów Dalema (ok. 1770) (fot. P. Pohl), b – system C-kształtnych pionowych drewnianych resorów Polignaca (ok. 1790), c – system poziomych metalowych resorów Elliotta (1804)

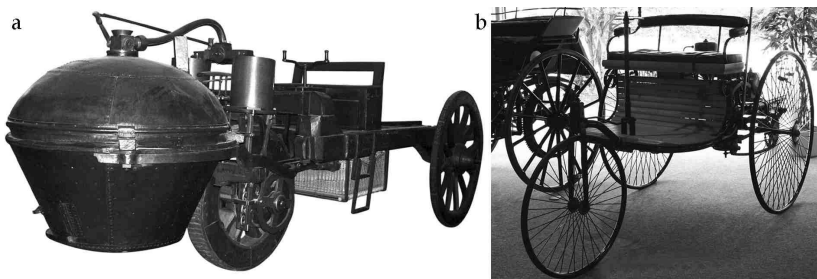
początkowo miały pióra drewniane, podobne do współcześnie stosowanych w meblarstwie płaskich sprężyn sklejkowych, później stalowe. W 1808 roku jego rodak Windus połączył system resorów C-kształtnych z resorami eliptycznymi w kombinację zawieszenia na ośmiu resorach. Inny Anglik, John Collinge, skonstruował w 1787 roku nowe łożyskowanie wyposażone w smarownicę olejową (zwaną osią Collinge’a). Ten wynalazek poprawił sprawność łożyskowania oraz ułatwił utrzymywanie czystości (ŻURAWSKA 1982).

Dwukołowe, drewniane pojazdy, w których siedzący na siedzeniu jeździec odpychał się nogami od ziemi, pojawiły się pod koniec XVIII wieku w Paryżu (rys. 3-16 a), a ich konstruktorem był Comte de Sivrac. Uznawany za wynalazcę roweru jest jednak Karl Friedrich Christian Ludwig Freiherr Drais von Sauerbronn (1785-1851), znany jako Karl Drais, jego innowacją było obrotowe osadzenie przedniego koła, co umożliwiło skręcanie bez konieczności zsiadania z pojazdu (rys. 3-16 b).



Rys. 3-16. Drewniane pojazdy dwukołowe: a – protoplasta roweru (Comte de Sivrac, 1790), b – pierwszy rower (Karl Drais, 1817)

Pierwsze samobieżne pojazdy, napędzane silnikami parowymi (rys. 3-17 a), były wykonane z drewna, podobnie jak siedzisko i inne elementy pierwszego samochodu z silnikiem benzynowym (rys. 3-17 b).



Rys. 3-17. Pojazdy silnikowe: a - ciągnik Cugnota (1771), b - samochód Benza (1885)

Jeszcze w połowie XX wieku w przemyśle motoryzacyjnym powszechnie wykorzystywano różne gatunki drewna. Pierwszy polski samochód CWS T1 (1923) miał nadwozie częściowo drewniane (wykonane ze sklejki). Pierwszy powojenny polski autobus „Star 50” (1951) miał poszycie wewnętrzne wykonane z płyt pilśniowych i sklejki. Pierwsze egzemplarze „Syren” (model 100 z 1957 roku) miały nadwozie o konstrukcji drewnianej pokryte tworzywem skóropodobnym.

Jak podaje GNOIŃSKI (1952), na każdy kilogram masy własnej czterośladowej furmanki (o drewnianej skrzyni ładunkowej i drewnianych kołach) przypadało blisko 3,5 kg ładowności. Dla porównania - typowa naczepa kontenerowa współczesnego ciągnika siodłowego waży 5800 kg i ma ładowność 24 900 kg, czyli stosunek jej ładowności do masy własnej wynosi 4,3 kg/kg. Ładowność względna takiej naczepy jest większa tylko o 23% od ładowności względnej drewnianej wiejskiej furmanki. Można było się spodziewać większej różnicy, tym bardziej, że naczepa kontenerowa jest pozbawiona ważącej kilkaset kilogramów plandeki ze stelażem, a w oszacowaniu pominięto masę samego kontenera. SKWARCZYŃSKI (1925) podaje, że na utwardzonej drodze w terenie pagórkowatym (wznios do 5%) dwa konie są w stanie transportować ładunek 2000 kg przez 8 godzin, a przy wzniosie do 2,5% - 3500 kg ($v \approx 1,1$ m/s).

Wykonanie podwozia tradycyjnego drewnianego wozu czterośladowego, tzw. furmanki, najczęściej wymagało zaangażowania rzemieślników

dwóch profesji: kołodzieja/stelmacha¹⁴² i kowala. Koordynatorem zespołu był stelmach, którego zadaniem było zbudowanie podwozia. W typowym podwoziu najbardziej pracochłonnym zajęciem było wykonanie kół. Drewniane koło wozu składa się z sześciu zasadniczych części: szprych, wieńca, piasty drewnianej, tulei metalowej wewnątrz piasty oraz dwóch obręczy na piastę i jednej na wieniec. Do wyrobu każdej części koła używano odpowiedniego drewna. Obręcz koła tworzyło najczęściej sześć, ewentualnie osiem, dębowych dzwon (vide przypis 52, s. 59). W zależności od posiadanego materiału wieńce kół wykonywano jako całkowicie gięte lub składane. Szprychy były również niemal wyłącznie dębowe (strugane na kobylicy za pomocą ośników). Ich wymiary i kształt kontrolowano za pomocą szablonu. Podczas wykonywania szprych dbano o to, aby w miarę możliwości nie przecinać włókien, na szprychy wybierano zatem drewno prostowłókniste i obrabiano je łupaniem. Takie podejście zapewniało szprychom wytrzymałość większą o 15-20% od szprych z podciętymi włóknami (GNOIŃSKI 1952). Piastę wykonywano z drewna brzoźowego, dębowego lub jesionowego. Wewnętrzna część piasty, tzw. *buksa*, pełniła rolę panewki łożyska ślizgowego, która współpracowała z czopem wykonanym z brązu lub stopów żelaza. Piasta była wzmocniona czterema metalowymi opaskami: oba zwężające się końce piasty – dwiema *ryfkami*¹⁴³, środkowa zaś, grubsza jej część, z obu stron gniazd do osadzenia szprych – dwiema węższymi, tzw. *tradynkami*. Piastę wykonywano z jednego okrągłaka o średnicy 220-250 mm, ociosanego wstępnie na kształt baryłkowaty z nadatkami na średnicy rzędu 8-10 mm. Często w celu przyspieszenia wyschnięcia wiercono otwór osiowy do osadzenia metalowej tulei (panewki) przed obróbką wykańczającą toczeniem, w takim wypadku w otworze piasty umieszczano specjalny sworzeń centrujący. Piasta była obrabiana wykańczająco na tokarce, na obu jej końcach wykonywano wgłębienia dla obręczy ściąających, w środku trasowano dwie linie wyznaczające linie przyszłych otworów na szprychy. Otwory wykonywano na dłutownicy lub ręcznie na stole do dłutowania gniazd. Aby zabezpieczyć piastę przed pękaniem w trakcie suszenia, jej powierzchnie czołowe smarowano olejem lnianym lub pokrywano klejem kostnym lub skórnym wymieszanym z kredą. Wysuszoną piastę odda-

¹⁴² *Kołodziej* (vel *koleśnik*) i *stelmach* (przyp. 140 na s. 140) – synonimiczne określenia rzemieślników wykonujących pojazdy kołowe (LINDE 1807-1814).

¹⁴³ *Ryfka* (*ryttel*, *ryffa*, *rykla*, *rytla*) – metalowa obręcz wzmacniająca drewniane elementy urządzeń transmisyjnych (DŁUGOKĘCKI i IN. 2004), vide przypis 219 na s. 262.

wano do kuźni do okucia, gdzie osadzano pierścienie na gorąco, które stygnąc zaciskały się na paście.

Przód i tył wozu były łączone grubym drągiem (rozworą) umożliwiającym regulację długości pojazdu. Podczas budowy podwozia kołodziej współpracował z kowalem wykonującym metalowe części konstrukcji (okucia: kół, *dyszla*¹⁴⁴, *orczyka*¹⁴⁵ i tzw. *sztelwagi*¹⁴⁶ – służącej do zaczepiania dwóch orczyków przy pracy parokonnej). Forma konstrukcyjna nadwozia zależała od przeznaczenia wozu, który mógł mieć odkrytą skrzynię ładunkową (np. bryczka, furmanka, brek, ekwipaż, faeton), mógł być zabudowany pudłem do przewozu pasażerów (np. brożek, dyliżans, kareta¹⁴⁷) lub mieć wyposażenie specjalistyczne (młyn zbożowy, drabiny do przewozu siana lub słomy itp.).

3.2.3. Dźwignice

Dźwignice są ważne w historii techniki, ponieważ to za ich pomocą wzniesiono niemal wszystkie monumentalne budowle historyczne. Podstawowego elementu dźwignicy, krążka linowego, używano już w VIII wieku p.n.e. w Asyrii (ORŁOWSKI 1989). Krążek linowy ma formę walca, na którego obwodzie jest wykonany rowek zapobiegający zsuwaniu się liny. Jego podstawowym zadaniem jest zmiana trasy (kierunku przebiegu) ciężna linowego. Istnieją dwa typy krążków: stały (blok nieruchomy – rys. 3-18 a) i przesuwany (blok ruchomy – rys. 3-18 b).

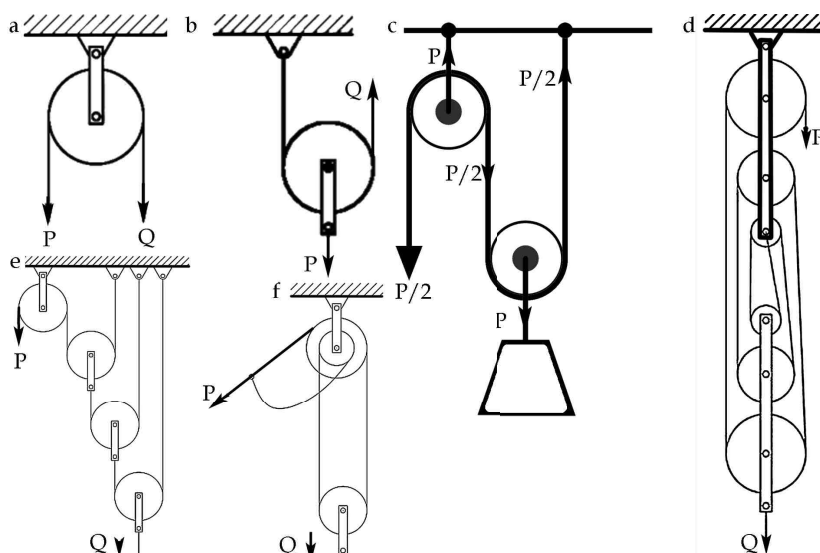
Krążek stały jest przytwierdzony do stałego podłoża. Przez krążek przeplata się ciężno, które z założenia nie ślizga się, lecz wprawia go w ruch obrotowy. Krążek stały umożliwia tylko zmianę kierunku siły, bez zmiany jej wartości. Krążki linowe zestawione w odpowiedni układ (zwany wielokrążkiem lub talią (w żeglarstwie) – rys. 3-18 c) połączony

¹⁴⁴ *Dyszal* – drąg o długości około 3,5 m, jego grubszy koniec, o przekroju czworokąta, tkwił we wpuszczeniu dyszlowym i był zabezpieczony przed wysunięciem za pomocą tzw. *przetyczki dyszla*. Przedni koniec ma okucie i uchwyty do mocowania uprzęży.

¹⁴⁵ *Orczyk* – zamocowany przegubowo drążek do połączenia uprzęży zwierzęcia.

¹⁴⁶ *Sztelwaga* (*sztelwaga*, *waga*, *orczyca*) – nieruchoma okuta belka z zaczepami w przedniej części wozu, przyczepiano do niej *orczyk*.

¹⁴⁷ *Kareta* (*karoca*, *landara*) była powszechnie używana przez polską arystokrację w XVII i XVIII wieku. Jej pudło było zawieszane na rzemiennych pasach lub umieszczone na dwóch podłużnych, sprężystych belkach. Na przełomie XVIII i XIX wieku – resorowane z użyciem drewnianych resorów piórowych.



Rys. 3-18. Elementy dźwignicy: a – krążek stały, b – krążek przesuwany, c – zasada działania wielokrążka, d – wielokrążek zwykły, e – wielokrążek potężowy, f – wielokrążek różnicowy

liną bądź linami zapewnia odpowiednie przełożenie sił przy podnoszeniu ładunków. Wynalazek wielokrążka przypisuje się grekiemu uczonemu i inżynierowi Archimedesowi z Syrakuz (ok. 287-ok. 212 p.n.e.), autorowi słynnego powiedzenia: *Dajcie mi punkt oparcia, a poruszę Ziemię*. Miał on, według tradycji, przeprowadzić w 260 roku p.n.e. wodowanie największego okrętu swojej epoki, *Syrakuzji* (o długości 150 m), za pomocą skomplikowanych układów wielokrążków. Wielokrążek ma zastosowanie wszędzie tam, gdzie trzeba podnieść duże ciężary z użyciem niewielkich sił, można wyróżnić trzy jego typy: zwykły (rys. 3-18 d), potężowy (rys. 3-18 e) i różnicowy (rys. 3-18 f).

Wykorzystując wielokrążki, Grecy skonstruowali pierwsze dźwignice napędzane ręcznymi kołowrotami. Dźwignice te składały się zazwyczaj z kilku drewnianych dłuźyc ustawionych skośnie i połączonych u góry. Napędzano je kabestanem, czyli kołowrotem poziomym, albo kołem deptakowym obracany przez chodzących w jego wnętrzu ludzi. Tego rodzaju dźwigi były stosowane w niemal niezmienionej postaci od czasów starożytnych aż do epoki odrodzenia, kiedy wprowadzono, oprócz przekładni linowych, również przekładnie zębate. Zgodnie ze źródłami

pisany, w III wieku kołowrót spełnił prawdopodobnie po raz pierwszy funkcje dźwigu osobowego. Wzmianka pochodzi od irańskiego encyklopedysty z XIII wieku, który pisał o remoncie jednego z wysokich mostów: [...] większość robotników musiano opuszczać kołowrotami za pomocą wyciągów, w koszach i sieciach. W starożytności stosowano również windy dla uzyskiwania efektów teatralnych (*Deus ex machina*). W 80 roku n.e. cesarz Tytus zakończył budowę amfiteatru Flawiuszów (*Koloseum*); był on wyposażony w szereg wind i dźwigów, za pomocą których wciągano na arenę ludzi i dzikie zwierzęta. Opisy dźwignic stosowanych w I wieku n.e. znajdują się w traktacie Witruwiusza *De architectura* (WITRUWIUSZ ok. 27-13 p.n.e., rozdział 10.2, wersy 1-10) oraz w pismach Herona z Aleksandrii (*Mechanica* 3.2-5).

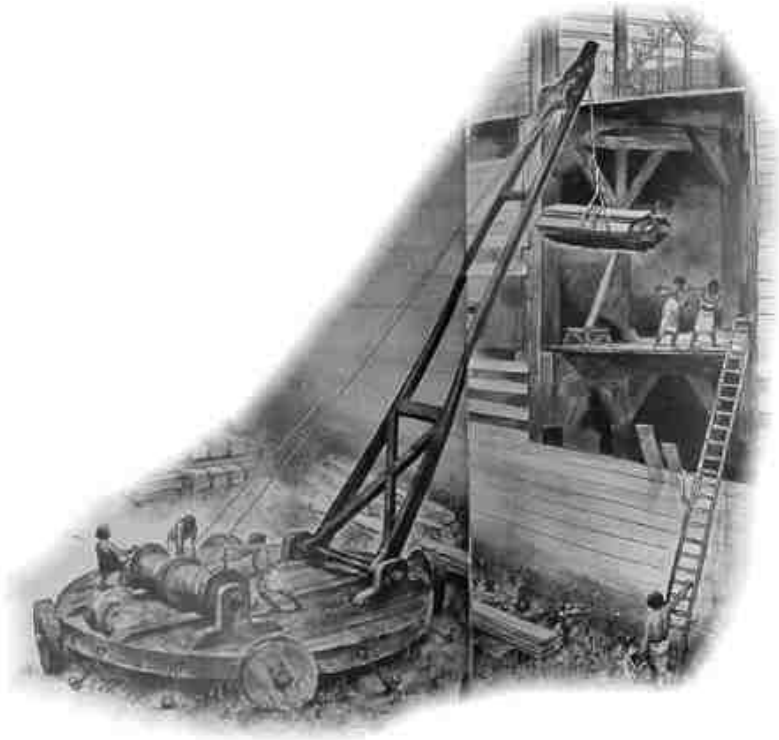
O znaczeniu mechanizacji w I wieku p.n.e. pisze Witruwiusz:

*Nie jest dopuszczalne zwlekanie, gdy konieczność zmusza do wykonania w określonym czasie [...] podjętego zadania. Potrzebna jest duża rozważa i obmyślanie gdyż nic nie da się wykonać bez znajomości machin i rozległej wiedzy oraz dużej pomysłowości [...]*¹⁴⁸.

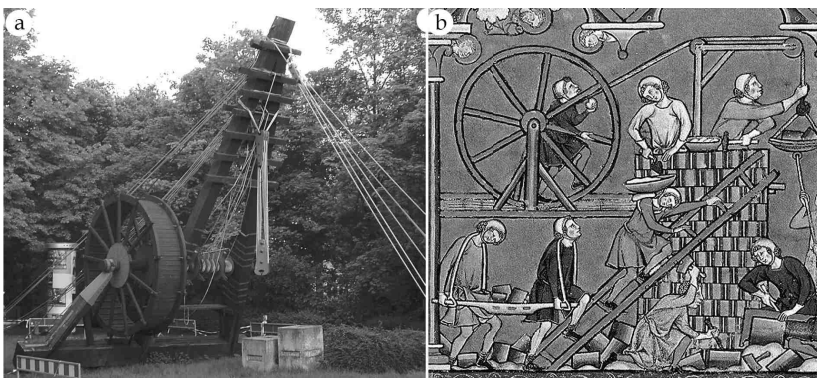
Stawianie budowli z wielotonowych bloków kamiennych wymagało zastosowania żurawi. Antyczny żuraw według rekonstrukcji POORTVLIETA (2004) przedstawia rysunek 3-19. Żuraw jest wyposażony we wciągarkę linową umożliwiającą podnoszenie ciężaru oraz obrotową podstawę zakotwiczoną w gruncie.

W żurawiach stosowano dwa źródła napędu: kabestany oraz koła deptakowe. W przypadku kabestanów przełożenia linowe umożliwiały udźwig 750 kg na osobę, koła deptakowe zaś, z uwagi na swoją średnicę, nawet do 3000 kg na osobę. Jeżeli zastosowano koło deptakowe, musiało ono być wyposażone w hamulec. Antyczne i średniowieczne hamulce klockowe lub używane powszechnie zębatki z zapadką były zawodne i powodowały wypadki. Na rysunku 3-20 a przedstawiono rekonstrukcję rzymskiego żurawia o wysokości 10,4 m i udźwigu – w wersji z kołem deptakowym z dwuosobową obsadą – około 6000 kg.

¹⁴⁸ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *Nec solum id vitium in aedificiis, sed etiam in muneribus, [...]. In his vero opus est prudentia diligens et ingenii doctissimi cogitata, quod nihil eorum perficitur sine machinatione studiorumque vario ac sollerti vi gore* (WITRUWIUSZ 27-13 p.n.e., Liber X, *Praefatio*).



Rys. 3-19. Antyczny żuraw (na podstawie POORTVLIETA 2004)



Rys. 3-20. Żurawie: a - rekonstrukcja rzymskiego żurawia typu *Polyspastos* (Bonn, Niemcy), b - żuraw do budowy Wieży Babel (BIBLIA MACIEJOWSKIEGO 1250, fol. 3 r)

W dalszej części, opisując koła deptakowe, przedstawiono dwie dźwignice – wciągarkę budowlaną oraz dźwig portowy (vide rys. 3-74 na s. 230) oraz zastosowanie koła deptakowego do napędu dźwignicy. O dźwignicach WITRUVIUSZ (27-13 p.n.e.) nadmienia:

Trzeci rodzaj [maszyn służy] do windowania [i] zwany jest przez Greków βαρουλκον [barulkon]. [...] Ten trzeci rodzaj maszyn umożliwia bezpieczne podnoszenie ciężarów przez układ stężonych drewnianych belek. [...] Dźwigi wykazują wielkie i wspaniałe zalety w użyciu, jeśli posługiwać się nimi umiejętnie¹⁴⁹.

Żurawie średniowieczne były zbliżone konstrukcyjnie do stosowanych w antycznym Rzymie i Grecji. Podobnie jak we wcześniejszych przypadkach, ich ostateczną postać konstrukcyjną dostosowywano do indywidualnych potrzeb. Zachowało się bardzo niewiele opisów i rysunków dźwignic średniowiecznych. Prawdopodobnie takie dokumentacje w ogóle nie powstawały – były to czasy, kiedy nawet wielkie katedry budowano bez sporządzania dokumentacji. Jednak pewne informacje zachowały się. Wiele rysunków zawartych w tekstach ówczesnych kodeksów, biblii i modlitewników przedstawia drewniane maszyny i urządzenia budowlane (w tym dźwignice). Jest niemal pewne, że dawni kopiści i rysownicy, tzw. *iluminatorzy*, czerpali wzory ze współczesnych im budowli, a wydarzenia biblijne umieszczali w aktualnej scenarii. Ślady po urządzeniach dźwignicowych zachowały się na poddaszach katedr i innych budowli. Przykład średniowiecznego żurawia budowlanego napędzanego kołem deptakowym przedstawia rysunek 3-21.

W XV wieku skonstruowano żuraw nowego typu – po jego wyciągnięciu (ramieniu) przesuwał się, wraz z ciężarem, specjalny wózek. W czasach odrodzenia zaczęto napędzać dźwigi kieratami konnymi lub kołami wodnymi. Dźwignice były szeroko stosowane w budownictwie oraz górnictwie, ale nie tylko; niemal każdy wiatrak był wyposażony w urządzenie wspomagające załadunek zboża w workach (vide rys. 3-55, s. 206; rys. 3-56, s. 207; rys. 3-59, s. 210 oraz rys. 3-61, s. 214), urządzenia typu dźwi-

¹⁴⁹ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: [...] *tertium tractorium, id autem Graeci βαρουλκον vocitant* [...]. *Tractorium vero, cum onera machinis pertrahuntur, ut ad altitudinem sublata conlocentur.* [...] *Tractoria autem maiores et magnificentia plenas habet ad utilitatem opportunitates et in agendo cum prudentia summas virtutes* (WITRUVIUSZ 27-13 p.n.e., Liber X, Capitulum 1).

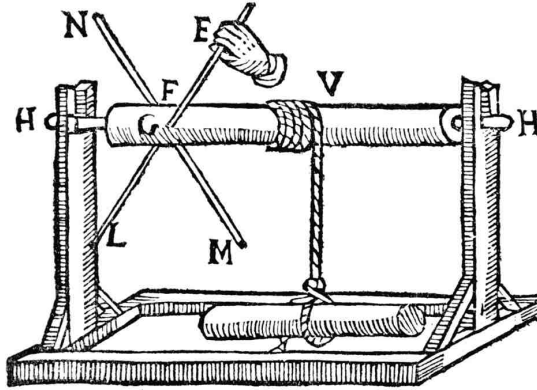


Rys. 3-21. Żuraw napędzany kołem deptakowym podczas budowy kościoła w Trzebnicy (z obrazkowej legendy o św. Jadwidze Śląskiej z 1451 roku, WIŚLICKI 1996)

gnicowego stosowano również do wspomagania załadunku dłużyc do pilarki ramowej (rys. 3-94, s. 258).

Kilkadziesiąt różnego rodzaju urządzeń dźwignicowych znajduje się w *Architekcie polskim* Stanisława Solkiego (pełny tytuł: przypis 8, s. 12). Autor rozpoczyna opis dźwignic, wykładając teorię na przykładzie maszyn prostych (dźwigni), i przechodzi kolejno do bardziej skomplikowanych urządzeń. Pierwszą jest wciągarka budowlana – *walec prosty z drągami*. We wstępie do opisu maszyny Solski pisał: *Znaczna tego przemysłu jest potrzeba, aby koła mniejsze bliższe były ciężarowi, który do góry ciągniemy, gdyż im koła większe mają obwód, tym ramiona dłuższe mieć muszą, zaczyn słabsze i niebezpieczniejsze do zniesienia ciężarów* (SOLSKI 1690, Księga I, Zabawa I). Wciągarka pokazana jest na rysunku 3-22.

W mechanizmach dźwignic wykorzystywano rozmaite układy wielokrążków. W XVII wieku były już znane wszystkie współcześnie używane ich typy. Na rysunku 3-23 zamieszczono wielokrążki stosowane przez Stanisława Solkiego w opisach konstrukcji kilkunastu typów wciągarek budowlanych. Krążki budowano z twardego drewna (najprawdopodobniej

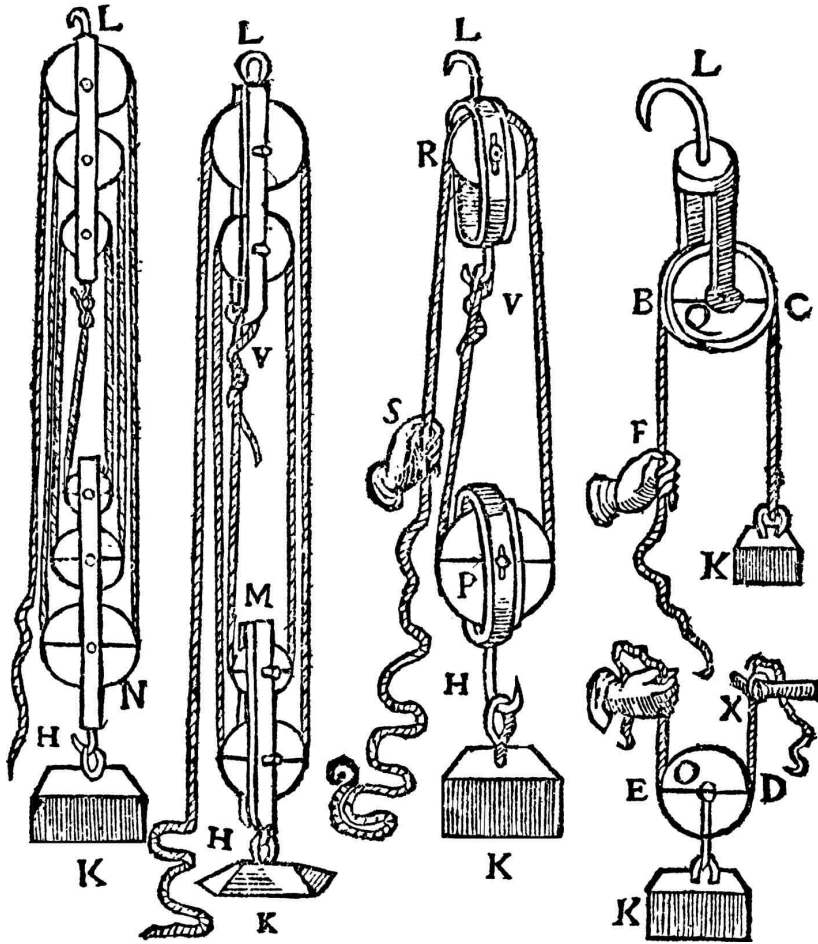


Rys. 3-22. Wciągarka budowlana - wałek prosty z drągami (SOLSKI 1690)

z grabu lub głogu, ewentualnie z cisu, jaworu i dębu); łożyskowano je ślizgowo, stosując dostępne smary (smolę drzewną, tłuszcz zwierzęcy) na „żelaznych” czopach.

Specyficznym urządzeniem do transportu bliskiego jest przenośnik kubelkowy przedstawiony przez SOLSKIEGO (1690, Księga I, Zabawa I, Nauka 53). Podobny jak niżej opisany był używany przy fortyfikacji Gdańska w XVII wieku. Niemal całe urządzenie, poza okuciami, było zbudowane z drewna (rys. 3-24). Napęd przenośnika zapewniał kierat koński. O 75 lat późniejszy od podręcznika Solskiego podręcznik Józefa Rogalińskiego (1765-1770) ma tę nad pierwszym przewagę, że język opisu jest łatwiejszy do zrozumienia. Rogaliński posługuje się polską terminologią techniczną zbliżoną do współczesnej. Przedstawiając zagadnienie czysto konstrukcyjne, stosuje opis ciągły, nie dzieląc go na poszczególne części. Korzystając ze sposobności, że w podręczniku zatytułowanym: *Doświadczenia skutków rzeczy pod zmysły podpadających* [...] Rogaliński zamieścił opis transportowego wyciągu linowego według Solskiego, posłużono się tymi objaśnieniami.

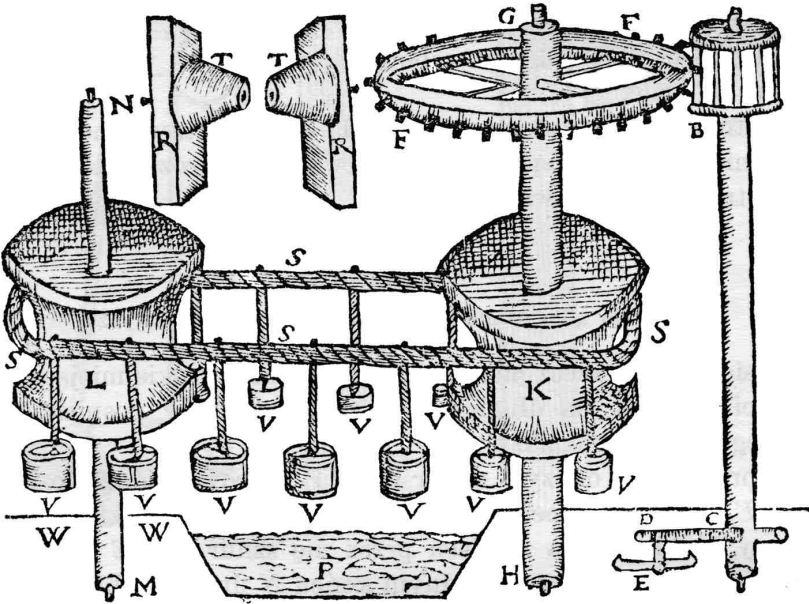
Do tych sposobów słusznie przydać należy ów sposób wygodny do nawożenia [tj. przewożenia] ziemi na sypanie wałów naokoło twierdz, kędy wybranie rowu R (w obrazku 5 [... - rys. 3-24]) nie dostarcza dość ziemi na wał W około miasta, które zmocnić chcemy. Wtenczas pospolicie z wielkim nakładem i mnóstwem ludzi przychodzi wał sypać takami [taczkami] albo wozami, zwłaszcza gdy jest odległe miejsce HE, z którego ma się brać



Rys. 3-23. Układy wielokrążków (SOLSKI 1690)

ziemia. Co wszystko może się jednak wykonać z znaczną ochroną pieniędzy i z małą liczbą ludzi, sporządziwszy dwa kręgi LK grube na walcach MH, HG mocnych i miększych osadzone, liną jednostajną S opasana, grubą na 4 [100 mm] albo 5 cali [125 mm], od której wisieć mają wiaderka drewniane V, we dwa lub trzy łokcie od siebie odległe [ok. 1,2-1,7 m].

Dla kręgu L z jego walcem MN stawia się zrzęb, czyli wiązanie [utwierdzenie] z drzewa za wałem, dla kręgu zaś K stawia się przy tym miejscu, skąd mają brać ziemię. Na walcu HG jest osadzone koło F palczaste, czyli



Rys. 3-24. Urządzenie linowe do transportu bliskiego (SOLSKI 1690)

zębate, które im będzie większe, tym bardziej lekkości przyczyni koniom obracającym walec CB z kółkiem szczebliwym B. Dyszle CD dwa lub cztery na walcu CB im dłuższe będą tym ujmą więcej ciężaru koniom. Lina S opasująca kręgi LK ma być zszyta. Zaś dla jej wciągania krąg L z swoim walcem MN ma być pomykalny, tak na dole przy M, jako na górze przy N, co łatwo się sprawi gdy sztuki wierzchnie i górne, w których osi walca MN obracać się mają, będą osadzone między dwoma drzewami na dole i na górze, żeby między niemi te sztuki, w których się osi MN utrzymują, mogły się klinami odbijać i tak linę wyciągnąć. Na koniec dla ulgi kręgom obracającym linę obciążoną wiaderkami, mają być porozstawiane tu i ówdzie po parze słupów RR trzymające na sworzniach żelaznych, mocnych kręgi T drewniane, otoczone mogilasto, wolno się obracające tak, żeby sznurzy z wiaderkami wolno między sworzniami płaskogłowatemi przechodziły, a lina gruba po kręgach T ciągnąć się mogła.

Czego wszystkiego w przygodzie tak używać można. Wyciągnąwszy najpierwej jak najlepiej linę i wiadra do niej przystosowawszy, parę koni albo cztery zaprzęć w dyszle stojące u walca CB, aby kółko szczebliwe B obracało kołem F, za którym obracać się będzie i krąg K, a ten linę S. Tymczasem na miejsce H ludzie dowozą ziemię takami z pobliza, drudzy zaś nasypują

coraz insze nadchodzące wiadra, które gdy przyjdą na miejsce W, mają być wywracane od jednego człeka, ziemię zaś wysypaną rozkładają drudzy na wale. Wiązanie do tego wszystkiego (które się w obrazku nie pokazuje, lecz każdy najprościejszy cieśla według przemysłu swego zrobić go może) takie ma być, aby się łatwo dało rozbierać i na insze miejsce według potrzeby ustawić. Z tego opisania każdy uzna, że ten sam sposób służyć może do prędkiego dostarczania wody na ugaszenie pożarów ognia, gdy się krąg K postawi przy studnie lub rzece, a drugi blisko pogorzelska, żeby z wiadra zamiast ziemi łać wodę (NOWAK 1961).

W przypadku dużych rozpiętości lin nośnych Solski przewidział odpowiednie wsporniki; są one narysowane w górnej części rysunku 3-24 i oznaczone literami N, R oraz T. W opisie autor podaje:

Na koniec: dla folgi kręgom [L i K] obracającym linę ociążoną węborkami [wiaderkami] mają być postawione tu [i] ówdzie po parze słupów R, trzymające na sworzniach żelaznych mocnych kółka T drewniane, otoczone mogilasto, wolno [swobodnie] się obracające, tak żeby sznury z węborkami wolno między sworzniami płaskogłowatymi przechodziły, a lina gruba po kółkach się ciągnęła (SOLSKI 1690).

3.3. Maszyny latające zbudowane z udziałem drewna

Nasza wiedza ma początek w tym, co czujemy
(Leonardo da Vinci, 1452-1519)¹⁵⁰

3.3.1. Początki lotnictwa

Istnieją dwa rodzaje maszyn latających – aerodynamy (skrzydłowce, śmigłowce, szybowce i samoloty) oraz aerostaty (balony, sterowce i statodyny). W najstarszych aparatach latających ich wszystkie główne układy były zbudowane z udziałem dostępnego i najlepiej do tego celu się nadającego materiału – drewna. W aerodynamach wyróżnia się cztery układy: (1) kadłuby i podwozia, (2) płaty nośne, (3) usterzenie i sterowanie, (4) napędy. Drewniane były: (1ad) układy kratowe, skorupowe, golenie, wózki

¹⁵⁰ PELADAN 1907 (cytowana myśl z Codex Trivulzianus, ok. 1487-1490).

i inne, (2) poszycie i układy kratowe, (3) stateczniki i stery, (4) śmigła. Główne podzespoły aerostatów to: (1) szkielety i gondole, (2) stery i stabilizatory, (3) napędy, (4) powłoki gazu nośnego. W aerostatach z drewna wykonywano: (1) konstrukcje podpierające powłokę gazową, konstrukcje gondol osobowych i silnikowych, mocowanie napędów, sterów itp., (2) poszycie płatów, (3) śmigła i elementy urządzeń ciągu, (4) układy upuszczania gazu.

W mitologiach wszystkich kultur świata znajdują się wzmianki o próbach latania. Jednym z pierwszych odważnych eksperymentatorów był Abbas Ibn Firnas¹⁵¹, który w 852 roku przed kalifem al-Rahmanem II próbował lotu z minaretu Mezquita w hiszpańskiej Kordobie. Wykorzystał do tego celu spadochron własnej konstrukcji, a w wyniku skoku odniósł lekkie obrażenia (FIRST FLIGHTS 1964). W 875 roku 65-letni Abbas podjął kolejną próbę, tym razem pilotowanego lotu z użyciem drewniano-płóciennej lotni. Lot ze wzgórza Jabal al-'arus w okolicach Kordoby, obserwowany przez wielu ludzi, zakończył się nieudanym lądowaniem i zranieniem pleców. Ibn Firnas nie próbował więcej latać, zmarł 12 lat później, w wieku 77 lat (FIRST FLIGHTS 1964).

Według WHITE'A (1978) benedyktyn brat Olivier¹⁵² z klasztoru Malmesbury¹⁵³ mógł wiedzieć o lotniczych próbach Abbasa Ibn Firnasa. W roku 1060, być może zainspirowany jego wyczynami, podjął nieudaną próbę lotu na lotni własnej konstrukcji z wieży kościelnej. Zmarł na skutek odniesionych obrażeń.

Już w 1267 roku angielski filozof Roger Bacon (ok. 1214-1292) przewidywał wynalezienie mikroskopu, teleskopu, okularów, statków parowych oraz maszyn latających pilotowanych przez człowieka:

Mogą być zbudowane okręty poruszające się bez wioślarzy, mogące żeglować zarówno po rzekach, jak i po morzu, prowadzone przez jednego człowieka z większą prędkością niż gdyby były pełne wioślarzy. Podobnie można skonstruować wozy jeżdżące bez użycia zwierząt pociągowych, napędzane niewiarygodną energią, tak jak podobno jeździły uzbrojone w kosy

¹⁵¹ Abbas Ibn Firnas vel Abbas Qasim Ibn Firnas lub w zlatynizowanej wersji: Armen Firman (810-887) – arabski wynalazca, muzyk i poeta; twórca metronomu.

¹⁵² Olivier (?-1060), Elmer lub Eselmer według różnych źródeł – mnich, mechanik, astronom i astrolog, zafascynowany grecką mitologią, szczególnie mitem o Dedalu i Ikarze (SEWERYN 1961, WILTSHIRE NOTES... 1896, Vol. 1, 1893-1895, s. 123).

¹⁵³ Miasto w południowej Anglii, około 150 km na zachód od Londynu, obecnie zamieszkałe przez blisko 5000 mieszkańców.

rydwany starożytnych. Mogą być zbudowane maszyny latające, takie że człowiek siedzący wewnątrz maszyny będzie nią kierował za pomocą pomysłowego mechanizmu i leciał przez powietrze jak ptak [wyróżnienie M.S.]. Ponadto można sporządzić przyrządy, które choć same niewielkie, wystarczą, aby podnieść lub przytłoczyć największe ciężary [...] Mogą też być skonstruowane przyrządy (podobne do tych, które wykonano na rozkaz Aleksandra Wielkiego), służące do chodzenia po wodzie lub do nurkowania¹⁵⁴.

Idea latania absorbowiała również Leonarda da Vinci, który około roku 1485 sporządził plany aparatów latających, lecz najprawdopodobniej nie próbował ich skuteczności w praktyce. Pozostawione przez niego notatki i szkice rozwiązań konstrukcyjnych, będące owocem licznych rozważań teoretycznych nad możliwościami lotu człowieka w maszynie napędzanej siłą mięśni, do dziś budzą podziw dla geniuszu ich autora. Da Vinci opracował teorię spadochronu, badał możliwości lotu człowieka z użyciem śmigłowca ze śrubą Archimedesesa o średnicy około 5 m (rys. 3-25 a), ruchomych skrzydeł (rys. 3-25 c, d) oraz aparatu zasadą działania przypominającego śmigłowiec (rys. 3-25 b).

W listopadzie 2002 roku, 500 lat po wykonaniu szkiców, na zamówienie telewizji BBC wykonano rekonstrukcję lotni Leonarda. Lotnia, zbudowana z materiałów dostępnych w XV wieku, ważyłaby bez pilota około 100 kg. Replika nie była wierną kopią, zastosowano w niej współczesne materiały konstrukcyjne¹⁵⁵, znacznie zmniejszając jej masę.

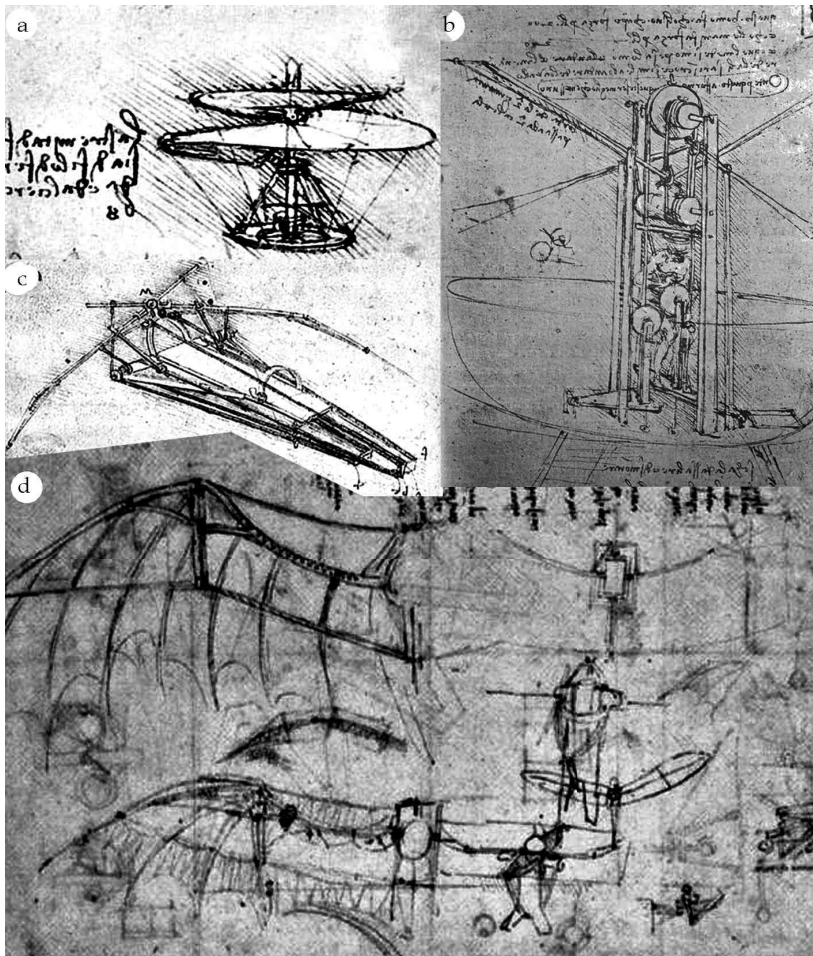
Obłudna replika (ang. *pious replica*), jak nieco złośliwie napisano w newsletterze z roku 2003¹⁵⁶, ważyła zaledwie około 23 kg. Wykonano na niej udane loty ślizgowe ze wzniesienia, najdłuższy trwał 18 s. Lotnia okazała się dość trudna w pilotażu.

Pomysł latania próbował urzeczywistnić w 1496 roku inny, współczesny da Vinciemu, matematyk Giovanni Dante z Perugii, który wszedłszy na szczyt Campanelli przeleciał lotem ślizgowym około 300 m lotnią własnej konstrukcji (SEWERYN 1961).

¹⁵⁴ Roger Bacon: *Epistola de Secretis Operibus Artis et Naturae* (SPRAGUE DE CAMP 1968, s. 407).

¹⁵⁵ Stopy aluminium zamiast drewna oraz tkaninę poliestrową (tzw. darkon) zamiast impregnowanego płótna.

¹⁵⁶ The Leonardo da Vinci Society, Issue 22, May/November 2003.



Rys. 3-25. Rysunki maszyn latających (LEONARDO DA VINCI 1483-1499, F. 846 v.): a - ornithopter, b - pierwowzór śmigłowca, c - śmigłowiec napędzany siłą mięśni, d - mechaniczne skrzydła

Fausto Veranzio¹⁵⁷ opublikował w 1595 roku rysunek spadochronu własnego pomysłu. Zdaniem biskupa Johna Willkinsa (1614-1672), sekre-

¹⁵⁷ Fausto Veranzio (1551-1617) – Chorwat, Faust Vrancic (łac. Verantius), włoski biskup, uczonec, pisarz, inżynier wojskowy, wynalazca, urodzony w Szybeniku, zmarły w Wenecji.

tarza Towarzystwa Królewskiego w Londynie, przetestował jego działanie w praktyce¹⁵⁸. Skorzystał przy tym z własnego pomysłu, podobnego do pomysłu Leonarda da Vinci, jednak zamiast kształtu piramidy jego spadochron miał kształt prostokątny.

Próby skonstruowania maszyn latających podejmowano również w Polsce. Można zaryzykować stwierdzenie, że tradycje lotnictwa polskiego sięgają XVI wieku i łączą się z postaciami Marcina Bielskiego (1495-1575), Tytusa Boratyniego (1617-1681), Łukasza Piotrowskiego (XVII w.) i Kazimierza Siemienowicza (ok. 1600-1651). Marcin Bielski w dziele *Sprawa Rycerska według postępków y zachowania starego obyczaju Rzymskiego, Greckiego, Macedońskiego...* (1569) przytacza najstarszy w literaturze polskiej opis rakiety. Tytus Liwiusz Boratyni w roku 1647 lub 1648 przedstawił królowi Władysławowi IV traktat pt.: *Latanie nie jest niemożliwe, tak jak to dotychczas sądzono (Il volare non e impossibile come fin ora e stato creduto)* i najprawdopodobniej zbudował pierwszy w świecie model silnikowego aparatu latającego cięższego od powietrza. Skrzydłowiec (ornitopter) został nazwany Latającym Smokiem, miał długość 1-1,5 m i był zaopatrzony w ruchome skrzydło napędzane mechanizmem sprężynowym. W roku 1646 Łukasz Piotrowski, profesor Akademii Krakowskiej (dzisiejszego Uniwersytetu Jagiellońskiego), zbudował lotnię, za pomocą której bezskutecznie usiłował wznieść się w powietrze. W roku 1650 w Amsterdamie ukazała się książka *Artis Magnae Artilleriae Pars Prima (Wielkiej Sztuki Artylerii Część Pierwsza)* autorstwa Kazimierza Siemienowicza, zawodowego oficera artylerii. Dzieło zawiera dużo wiadomości o broni raketowej; jest tam praktyczny opis rakiet do walki w polu, oblężniczych i sygnalizacyjnych. Co ciekawe, Siemienowicz opisuje też rakiety wielostopniowe i pociski ze stabilizatorami aerodynamicznymi. Praca Siemienowicza została już w 1651 roku wydana w języku francuskim, w 1776 roku we Frankfurcie po niemiecku, a jeszcze 80 lat po pierwszym wydaniu niewiele widocznie straciła na aktualności, skoro w 1729 roku ukazała się w Londynie jej angielskojęzyczna reedycja.

Dzieło Siemienowicza obejmowało dwie części, jednak druga część, zapewne na skutek przedwczesnej śmierci autora, nie została wydana, a rękopis zaginął. Zachowana część pierwsza składa się z pięciu ksiąg: (1) *O przyrządzie do obliczania kalibrów dział i o jednostkach miar używanych*

¹⁵⁸ Taka informacja znajduje się w traktacie *Mathematical Magic of the Wonders that may be Performed by Mechanical Geometry (Matematyczna magia cudów, które mogą powstać za pomocą mechaniki wykreślnej)*, wydanym w Londynie w 1648 roku.

w różnych czasach i w różnych krajach, (2) O materiałach i metodach wyrobu prochu strzelniczego, (3) O produkcji rakiet, (4) O produkcji amunicji artyleryjskiej oraz (5) O pirotechnice. Największym osiągnięciem autora jest księga trzecia. Siemienowicz wyprzedza w niej swą epokę o 300 lat, omawiając i przedstawiając na rysunkach rakiety ze stabilizatorami typu delta, rakiety wielostopniowe oraz baterie rakiet¹⁵⁹.

Siemienowicz nie był jedynym Polakiem zajmującym się napędami rakietowymi. Na przełomie XVI i XVII wieku Walenty Zebisz (Sebisch) (1577-1657) z Raduszkowic na Śląsku, architekt, wynalazca, astronom i pirotechnik, podejmował problematykę budowy rakiet i ich zastosowania. W roku 1743 Wojciech Bystrzonowski (1699-1770) opublikował traktat *Informacja matematyczna*¹⁶⁰, gdzie w rozdziale *Informacja artyleryjna* podał dokładny opis konstrukcji rakiet. Wprawdzie cała *Informacja...* była tylko kompilacją innych, zagranicznych dzieł, jednak zawierała wiele wartościowej i w przystępny sposób przedstawionej wiedzy (NOWAK 1961). W latach 1818-1823 Józef Bem eksperymentował z rakietami w Arsenale Warszawskim, a swoje wnioski opisał w traktacie *Uwagi o rakietach zapalających* (1819)¹⁶¹. Jego badania zaowocowały powołaniem w wojsku polskim pierwszej półbaterii rakieterów konnych (1823) i pieszych (1824).

Pierwszych, historycznie udokumentowanych lotów dokonano balonami. Bracia Montgolfier, zainspirowani traktatem o powietrzu Josepha

¹⁵⁹ Kazimierz Siemienowicz miał godnych siebie poprzedników w dziedzinie pirotechniki. W czasie oblężenia Pskowa dowódca koronnej artylerii Jan Ostromecki skonstruował bezprecedensowe urządzenie w formie metalowej skrzyni wypełnionej materiałem wybuchowym umieszczonej w skrzyni drewnianej. Posłano je jako rzekomy podarunek od hetmana Zamoyskiego dla kniazia Szujskiego dowodzącego załogą twierdzy. Pisze o tym Benedykt Chmielowski w encyklopedii *Nowe Ateny* (1745-1746) w rozdziale *O magii czyli czarnoksiężstwie: Pod Pleszkowem za Hetmana Zamoyskiego, z inżynierii i inwencji Ostrzemeckiego Generała Artylleryi machina wymyślona takowa, że w skrzyni żelaznej było pistoletów nabitých prochem strzelbny, z cienkimi rurami umyślnie zrobionych, tak akkomodowanych, że jednego z odwiedzionym kurkiem dotknąwszy, wszystkie mogły dać ognia i porozrywać się, cum periculo tykających i blisko zostających; włożona była do drzewianej skrzyni, sznurek wewnątrz szedł do cyngla owego pistoletu z odwiedzionym kurkiem, do drzewianej skrzyni drugim końcem przywiązany, aby tak skrzynię drzewianą, czyli otwierając, czyli żelazną z niej wyciągając; cyngla ruszono z daniem fatalnego ognia. Ta machina tak sporządzona dostała się Szuyskiemu, Wodzowi Moskiewskiemu; rozumiejąc, że wielkie w niej skarby, gdy chciwie otwierano, wiekiem szarpniono za sznur ów i cyngiel, ognia dały pistolety rozerwawszy się, kilku zabity, drugich przestraszyły.*

¹⁶⁰ Pełny tytuł: *Informacja matematyczna; rozumie ciekawego Polaka; Świat cały, Niebo, y Ziemię, y co na nich jest. W trudnych Kwestyach y Praktyce jemuż ułatwiająca.*

¹⁶¹ Francuskojęzyczny tytuł oryginału: *Notes sur le fusees incendiaires.*

Priestleya, wykonali szereg eksperymentów z papierowymi torebkami. Zachęteni sukcesami, postanowili dokonać publicznej próby wzniesienia się bezzałogowego balonu na ogrzane powietrze na rynku w Annonay. 5 czerwca 1783 roku balon w ciągu 10 min osiągnął wysokość około 500 m. Wydarzenie to opisała *Gazeta Warszawska* z 8 września 1783 roku:

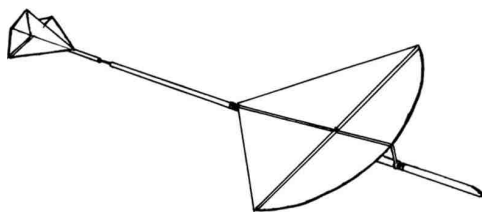
Mamy świeży wynalazek, który Zwierzchność tutejsza osądziła za rzecz przyzwoitą podać do wiadomości publicznej zapobiegając próżnym strachom, które by nowość rzeczy sprawić mogła między pospółstwem. Rachując różnicę ciężkości pomiędzy powietrzem nazwanym „palącym się” i powietrzem naszej atmosfery, docieczono tego, że wielka jaka kula z lekkiej materyi, napęczniona tym powietrzem „spalającym się” powinna sama przez się podnieść w niebo i póty coraz wyżej lecieć, póki te oba powietrza nie będą z sobą w równej wadze co być nie może, chyba w wielkiej wysokości. Pierwsze tego doświadczenie uczynione było w Langwedocji w powiecie Vivarais w mieście Annoniakau od samych wynalazców Panów Montgolfier. Bania z płótna i papieru zrobiona, mająca 150 stóp obwodu i tym powietrzem „spalającym się” napęczniona, podniosła się sama przez się do znacznej wysokości, której zrachować nie można było.

Pierwszymi lotnikami były baran, kogut i kaczka, które bracia Montgolfier umieścili w klatce, włożyli do gondoli i wypuścili w powietrze. Start odbył się w Wersalu w obecności króla 19 września 1783 roku. Zwierzęta wylądowały pomyślnie. To wydarzenie również opisała *Gazeta Warszawska*:

Przeszłego piątku czyniono próbę w Wersalu bani wynalezionej od panów Montgolfier w przytomności Królestwa Ichmościów, całego dworu i wielu tysięcy spektatorów. Przez 10 minut napętniał Pan Montgolfier tę niestychaną banię palącym powietrzem. Podniosła się ona wprzód letka w górę, co zaraz powszechnie u wszystkich podziwienie sprawiło. Zatrzymała się potem około siedmiu minut na powietrzu i na 200 sążni [354 m] wzniosła w górę. Zachodni wiatr przyniósł ją, iż horyzontalny bieg wzięła i nazad po tym się spuszczała przez 27 prawie sekund. Na ostatek spadła na ziemię o pół godziny drogi od tego miejsca, na którym się wznosiła. W tej bani znaleziono dziurę. Przywiązany do niej był kosz, w który wsadzony był skop, kur i kaczka, które żyły wszystkie i zgoła nie zdziaczały. Po tej próbie Pan Montgolfier był Królestwu Ichmościom prezentowany i najtąskawiej od nich przyjęty.

Pierwszy lot balonowy w Warszawie miał miejsce w 1789 roku – z tej okazji król Stanisław August polecił wybić pamiątkowy medal. Pierwszym polskim lotnikiem był Jan Potocki, który wzniósł się w powietrze w 1790 roku. Loty balonowe stały się ulubionym sportem wyższych warstw społeczeństwa, a ich popularność trwała niezmiennie przez cały XIX wiek.

Kiedy zdawało się, że przyszłość latania należy do baloniarstwa, eksperymenty brytyjskiego inżyniera Sir George'a Cayleya (1773-1857) ponownie zwróciły uwagę na skrzydła. Po wykonaniu prób z latawcami wykazał on, że jest możliwość wytworzenia odpowiedniej siły nośnej do wzniesienia się człowieka. Forma konstrukcyjna współczesnych samolotów przypomina formę modelu szybowca z 1804 roku (rys. 3-26).

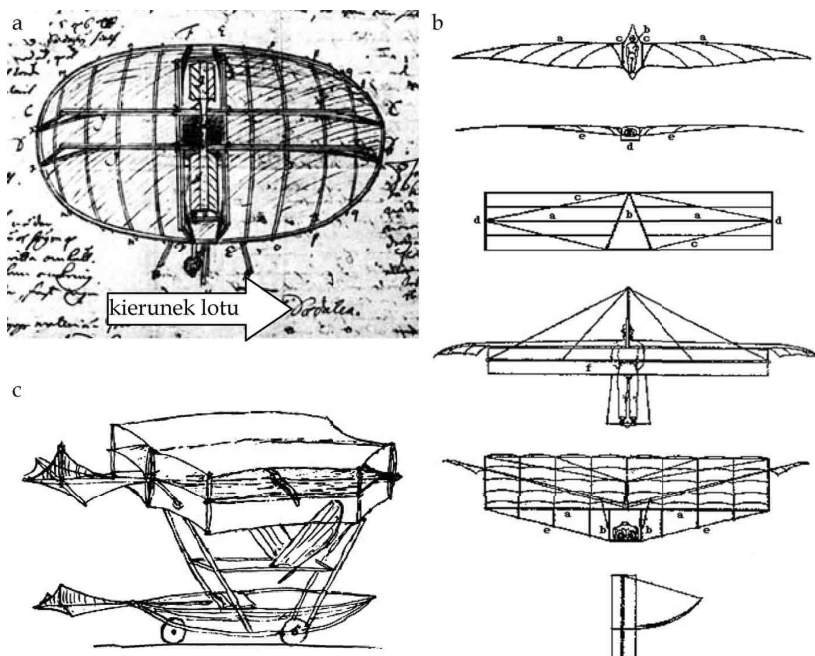


Rys. 3-26. Model szybowca (George Cayley, 1804)

Po latach doświadczeń, w roku 1853 Cayley zbudował pełnowymiarowy szybowiec (na podstawie koncepcji przedstawionej na rys. 3-27 b), na którym przeleciał kilkanaście metrów, wystartowawszy ze wzniesienia. Replika monoplanu Cayleya została z sukcesem oblatana w 1985 roku.

Wczesne koncepcje maszyn latających cięższych od powietrza przedstawia rysunek 3-27. Na rysunku 3-27 a przedstawiono, w widoku z góry, maszynę latającą Emanuela Swedenborga (1688-1772). Maszyna ta, napędzana siłą mięśni siedzącego w jej centralnej części pilota, była zbudowana z drewna pokrytego impregnowanym płótnem i w zasadzie była jednym wielkim wypukłym skrzydłem. Siła wznosząca była dostarczana dwoma mniejszymi skrzydłami, poruszającymi się w poziomie. Były one pomyślane tak, że ich ruch w górę spotykał się z o wiele mniejszym oporem aerodynamicznym niż ruch w dół, dostarczający siły wznoszącej.

Swedenborg zdawał sobie sprawę, że przy ówczesnym stanie techniki maszyna nie ma szans na lot, i zaznaczył w opisie, że jest to jedynie



Rys. 3-27. Koncepcje pierwszych drewnianych szybowców: a – lotnia (Emanuel Swedenborg, 1714), b – *monoplan* (George Cayley, 1848), c – lotnia (Francis H. Wenham, 1866)

projekt koncepcyjny, do realizacji w przyszłości. Publikując anonimowo swój projekt maszyny do *ptywania w powietrzu*¹⁶², napisał:

[...] łatwiej rozmawiać o takiej maszynie, niż wprowadzić ją w życie, ponieważ wymaga ona większej siły i mniejszej wagi, niż ma ludzkie ciało. Mechanika mogłaby być może zasugerować jakiś sposób, na przykład silną sprężynę spiralną. Jeżeli weźmiemy te obserwacje pod uwagę, być może za jakiś czas komuś uda się lepiej użytkować nasz szkic i dzięki zmianom i dodatkom spowodować to, co my możemy tylko zasugerować. Istnieją przecież w przyrodzie wystarczające dowody na to, że takie loty mogą mieć miejsce bez ryzyka, chociaż pierwsze próby mogą być okupione zapłatą za uzyskane doświadczenie w postaci złamanej ręki albo nogi.

¹⁶² Szw. *Machine att flyga i wädret*.

Marzenie o lataniu odbija się w naszych ludowych opowieściach. Wśród polskich górali krąży po dziś dzień legenda o tajemniczym mni-
chu, kamedule, bracie Cyprianie z Czerwonego Klasztoru w Pieninach¹⁶³,
który na skonstruowanych przez siebie skrzydłach miał odbyć udany
lot ślizgowy ze szczytu Trzech Koron do turni nad Morskim Okiem,
zwanej odtąd na jego cześć Mniczem. Ponoć władze kościelne na wieść
o tym zabroniły dalszych prób latania i na rozkaz biskupa lotnia została
spalona.

Według innej ludowej, niepotwierdzonej opowieści udanego lotu do-
konał pewien chłop z okolic Żywca, który skonstruował skrzydła z za-
impregnowanych prześcieradeł rozpiętych na drewnianym szkielecie
umocowanym do ramion oraz nóg i skoczył ze szczytu wiatraka. Pod-
czas pierwszej udanej próby przeleciał kilkadziesiąt metrów i wylądow-
wał szczęśliwie. Druga próba była całkowicie nieudana i zakończyła się
upadkiem i złamaniem nogi.

Poeta Seweryn Goszczyński w swym *Dzienniku podróży do Tatrów* wy-
danym w 1822 roku pisze o pewnym góralu z Gliczarowa, Wojciechu Ku-
łachu zwanym Wawrzyńczakiem (1810-1894). Według Goszczyńskiego
zbudował on drewniane skrzydła do latania, na których nie udało mu się
jednak wzlecieć. Niezrażony niepowodzeniem z samodzielnym oderwa-
niem się od ziemi postanowił spróbować lotu ślizgowego. Skonstruował
w tym celu lotnię, którą wypróbował, wykonując kilkumetrowe loty śli-
zgowo z dachu własnej chaty. Niezadowolony z ich długości, postano-
wił poszybować ze stromego urwiska. Niestety, jego lotnia okazała się
niestabilna i niesterowna w powietrzu. Wawrzyńczak runął ze znacz-
nej wysokości, łamiąc sobie obie nogi. Nie podjął już więcej prób latania
(GOSZCZYŃSKI 1822).

Pierwszym Polakiem, któremu udało się wykonać loty ślizgowe na
lotni własnej konstrukcji, był chłop z Powiśla Dąbrowskiego Jan Wnęk
(1828-1869)¹⁶⁴. W latach 1866-1869 wykonał on cztery lub więcej lotów

¹⁶³ Czerwony Klasztor (słow. *Červený Kláštor*) – miejscowość nad Dunajcem w pół-
nocnej Słowacji.

¹⁶⁴ Jan Wnęk był synem chłopca pańszczyźnianego. Urodził się w 1828 roku we wsi
Kaczówka. Był analfabetą. Jedną z jego licznych pasji było rzeźbiarstwo, któremu
oddawał się od dzieciństwa. W wieku kilkunastu lat terminował u jednego z lokal-
nych cieśli, gdzie wyuczył się zawodu. Wnęk nie ograniczył się jedynie do budowy
dachów. Był bardzo wszechstronnym rzemieślnikiem. W wolnych chwilach majster-
kował i ulepszał narzędzia rolnicze, zajmował się rzeźbiarstwem (rzeźbił w drewnie
i w kamieniu). Występował też jako aktor w wiejskich misteriach.

z wieży kościoła w Odporyszowie. Loty Jana Wnęka miały miejsce blisko 20 lat przed lotami Otto Lilienthala uznawanego powszechnie za pioniera szybownictwa. Niestety, w przeciwieństwie do Lilienthala, Wnek nie upowszechnił swojego wynalazku. Zasługi Jana Wnęka dla szybownictwa odkrył i przypomniał profesor Tadeusz Seweryn, długoletni dyrektor krakowskiego Muzeum Etnograficznego (w Muzeum można zobaczyć model lotni Wnęka).

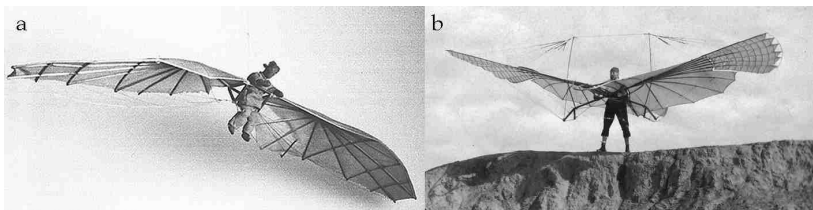
Wnek już od wczesnego dzieciństwa interesował się budową ptasich skrzydeł i zachowaniem ptaków podczas lotu. Zanim przystąpił do budowy lotni, minęło kilka lat uważnych obserwacji i rozważań nad jej możliwą formą konstrukcyjną. W przeciwieństwie do Lilienthala i Tańskiego, którzy – zanim zaczęli latać – zapoznali się z całą dostępną literaturą dotyczącą problematyki awiacji, Wnek, analfabeta i samouk, mógł liczyć tylko na swoją pomysłowość, znajomość rzemiosła oraz wiedzę o naturze, opartą na obserwacji lotu ptaków. Do przedsięwzięcia zabrał się bardzo metodycznie. W pierwszej kolejności skonstruował model i dokładnie wypróbował jego zachowanie w locie. W trakcie prób wprowadzał szereg poprawek. Do budowy zastosował drewno jesionowe, które posłużyło do wykonania szkieletu. Poszycie było wykonane z impregnowanego cienkiego płótna. Szkielet konstrukcyjny lotni oraz wszystkie połączenia, linki i dźwignie, zrobione z włókien lnianych, impregnował pokostem lnianym. Za pomocą lotni, po przymocowaniu strzemion do tułowia, barków i nóg, mógł Wnek ze wzgórza lub wieży kościelnej przelecieć pewien odcinek niesterowanym lotem ślizgowym. Pierwsze krótkie, kilkusetmetrowe loty odbył Wnek ze wzgórza w Odporyszowie, będącego niegdyś wałem obronnym. Próby wypadły dobrze – pierwszy polski szybowiec był gotowy do lotu latem 1866 roku. Wnek postanowił wykonać lot z nieistniejącej już drewnianej wieży dzwonnicy kościoła w Odporyszowie, która wraz ze wzgórzem, na którym stała, wznosiła się 95 m ponad okoliczne doliny. Po uzyskaniu zgody proboszcza¹⁶⁵ Wnek odbył swój pierwszy lot w czerwcu 1866 roku w czasie odpustu w odporyszowskim kościele, na który ściągnęły tłumy ludzi z całej okolicy.

Za pomocą zaimprovizowanej windy wciągnięto lotnię Wnęka na szczyt wieży. On sam wszedł tam po licznych krętych schodach, a potem

¹⁶⁵ Ksiądz Stanisław Morgenstern, późniejszy poseł do sejmu galicyjskiego. Zlecił on Wnekowi odbudowę spalonego dachu kościelnego. Ponieważ Wnek wykonał tę pracę bardzo solidnie i szybko, zyskał sympatię proboszcza, który od tego czasu wspierał jego próby latania.

po drabinach na specjalny pomost. Za nim wszedł jego pomocnik Michał Sowiński. W asyście Sowińskiego Wnęk odczepił lotnię od liny i ustawił na pomoście. Pomocnik przypiął Wnękowi skrzydła, zaciskając mocno paski na piersiach, rękach i nogach. Wnęk zeskoczył z pomostu, na oczach tłumu poszybował w powietrzu i zniknął za pobliskim wzgórzem, gdzie szczęśliwie wylądował. Ten jego pierwszy przelot miał długość około 2 km. Setki ludzi popędziły na miejsce lądowania pierwszego szybownika i zgotowały mu gorącą owację.

Sława o tym wydarzeniu dotarła do Krakowa, gdzie nieznany autor umieścił o locie chłopca Wnęka wzmiankę w jednym z kalendarzy. W latach 1866-1869 Wnęk dokonał kilku lotów na swej lotni z okazji świąt, odpustów i jarmarków. Pierwszy polski lotnik, podobnie jak Otto Lilienthal, zmarł na skutek wypadku, który się wydarzył podczas lotu. W 1869 roku podczas nieudanego lądowania doznał ciężkich obrażeń, na skutek których zmarł 10 lipca 1869 roku w wieku 41 lat. O Wnęku niemal całkowicie zapomniano. Rekonstrukcję lotów Jana Wnęka przedstawia rysunek 3-28 a.



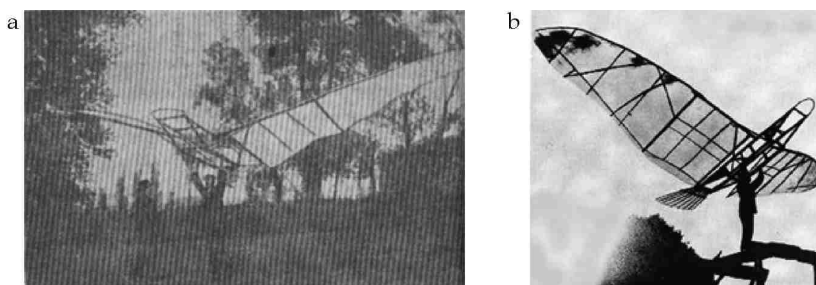
Rys. 3-28. Pierwsze aparaty latające: a – rekonstrukcja lotów Jana Wnęka (model przechowywany w krakowskim Muzeum Etnograficznym), b – zdjęcie Otto Lilienthala

W latach 1890-1900 ogromne zasługi dla rozwoju lotnictwa położyli Niemiec Otto Lilienthal (1848-1896) i Amerykanin Octave Chanute (1832-1910)¹⁶⁶. Obaj niezależnie od siebie wykonywali loty ślizgowe na drewnianych szybowcach własnej konstrukcji. Otto Lilienthal (nazywany ojcem szybownictwa, ponieważ jego analizy teoretyczne oraz późniejsze badania praktyczne były źródłem wiedzy i inspiracji dla wielu naśladow-

¹⁶⁶ Octave Chanute jest współautorem książki *Maszyny latające: konstrukcja i obsługa* (ang. *Flying machines: construction and operation*); wydanej po jego śmierci (JACKMAN i IN. 1912).

ców) napisał i wydał w 1889 roku monografię *Lot ptaka jako podstawa sztuki latania* (niem. *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegerkunst*). Lilienthal wykonał około 2000 udanych lotów o długości sięgającej do 500 m, niestety, zginął 9 lipca 1896 roku podczas próby lotu na dwupłatowym szybowcu zaopatrzonym w ster głębokości. Jest autorem 23 patentów, z których cztery dotyczyły maszyny latającej¹⁶⁷ (rys. 3-28 b). Octave Chanute – inżynier z wykształcenia – wykonał znacznie mniej lotów, jednak zbudowany przez niego szybowiec dwupłatowy miał układ sterowania, którego zasadę działania wykorzystuje się do dzisiaj.

Najbardziej znanym polskim konstruktorem i szybownikiem był Czesław Tański (1862-1942), powszechnie uznawany za ojca polskiego szybownictwa. Od 1893 roku zajmował się budową udanych modeli latających o napędzie gumowym. Pod wpływem wiadomości o próbach z szybowcem Ottona Lilienthala w 1895 roku zbudował własny szybowiec nazywany *Lotnią*, który później wielokrotnie udoskonalał (rys. 3-29).



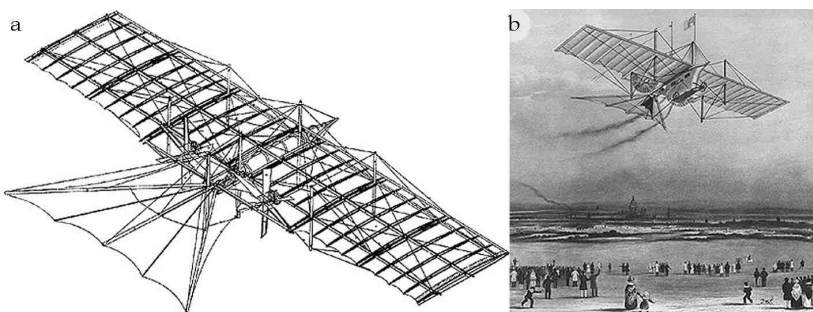
Rys. 3-29. Lotnie Czesława Tańskiego: a – pierwsza wersja, 1895 (KONIECZNY 1984), b – trzecia wersja, 1896 (GLASS 1984)

Biegając pod wiatr z *Lotnią* w wersji trzeciej (rys. 3-29 b), dokonywał krótkich skoków, aczkolwiek informacja, że wykonał 30-metrowy lot, który miał być pierwszym w historii szybownictwa wzlotem z terenu płaskiego, jest poddawana w wątpliwość z uwagi na ograniczenia wynikające z konstrukcji lotni (GLASS 2004). *Lotnia* została później przekazana do Muzeum Przemysłu i Techniki w Warszawie, gdzie uległa zniszczeniu podczas obrony Warszawy we wrześniu 1939 roku.

¹⁶⁷ Deutsches Reichspatent Nr. 77916 (77) *Flugapparat*, 3.09.1893/10.11.1894; British Patent N° 2519 *Flying machines*, 1894; United States Patent N° 544816 *Flying machine*, 1.02.1894/20.08.1895; Deutsches Reichspatent Nr. 84417 (77) *Flugapparat*, 29.05.1895.

3.3.2. Loty silnikowe

W latach pięćdziesiątych XIX wieku wielu teoretyków lotnictwa doszło do wniosku, że aby efektywnie kierować statkiem powietrznym należy go wyposażać w silnik. W tym okresie dysponowano dwoma typami silników: elektrycznym oraz parowym, i tylko ten ostatni nadawał się do zamontowania w samolocie. Ówczesny silnik parowy miał za sobą ponad 100 lat rozwoju i był już konstrukcją dojrzałą. W roku 1842 pierwszy projekt samolotu napędzanego tego typu silnikiem opracował Anglik William Samuel Henson (1812-1888). Swój samolot konstruktor planował wyposażać w silnik o mocy 25-30 KM (ok. 20 kW), co, jak zresztą sam później przyznał, było mocą zbyt małą dla płatowca o masie 1360 kg, rozpiętości skrzydeł 45 m i powierzchni nośnej 140 m². Silnik miał napędzać dwa sześciolopatowe przeciwbieżne śmigła (KOCENT-ZIELIŃSKI 2008, GRAY 2008). Konceptję samolotu Hensona o nazwie *Henson aerial steam carriage* przedstawiono na rysunku 3-30 a. Konstrukcję kadłuba i skrzydeł wykonano w formie drewnianej kratownicy stężonej cięgnami, poszycie było wykonane z impregnowanego płótna. Płócienne poszycie prostokątnych skrzydeł było rozpostarte na drewnianych wyprofilowanych żebrach, które nadawały skrzydłom odpowiedni wypukły profil aerodynamiczny, żebra były połączone drewnianymi drążkami. Połączenia drewnianych elementów wykonano z użyciem drucianych opasek, druty łączące elementy były również przeciągnięte wewnątrz drewnianych drążków łączących żebra. Konstrukcja była zbliżona do szybowca Cayleya (rys. 3-26, s. 162). Konstruktor wraz z trzema współnikami założył firmę, która miała zarabiać na przewozach pasażerskich (rys. 3-30 b).

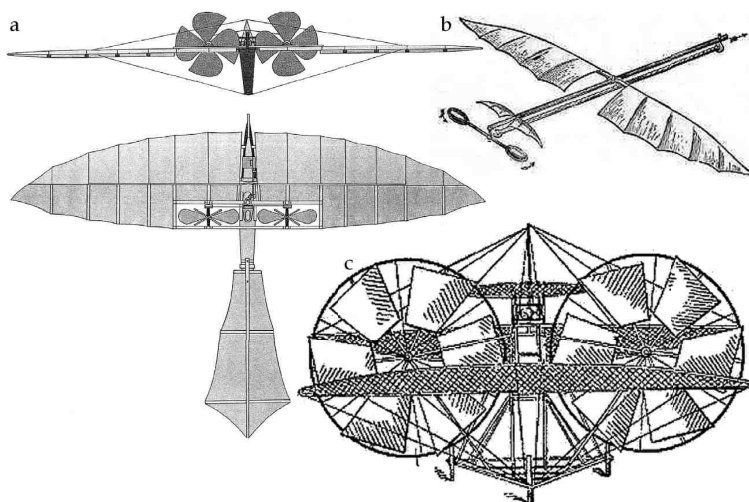


Rys. 3-30. Projekt samolotu parowego Williama Hensona (1842): a – szkic z opisu patentowego (patent nr 9478 z 1843 roku), b – rysunek z folderu reklamowego

W latach 1844-1847 przeprowadzono szereg prób polowych z modelem w skali 1:7,5 o rozpiętości skrzydeł 6 m, wyposażonym w jednocylindrową maszynę parową. Niestety, bez sukcesów. Z uwagi na niepowodzenia prób z modelem pełnowymiarowy prototyp nie został nigdy skonstruowany.

William Samuel Henson włożył w swój projekt mnóstwo energii i nadał mu spory medialny rozgłos. Mimo braku realizacji jego idea stała się inspiracją do działania innych wynalazców oraz podstawą szerokiej dyskusji poświęconej przyszłości napędu lotniczego. Dyskusja ta i rozważania teoretyczne były zapewne powodem tego, że lata późniejsze obfitowały w liczne modele samolotów z napędem parowym.

Po wyjeździe Hensona w roku 1848 do Ameryki podobne prace z modelem o rozpiętości skrzydeł 3,04 m, długości 1,67 m i powierzchni nośnej 1,3 m² kontynuował jego najbliższy współpracownik John Stringfellow (1799-1883). Model ten – ważący wraz z silnikiem parowym i paliwem około 3,9 kg – wykonał po kilku poprawkach wiele udanych lotów. Napędzały go dwa śmigła o średnicy 0,4 m (rys. 3-31 a). W 1867 roku Stringfellow zbudował nowy model trójplata o masie 5,4 kg, powierzchni nośnej 2,6 m², z maszyną parową o mocy 0,33 KM (0,24 kW), który demonstrował w Crystal Palace. W rok później zbudował silnik – tym razem z podwójnym rozprężaniem – o mocy 1 KM (0,74 kW), za który otrzymał



Rys. 3-31. Modele samolotów parowych: a – samolot parowy (John Stringfellow, 1848), b – automatyczny ster (Alphonse Pénaud, 1871), c – samolot Aerial Steamer (Thomas Moy, 1875)

nagrodę od Królewskiego Związku Awiacyjnego w Londynie. Znajduje się on dziś w zbiorach Smithsonian Institution.

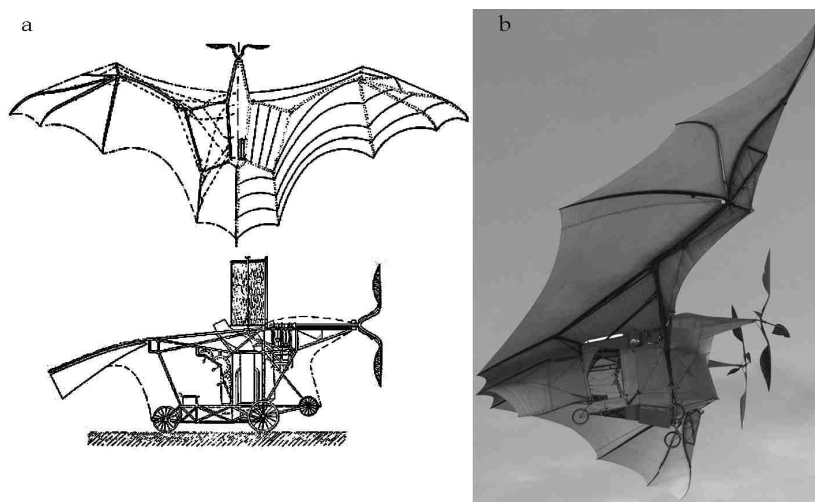
W 1875 roku udany model samolotu zbudował i oblatął Thomas Moy. Maszyna parowa w nim zastosowana miała współczynnik mocy 45,6 kg/kW (ok. 3 KM (2,2 kW) przy masie 98 kg – rys. 3-31 c).

W końcu lat siedemdziesiątych XIX wieku najłżejsze silniki parowe uzyskiwały masy jednostkowe rzędu 25,6 kg/kW. Pierwszą, nieudaną, próbę wzlotu pełnowymiarowym samolotem wyposażonym w silnik parowy podjął w 1874 roku francuski oficer marynarki Felix Rivallon de la Croix du Temple (1823-1890). Próby z modelami samolotów parowych przeprowadzał w USA od roku 1893 Samuel Pierpont Langley (1834-1906), stosując w nich silniki o mocy do 1,5 KM (1,1 kW). Z jego modeli zasługuje na uwagę *aerodrome No. 5*, oblatany 9 maja 1896 roku. Miał on rozpiętość skrzydeł 4,1 m, masę 14 kg i silnik parowy o mocy 1 KM (0,74 kW). Model ten przeleciał w drugiej próbie zupełnie poprawnie odległość 1 km, utrzymując wysokość 30 m. Następny, podobny model nazwany *aerodrome No. 6*, z mocniejszym silnikiem, został oblatany 28 listopada 1896 roku i przeleciał 1200 m w czasie 1 min i 45 s. Ostatnim modelem tego typu był oblatany 8 kwietnia 1903 roku egzemplarz z maszyną parową o współczynniku mocy 4 kg/kW.

Próbnymi lotów podjętymi w latach siedemdziesiątych XIX wieku interesował się Clément Ader (1841-1926), autor pierwszego poważnego sukcesu w dziedzinie lotów silnikowych samolotami pełnowymiarowymi. W samolocie *éole* własnej konstrukcji, zbudowanym w latach 1882-1889, wyposażonym w jedno czterołopatowe śmigło, początkowo zastosował dwucylindrową maszynę parową o mocy 20 KM (14,7 kW). *Éole* przedstawia rysunek 3-32. Ponieważ pierwsze próby w 1889 roku zakończyły się niepowodzeniem, Ader przystąpił do modernizacji samolotu. Zamontował mocniejszy silnik o mocy jednostkowej 690 W/kg (30 KM, tj. ok. 22 kW) oraz dokonał kilku innych modyfikacji konstrukcji.

Samolot Adera, mimo korzystnego stosunku wagi całkowitej samolotu do mocy silnika (tylko 2,2 kg/kW), dokonał zaledwie dwu krótkich lotów-skoków: w październiku 1890 roku i we wrześniu 1891. W trakcie pierwszej próby Ader oderwał się od ziemi i wykonał niski lot na odległość około 50 m¹⁶⁸; druga próba, pomimo kotła zmienionego na wydajniejszy, zakończyła się niepowodzeniem – samolot został poważnie uszkodzony. Ponieważ wyczyn z 1890 roku po dziś dzień budzi liczne kontrowersje,

¹⁶⁸ Podobne osiągnięcia miał Amerykanin Samuel P. Langley, przeprowadzający swoje próby w 1903 roku nad rzeką Potomac. Jego model w skali 1:4 wykonywał ponad 300-metrowe loty. Konstruktor jednak nie zdecydował się na loty samolotem pełnowymiarowym.



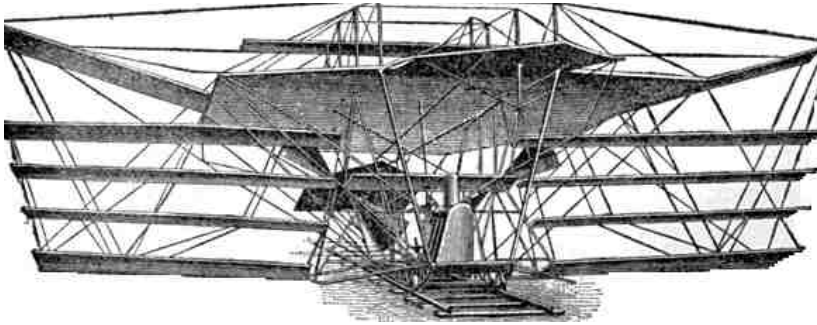
Rys. 3-32. Samolot *éole* Clémenta Adera z 1890 roku: a - rysunek, b - rekonstrukcja

warto wyjaśnić, że lot Adera odbył się na tak niewielkiej wysokości, że był niezauważalny nawet dla naocznych świadków, a o jego zaistnieniu świadczył jedynie zanik śladów kół samolotu na mokrej trawie. W latach trzydziestych XX wieku pilot i konstruktor Glenn Curtiss odtworzył z istniejącej dokumentacji samolot *éole* Adera, wyposażył go jednak w lżejszy i mocniejszy silnik benzynowy i dzięki temu z powodzeniem go oblatał.

Kolejnym samolotem skonstruowanym przez Adera był *Avion III*, tym razem wyposażony w dwie maszyny parowe i dwa śmigła. Silniki przy masie 23 kg każdy osiągały moc 22-23 KM (16,1-16,9 kW), co przekładało się na stosunek masy samolotu do mocy silnika wynoszący 7,4 kg/kW – wskaźnik długo nie osiągnięty w samolotach z silnikami spalinowymi (masa całkowita samolotu wynosiła 400 kg). Samolot ten wykonał także krótki lot-skok zakończony uszkodzeniem. Do niepowodzenia próby przyczyniły się – podobnie jak w poprzednim przypadku – nieprawidłowy pilotaż, konstrukcja samego płatowca uniemożliwiająca mu lot sterowany oraz niewłaściwe warunki startu.

W historii prób lotniczych znaczące miejsce zajęły także prace Hiram Maxima (1840-1916). Był on z wykształcenia inżynierem elektrykiem, ale pieniądze na eksperymenty lotnicze, którymi interesował się od dawna, dało mu wynalezienie karabinu maszynowego. W roku 1894 zbudował on wielki samolot (czteropłat, później dwupłat) o powierzchni nośnej

540/140 m², o masie około 4 t (rys. 3-33). Do samolotu tego wbudował dwa silniki parowe własnej konstrukcji o mocy $2 \times 180 \text{ KM}$ ($2 \times 81 \text{ kW}$) przy 375-400 obr./min. Wstępne próby samolotu potwierdziły możliwość lotu, jednak trudny do opanowania system sterowania (jeden z silników napędzał koła podwozia umieszczone na torze) przyczynił się do uszkodzenia tej bardzo obiecującej konstrukcji. Samolot Maxima nigdy nie wzniósł się w powietrze (KOCENT-ZIELIŃSKI 2008).



Rys. 3-33. Samolot Hiram Maxima (1894)

Problem braku odpowiedniego silnika był największą przeszkodą dla pionierów lotnictwa. Jeden z nich, J. Hoffman, pisał w pamiętniku:

[...] Stanąłem przed pytaniem wyboru silnika. Przemysł samochodowy nie mógł mi dostarczyć w roku 1901 silnika [benzynowego], który byłby lżejszy od 15 kg/KM, a w tym czasie potrzebny był mi silnik nie większy niż połowa tego. Przy czym liczyłem się z mocą 30 KM, a silniki Bouchet najlżejsze używane w doświadczeniach sterowcowych dawały moc 3 KM! Tym sposobem, po przemyśleniu wróciłem znów do silnika parowego [...]
(Hoffman's Flying Machines 1901).

Równoległe z eksperymentami lotniczymi posuwały się rozważania naukowe. Stefan Drzewiecki (1844-1938) był pierwszym naukowcem, który nie tylko stwierdził, lecz także uzasadnił teoretycznie, że możliwy jest lot maszyny cięższej od powietrza, płatowca poruszającego się z odpowiednią prędkością, o płaszczyznach nośnych tworzących z kierunkiem ruchu pewien kąt natarcia. W roku 1887, w Petersburgu, napisał i wydał swoją pierwszą pracę z dziedziny lotnictwa pt. *Aeroplany w przyrodzie: doświadczenie nowej teorii lotu*, która nie spotkała się ze szczególnym

uznaniem rosyjskiego środowiska naukowego. W roku 1892 opublikował w Paryżu po francusku kolejną pracę, tak jak poprzednia będącą efektem eksperymentów i obserwacji natury: *Ptaki jako żywe aeroplany* (franc. *Les oiseaux considérés comme des aeroplanes animés*), w której powtórzył i pogłębił matematyczne podstawy poglądów wyrażonych w pracy poprzedniej, omówił problematykę oporu powietrza i doboru optymalnego kąta nachylenia skrzydeł. Jedno z ostatnich większych dzieł naukowych Drzewieckiego (*Lotnictwo dnia jutrzejszego* – franc. *L'aviation de demain*) jest uważane za podstawę współczesnej aerodynamiki. W 1891 roku Drzewiecki pisał o samolocie:

[...] będzie on składał się z płachty nośnej, z lekka pochyłej, podobnej do rozpostartych skrzydeł ciężkiego ptaka szybującego; będzie ona osadzona na ramie, opatrzonej kołami, co pozwoli jej nabyć szybkość, niezbędną do wzlotu, tocząc się po ziemi; odpowiednio lekki silnik będzie poruszał śruby napędne, które będą się obracały z odpowiednią szybkością, potrzebną do unoszenia i utrzymywania przyrzędu w powietrzu; zmiany położenia środka ciężkości będą służyły do wykonywania rozmaitych ewolucji przyrzędu lotniczego (JANUSZEWSKI 1998, s. 147).

Najprawdopodobniej pierwsze udane loty silnikowe wykonał Niemiec Gustav Albin Whitehead (1874-1927). W 1900 roku osiadł on w USA w miejscowości Bridgeport¹⁶⁹ w stanie Connecticut, gdzie opracował samolot o bionicznym kształcie skrzydeł, zainspirowanym skrzydłami ptaków i nietoperzy. Swoją konstrukcję z bambusa, drewna, jedwabiu i stalowych linek (rys. 3-37 a) wyposażył w silnik spalinowy na gaz acetylen o mocy około 20 KM (14 kW), napędzający dwa przeciwbieżne śmigła. Rozpiętość skrzydeł wynosiła około 11 m. Dodatkowy silnik o mocy około 10 KM (7 kW) napędzał podwozie samolotu w celu zwiększenia prędkości startowej, dzięki czemu nie trzeba było czekać na korzystny wiatr i niepotrzebna była dodatkowa katapulta. Whitehead nazwał swoją konstrukcję *Numer 21*.

14 sierpnia 1901 roku w Bridgeport wykonał na *Numerze 21* dwa 800-metrowe loty na wysokości sięgającej 15 m, „tam” i „z powrotem”. Konstrukcja ta, tak jak i poprzednie maszyny Whiteheada, nie dawała możliwości sterowania lotem, dlatego lot powrotny odbył się po

¹⁶⁹ Największe miasto stanu Connecticut, położone w północno-wschodniej części USA, nad Atlantykiem.

odwróceniu samolotu na ziemi. Najprawdopodobniej był to pierwszy w świecie lot samolotem napędzanym silnikiem. Sukces ten został opisany w prasie – w *Bridgeport Herald* (w wydaniu z 18.08.1901), *New York Herald* (19.08.1901) i *Boston Transcript* (19.08.1901). Artykuł w *Bridgeport Herald* był ilustrowany samym rysunkiem, nie zawierał fotografii. Lot ten poprzedził lot braci Wright w Kitty Hawk o ponad dwa lata. Później Whitehead opracował maszynę *Numer 22*, która różniła się od *Numeru 21* mocniejszym, 40-konnym silnikiem na naftę. Prawdopodobnie przeleciał nią nad 10-kilometrową cieśniną Long Island w styczniu 1902 roku.

Sukcesom Whiteheada w dziedzinie awiacji nie towarzyszyły sukcesy marketingowe; budowane przez siebie silniki sprzedawał z minimalnym zyskiem i nigdy nie udało mu się rozwinąć przedsiębiorstwa na większą skalę. Świadkowie twierdzą, iż Whitehead był odwiedzany przez braci Wright, którzy negocjowali z nim kupno jego silnika i wymieniali się z nim doświadczeniami w zakresie budowy aparatów latających. Około roku 1911 Whitehead zajął się konstrukcjami śmigłowców; osiągnął w tej dziedzinie niewielkie sukcesy. Nie zachowały się żadne fotografie dokumentujące loty Whiteheada, a artykuły prasowe opisujące jego osiągnięcia zawierają liczne niewiarygodne szczegóły. Kilka lat później USA wypowiedziały wojnę Niemcom. Niemieckie pochodzenie Whiteheada nie pomogło mu w przyznaniu prymatu w dziedzinie lotów silnikowych, dlatego m.in. Smithsonian Institution w Waszyngtonie zaprzecza, aby jakkolwiek lot silnikowy odbył się przed rokiem 1903, a żądania Whiteheada uznania jego lotu za pionierski zostały oficjalnie odrzucone; jego prace zaliczono do kategorii lotów bezsilnikowych (szybowcowych), niemniej jednak lokalne prawodawstwo stanu Connecticut zaakceptowało roszczenia lotnika.

Amerykanie, bracia Orville i Wilbur Wright, są powszechnie uznawani za konstruktorów i oblatywaczy pierwszego udanego samolotu. Drogę do założonego przez siebie celu zaczynali od szybowców wzorowanych na konstrukcjach Chanute'a. Ich drewniany szybowiec, po dokonaniu wielu modyfikacji będących wynikiem licznych prób, miał dobre właściwości lotne (osiągnięto odległość 620 m i czas lotu 20 s). W latach 1902-1903 bracia wyposażyli go w silnik benzynowy o mocy 16 KM, napędzający dwa drewniane śmigła pchające. Pilot w pozycji leżącej miał możliwość manewrowania sterami głębokości i kierunku umieszczonymi z przodu oraz mechanizmem zwichrzania końcówek skrzydeł. Do wykonania konstrukcji nośnej posłużyło drewno świerka sitkajskiego (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière).

Pierwsze poważne sukcesy braci Wright miały miejsce w 1903 roku. 17 grudnia na wzgórzu w miejscowości Kitty Hawk w Karolinie Północnej Wilbur Wright wykonał kilka udanych lotów o długościach od 36 do 284 m i czasie trwania od 12 do 59 s. Dziesięć miesięcy później bracia odnotowali kolejny sukces, wykonując pierwszy lot po obwodzie zamkniętym, a następnie odbywając lot z pasażerem. Piątego października 1905 roku samolot braci Wright utrzymał się w powietrzu ponad 38 min, przełatując odległość 39 km. Dalsze prace prowadzono głównie w Europie, dokąd zresztą przeniósł się Orville Wright.

Medialny sukces pierwszych lotów zainspirował wielu naśladowców. Wybitnym twórcą teorii lotnictwa był Polak, wspomniany wcześniej Stefan Drzewiecki, który z powodzeniem zastosował swoją teorię budowy śruby z 1892 roku do budowy śmigła lotniczego. Swoje prace na temat teorii śmigła opublikował w 1909 roku pod tytułem *Śmigła powietrzne. Teoria ogólna napędów śmigłowych* (franc. *Les hélices aériennes. Théorie générale des propulseur hélicoidaux*). Prekursorska teoria napędów śmigłowych Drzewieckiego została nagrodzona przez francuską Akademię Nauki w 1920 roku. Śmigła według jego projektów stosował później Louis Blériot (1872-1936), który jako pierwszy przeleciał nad kanałem La Manche (śmigło przedstawiono na rys. 3-38; zostało ono użyte w samolocie *blériot IX* pokazanym na rys. 3-37 h).

Także wspomniany już Czesław Tański w latach 1905-1907 zainteresował się śmigłowcami. Po udanych próbach z modelami, w 1907 roku rozpoczął budowę prototypu śmigłowca (nazwanego *śrubowcem*), o dwóch przeciwbieżnych dwułopatowych wirnikach napędzanych siłą mięśni za pomocą korby (rys. 3-34 a). Nieudane próby z 1908 roku wykazały jednak, że siła mięśni jest niewystarczająca do startu. W 1909 Tański zamontował na swoim śmigłowcu dwucylindrowy silnik spalinowy *anzani* o mocy 2,5 KM (1,8 kW). Z powodu braku chłodzenia i małej mocy silnik przegrzewał się, a uniesienie człowieka wciąż nie było możliwe. Śmigłowiec ten nie miał ponadto systemu umożliwiającego sterowanie. Po niepowodzeniach Tański zaprzestał prób ze śmigłowcem, który w 1934 roku został przekazany do zbiorów Muzeum Przemysłu i Rolnictwa w Warszawie. Został zniszczony przez Niemców we wrześniu 1939 roku.

W 1909 roku Tański zaprojektował też jednołpatowy samolot o nazwie *łątka* (rys. 3-34 b), napędzany trzycylindrowym włoskim silnikiem *anzani* o mocy 25 KM (18,4 kW). *Łątka* miała elastyczne skrętne końcówki płatów i usterzenia poziomego, pełniące rolę powierzchni sterowych; płaty skrzydeł były zamocowane obrotowo na dźwigarach celem sterowania



Rys. 3-34. Konstrukcje lotnicze Czesława Tańskiego: a - śrubowiec (1908), b - samolot *łątka* (1911) (GLASS 1984)

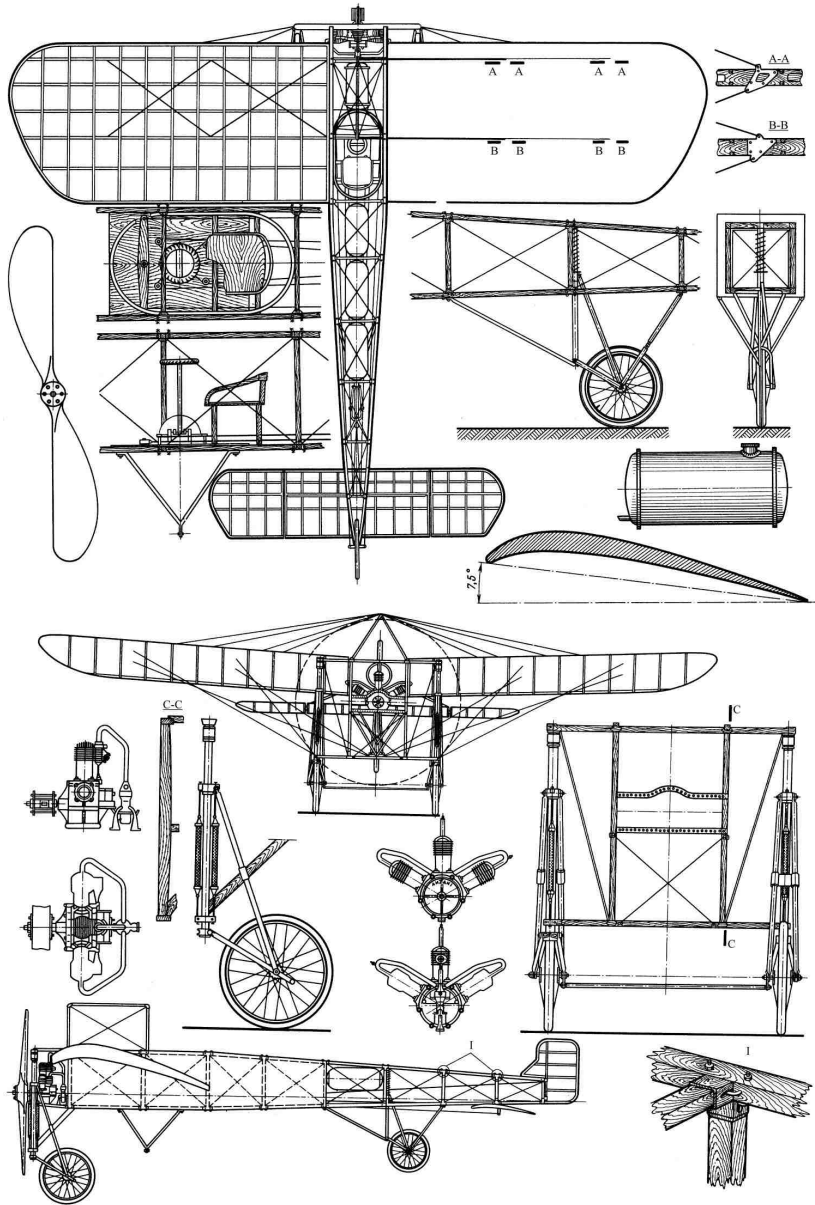
kątem natarcia. Skrzydła miały konstrukcję bioniczną naśladowującą skrzydła ważek. Samolot został ukończony w 1911 roku, lecz podczas prób oblotu na Polu Mokotowskim nie oderwał się od ziemi z powodu zbyt dużej masy i słabego silnika.

Rozpoczęte przez braci Wright loty samolotowe były inspiracją dla wielu nowych konstrukcji samolotów o coraz większych możliwościach:

- w 1909 roku Louis Blériot przeleciał nad kanałem La Manche,
- w 1910 roku Geo Chavez przeleciał nad Alpami i ustanowił rekord wysokości 2587 m,
- w 1913 roku Roland Garros przeleciał nad Morzem Śródziemnym, pokonując odległość 760 km,
- w 1913 roku Piotr Niestierow wykonał pierwszą pętlę, a Francuz Adolphe Pegoud - bezkę, korkociąg i ślizg,
- w 1914 roku Jan Nagórski wykonał pierwsze loty w obszarach arktycznych.

Na wieść o sukcesach braci Wright Francuz Louis Blériot podejmował próby latania już w 1905 roku, niestety, były to próby nieudane. Dopiero po dwóch latach eksperymentów z różnymi konstrukcjami, w 1907 roku, odbył swój pierwszy udany lot samolotem *blériot V*. Ambitny francuski wynalazca i pionier lotnictwa w ciągu kilku lat skonstruował wiele typów samolotów o różnych układach konstrukcyjnych (samolot *blériot V* miał układ kaczki, a *blériot IX* - rys. 3-37 h - był jednopłatem w układzie klasycznym z otwartą kabiną pilota). Najbardziej jednak znaną konstrukcją jest *blériot XI*, przedstawiony na rysunku 3-35. Tym samolotem 25 lipca 1909 roku dokonano pierwszego przelotu nad kanałem La Manche w maszynie cięższej od powietrza.

Blériot, zgodnie z wymaganiami stawianymi przez redakcję brytyjskiej gazety *Daily Mail* - fundatora nagrody w wysokości 25 000 franków za przelot nad kanałem - wystartował o wschodzie słońca z Les Barraques



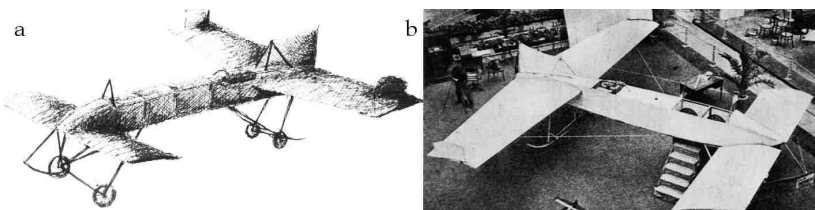
Rys. 3-35. Samolot blériot XI „La Manche” (PLANS 3-VUES 2007)

niedaleko Calais. Po 37 min lotu pilotowany przez niego samolot wylądował po drugiej stronie kanału, w Dover, pokonawszy odległość 35 km. Wyczynu tego dokonał na najsłynniejszym swoim samolocie o nazwie *blériot XI*, zbudowanym we współpracy z innym francuskim pionierem lotnictwa Raymondem Saulnierem. Samolot był napędzany trzycylindrowym silnikiem *anzani* o mocy 25 KM (18,4 kW), konstrukcji włoskiego inżyniera Alessandro Anzaniego. Silnik ten pozwalał na uzyskanie maksymalnej prędkości około 70 km/h i pułapu do 150 m nad ziemią.

Dla upamiętnienia wyczynu Louisa Blériota nazwa miejscowości Les Barraques została później zmieniona na Blériot Plage.

Samolot *blériot XI* miał konstrukcję górnopłatu z otwartą kabiną pilota. Elementy strukturalne skrzydeł i kadłuba wykonano w postaci jesionowej kratownicy ze starannie wyselekcjonowanego drewna bez wad, poszycie wykonano z impregnowanego płótna. Sama maszyna nie była zbyt okazała: rozpiętość skrzydeł wynosiła 8,54 m, długość 7,62 m, powierzchnia nośna około 14 m², wysokość zaś 2,65 m. Masa własna samolotu wynosiła 220 kg, a dopuszczalna masa całkowita 320 kg (KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2007 b). Konstruktorom śmigieł używanych przez Blériota był wymieniony wcześniej Stefan Drzewiecki. Śmigło tego samego typu jak użyte w samolocie *blériot XI* przedstawiono na rysunku 3-38 a na s. 181.

Stefan Drzewiecki również projektował i wykonywał samoloty. Jego prekursorski samolot, zaprojektowany w układzie kaczki (franc. *canard*, rys. 3-36 b), miał konstrukcję niemal całkowicie drewnianą. Kratownicowy kadłub i skrzydła były kryte impregnowanym płótnem. Stery również były drewniane, kryte płótnem. Załogę samolotu Drzewieckiego stanowili pilot i nawigator. Samolot był weryfikacją autorskiej hipotezy konstruktora o samostateczności układu kaczki. Nowością był również fakt, że model samolotu został przebadany w tunelu aerodynamicznym Gustave'a Eiffela. Realizacją projektu zajęła się paryska firma



Rys. 3-36. Samoloty Drzewieckiego: a – *Drzewiecki*, b – *Canard* na wystawie w Paryżu w 1912 roku (GLASS 1984)

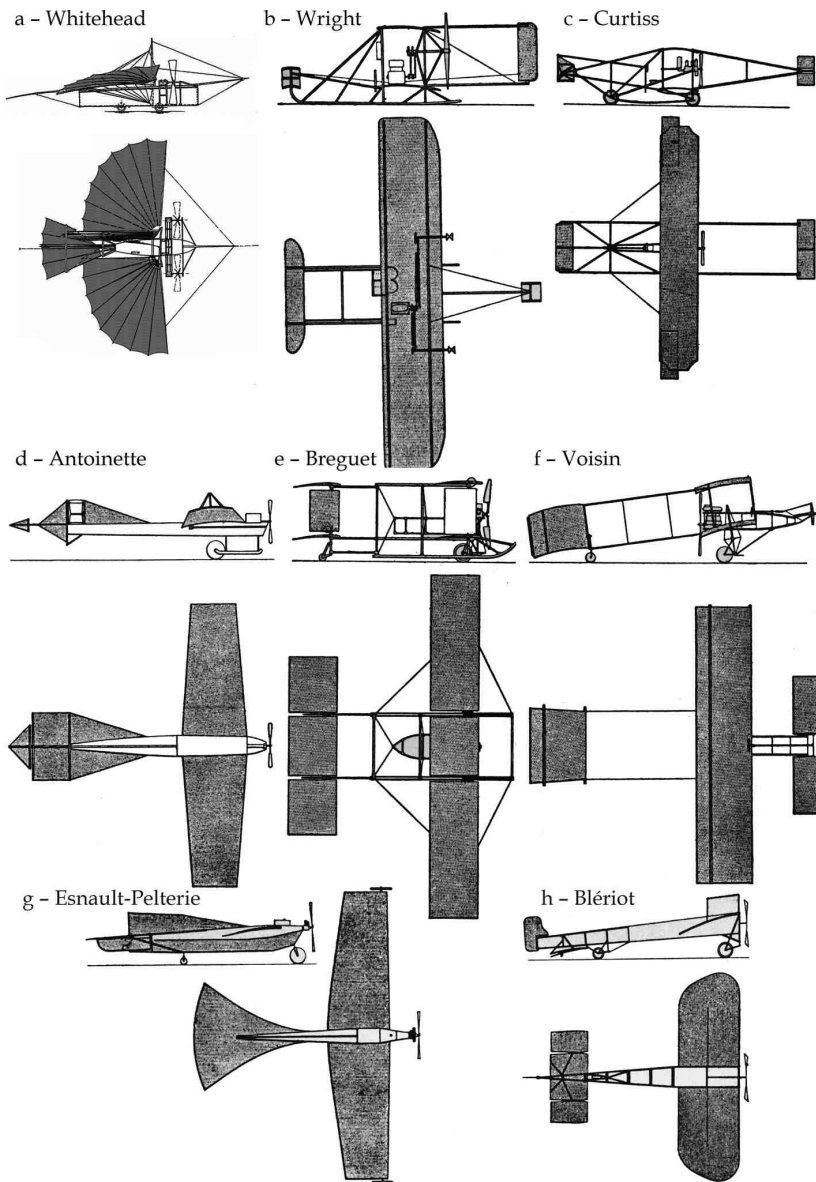
P. Ratmanoff. Budowę samolotu ukończono jesienią 1912 roku, a gotowy płatowiec wystawiono w październiku tego samego roku na Międzynarodowym Salonie Lotniczym w Paryżu. Samolot był wyposażony w rzędowy silnik tłokowy *labor* o mocy 70 KM (51,5 kW), skrzydła miały rozpiętość 9 m, samolot miał długość 8 m, a wysokość 2,8 m i ważył około 500 kg. Dopuszczalna masa całkowita wynosiła 700-750 kg, a prędkość maksymalna 105 km/h (GLASS 1977, 1984).

Canard miał bardzo dobrą stateczność podłużną, a umieszczenie zbiorników z paliwem i olejem w pobliżu środka ciężkości nie powodowało zmian wyważenia podczas lotu. Sterowanie podłużne odbywało się przez sterowanie silnikiem. Zwiększenie mocy dawało wznoszenie się samolotu, a zmniejszenie – opadanie lotem ślizgowym. Sterowanie w płaszczyźnie poprzecznej (kierunkiem) odbywało się za pomocą dwóch niezależnych dźwigni napędzanych przez dźwignie obsługiwane nogami. Pozwalało to używać elementów do sterowania poprzecznego jako hamulca aerodynamicznego. Podwozie samolotu było skonstruowane w ten sposób, że amortyzatory olejowo-powietrzne pozwalały podczas lądowania na stopniowe podnoszenie kół do góry i dociskanie płóz do ziemi, co znacząco skracało dobieg. Próby samolotu odbyły się w Chartres wiosną 1913 roku. Drzewiecki miał wówczas 68 lat. Piloci raczej niechętnie latali tym samolotem z powodu nietypowego układu sterowania. Po awarii wału napędowego zarzucono próby. Pod koniec tego samego roku Drzewiecki opracował ulepszoną odmianę swego samolotu, jednakże wybuch wojny w 1914 roku przeszkodził w zakończeniu budowy (GLASS 1977, 1984).

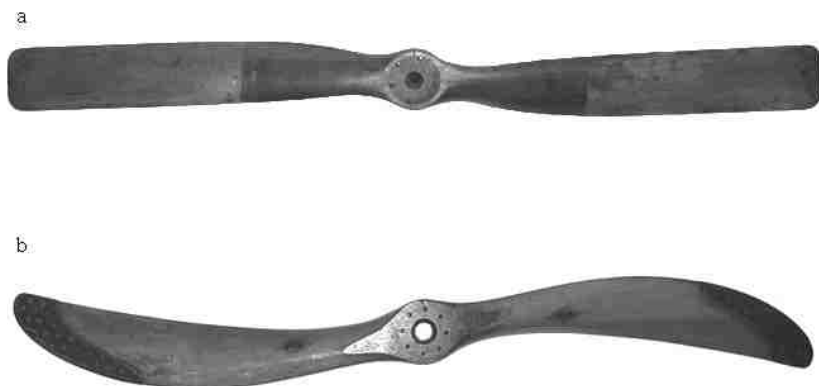
W pierwszych latach lotnictwa eksperymentowano z wieloma układami konstrukcyjnymi samolotów, metodą prób i błędów dopracowywano układy skrzydeł, umiejscowienie układów napędowego i sterowania samolotem w powietrzu. Pierwsze układy konstrukcyjne samolotów przedstawiono na rysunku 3-37.

Pierwsze śmigła lotnicze były wykonywane z twardych gatunków drzew liściastych (BOREJSZA i IN. 1930): mahoniowców (np. czterołopatowe prod. Bennet & Co, typ FE 8, ok. 1915), jesionu wyniosłego, orzesznika lub rzadziej z brzozy białej (np. prod. Westmore & Co, typ J1, ok. 1919), dębów (np. prod. Paragon, typ JN4C, ok. 1918 – rys. 3-38 b), buku zwyczajnego, klonu jaworowego, klonu polnego, czereśni ptasiej, wiązu pospolitego.

Preferowane było drewno mahoniowców, wybierano takie, które było stabilne wymiarowo, prostowłókniste i o korzystnym stosunku wytrzymałości do masy. Śmigła miały wzmocnione blachą, tkaniną lub skórą



Rys. 3-37. Układy konstrukcyjne pierwszych samolotów (lata 1901-1909)



Rys. 3-38. Drewniane śmigła lotnicze: a - „lewe” z niestalonego drewna Blériota, typ *helice normale* według teorii Stefana Drzewieckiego, średnica 234 mm (ok. 1912), b - „prawe” dębowe Jenny’ego Curtissa, typ *paragon JN4C*, średnica 251 mm (ok. 1918)

krawędzie natarcia oraz okute gniazdo do mocowania na wale silnika (rys. 3-38). Wszystkie modele, poza najwcześniejszymi, były laminowane w celu zabezpieczenia przed wpływami atmosferycznymi. Produkowano je z kilku sklepanych warstw drewna o grubości 3/4 cala każda (ok. 19 mm). Na rysunku 3-39 widać kilkanaście sklepanych ze sobą desek, z których ręcznie są zdejmowane kolejne warstwy. Głębokość skrawania jest zaznaczona prostopadłociennymi przyklejonymi markerami. Obróbki wykańczającej dokonywano za pomocą pilników oraz papieru ściernego, następnie okuwano śmigło (krawędzie natarcia oraz gniazdo), wyważano i pokrywano kilkunastoma warstwami lakierów. W latach 1915-1918 produkcję śmigieł zmechanizowano.

Pierwsze samoloty były klejone klejami pochodzenia naturalnego: skórnym, kostnym, rybnym, kazeinowym (tzw. *serowym*), roślinnym (guma arabska) oraz włóknikowym (wyrabianym z krwi zwierzęcej). Dopiero w końcu lat trzydziestych wprowadzono kleje syntetyczne. Śmigła były klejone wodoodpornymi klejami skórnymi i kostnymi lub klejem kazeinowym. Klejono na gorąco, rozrobiony klej podgrzewano w łaźni wodnej do 70°C, podgrzewano także klejone elementy (do 30-40°C), a po sklejeniu trzymano je około 12 godzin pod prasą. Klejów kazeinowych i włóknikowych używano na zimno.



Rys. 3-39. Proces produkcji śmigła (przed 1915 rokiem) (WOODENPROPELLER 2007)

3.3.3. Zmierzch drewnianych samolotów

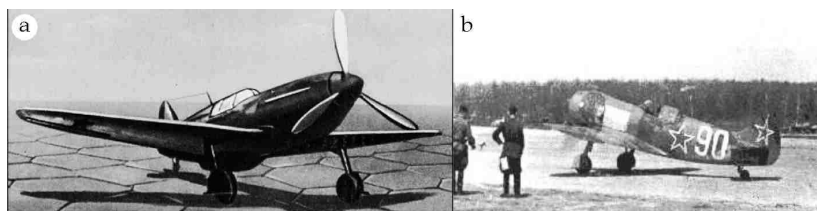
Zasadniczo rozwój konstrukcji samolotowych zmierzał ku zastąpieniu drewnianych elementów strukturalnych innymi materiałami, zwłaszcza stopami metali lekkich. Przyjmując za kryterium podziału materiał stosowany na samoloty budowane w ostatnim stuleciu, można wyróżnić następujące lotnicze układy konstrukcyjne (chronologicznie):

- samoloty drewniane (konstrukcja klejona i skręcana):
 - drewniana rama, płócienne poszycie,
 - drewniana rama, drewniane poszycie,
- samoloty drewniano-metalowe (poszycie kadłuba i skrzydeł drewniane, rama w formie kratownicy metalowej),
- konstrukcje mieszane (np. rama metalowa, poszycie kadłuba metalowe, a skrzydeł drewniane lub na odwrót),
- samoloty metalowe (konstrukcja skorupowa, nitowana),
- samoloty kompozytowe (podstawowymi materiałami są: żywica, włókna szklane, węglowe, aramidowe i przekładki).

Drewno wielokrotnie powracało w roli tworzywa do budowy samolotów. Głównymi przyczynami tych powrotów były niedostępność innych

materiałów (np. w czasie II wojny światowej) oraz względy ekonomiczne (lata powojenne). W latach czterdziestych XX wieku deficytowe stopy aluminium bardzo często zastępowano drewnem. Opracowano przy tej okazji szereg nowych technologii produkcji kształtek sklejkowych oraz kleje syntetyczne do drewna, które wyparły kleje naturalne.

Na przełomie lat trzydziestych i czterdziestych Rosjanie zaczęli w konstrukcjach lotniczych stosować sklejkę brzożową; sklejali na gorąco trzy bądź cztery warstwy fornirów w kształtkę sklejkową i z dwóch uzyskanych w ten sposób skorup tworzyli kadłuby do takich samolotów, jak myśliwski *ławoczkin* ŁaGG-3 (1941-1944), a później *ławoczkin* Ła-5 i Ła-7 (rys. 3-40). Samolot ŁaGG-3 miał stalowe łożo silnika i kratownicę z zamontowanym uzbrojeniem oraz poszycie z uszlachetnionej sklejki wykonanej w technologii *delta-driewiesina* (ros. *дельта-древесина*) (z użyciem żywicy fenolowej lub krezolowo formaldehydowej laminowanej lakierem bakelitowym). Samoloty Ła-5 i Ła-7 miały kadłuby wykonane z użyciem drewna – ich części przednie były spawane z rur stalowych i kryte blachą, natomiast w częściach tylnych wręgi i podłużnice były kryte sklejką. ŁaGG-3, Ła-5 i Ła-7 miały skrzydła wolnonośne, dwudźwigarowe, kryte sklejką. Statecznik pionowy i stateczniki poziome również były poszywane sklejką.



Rys. 3-40. Samoloty *ławoczkin*: a – ŁaGG-3, b – Ła-5

Z wykorzystaniem sklejki powstawały również myśliwce JAK-3 i MiG-3, wyróżniające się aerodynamicznym kształtem kadłuba.

Sklejkę *delta-driewiesina* otrzymywano z forniru brzożowego skrawanego obwodowo o grubości arkusza 0,35-0,55 mm. Warstwy fornirów poprzekładane tzw. *filmem bakelitowym* (bibułką papierosową nasyconą bakelitem) prasowano w temperaturze 140-150°C pod ciśnieniem 10,8-11,8 MPa. Czas prasowania wynosił 5 min na 1 mm grubości. Gęstość otrzymanego produktu wynosiła 1,25-1,40 g/cm³, wilgotność 3-8%, wytrzymałość mechaniczna sklejki uszlachetnionej wzrastała 2,4-3,0-krotnie w stosunku do sklejki bez dodatku bakelitu (parametry za KSIĄŻKIEWICZEM

1954). W warunkach wojennych stosowano do produkcji sklejk również produkty zastępcze. Zamiast drewna brzoźowego, które łatwo wchłania żywicę, a tym samym po uszlachetnieniu jest zabezpieczone wystarczająco dobrze przed wpływem wilgoci, stosowano na warstwy wewnętrzne np. drewno sosnowe. Poszycie samolotu (zwłaszcza płatów skrzydeł) wykonane ze źle zaimpregnowanej sklejki miało skłonność do deformowania się, zwłaszcza pod wpływem deszczu. Kiedy z uwagi na problemy wojenne gwałtownie pogorszyła się jakość samolotów, piloci ŁaGG-3 nadali mu przezwisko *лакированный гарантированный гроб*, czyli lakierowana pewna trumna.

Podobne problemy dotyczyły szybkiego i zwrotnego myśliwca JAK-3. W latach 1943-1944, z powodu fatalnej jakości stosowanych klejów kazeinowych, w czasie deszczu albo w warunkach zwiększonej wilgotności rozpadał się on w powietrzu.

Z powodu deficytu stopów aluminium we wrześniu 1942 roku zaprojektowano tył samolotu *iljuszyn* И-2. Zmodernizowany model otrzymał oznaczenie И-2М, w nowej wersji wiele elementów, szczególnie w tylnej części kadłuba, do końca 1944 roku wykonywano z drewna. Kontrastowało to z opancerzonym przodem maszyny.

Drewniane samoloty produkowali także Japończycy. W 1943 roku Cesarstwo Japonii, będące w tym czasie od sześciu lat w stanie wojny¹⁷⁰, stanęło przed problemem braku surowców w przemyśle lotniczym, dotyczyło to szczególnie stopów aluminium. Arsenal Lotniczy Armii Lądowej (jap. *Dai-Ichi Rikugun Kokusho*) w Tachikawa otrzymał polecenie przeprowadzenia badań nad możliwościami wykorzystania do produkcji samolotów materiałów ogólnie dostępnych, mogących zastąpić surowce deficytowe. W wyniku tych prac stwierdzono, że bez większych negatywnych konsekwencji można zastąpić wiele elementów konstrukcyjnych samolotów drewnem. Do przeróbki wytypowano, uchodzący za najlepszy, myśliwiec Cesarskiej Armii Lądowej Nakajima Ki-84 *hayate*.

Program wprowadzania drewna miał przebiegać dwuetapowo. W pierwszym etapie tylko niektóre metalowe elementy konstrukcyjne zastąpiono drewnianymi; w drugim całość konstrukcji nośnej miała być wykonana z drewna. Realizację pierwszego etapu modernizacji Ki-84 rozpoczęto 8 września 1943 roku, wytworzono dokumentację techniczną i rozpoczęto wymagane próby techniczne. Wiosną 1945 roku mniej

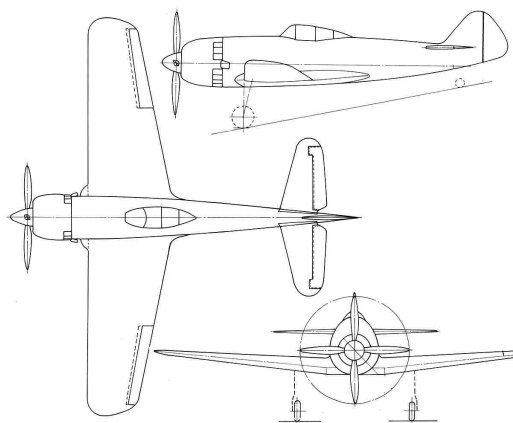
¹⁷⁰ W latach 1937-1945 Japonia toczyła konflikty zbrojne z: Australią, Chinami, Holandią, Indiami, Kanadą, Meksykiem, Wielką Brytanią, Nową Zelandią, USA i ZSRR.

obciążone metalowe elementy konstrukcyjne *hayate* zastąpiono ich odpowiednikami wykonanymi z drewna. Powstała w ten sposób stalowo-duraluminiowo-drewniana odmiana myśliwca, która została oznaczona Ki-84-II *hayate kai*. W nowej odmianie drewno zastosowano do budowy statecznika, elementów tylnej części kadłuba, końcówek skrzydeł i popychaczy układu sterowania.

Losy wojny na Pacyfiku sprawiły, że sytuacja materiałowa Japonii szybko się pogorszyła, a zapasy aluminium skurczyły się gwałtownie. Według ówczesnych ocen Japończyków w październiku 1945 roku miały one ulec całkowitemu wyczerpaniu, szczególnie że od marca 1945 roku wszystkie dostępne siły i środki, w tym przede wszystkim deficytowe aluminium, miały zostać skierowane do priorytetowej produkcji samolotów samobójczych. W związku z zaistniałą sytuacją przystąpiono do drugiego etapu modernizacji.

Jednym z poważniejszych problemów, przed jakim stanęła ekipa projektowa, było tworzywo wybrane do budowy samolotu. Większość projektantów nie miała wcześniej do czynienia z pełnowymiarowymi samolotami o konstrukcji nośnej drewnianej, dotychczas zajmowała się jedynie budową nowoczesnych, metalowych płatowców. Tymczasem drewno wymagało nieco odmiennego podejścia do niektórych elementów konstrukcji. Projektanci mieli dylemat, jak zachować standardowe wymiary i masę myśliwca? Nie było to proste, bowiem element drewniany o tej samej wytrzymałości zmęczeniowej jest cięższy od swojego odpowiednika z duraluminium. Prosta adaptacja metod obróbki i łączenia drewna w konstrukcjach lotniczych, jakimi posługiwano się podczas I wojny światowej i tuż po niej, mijała się z celem. Nie tworzone przecież powolnego dwupłatu, lecz szybką, wytrzymałą maszynę mającą walczyć z nowoczesnymi samolotami wroga. Należało poszukać sposobu na połączenie tradycji z nowoczesnością bez kompromisów.

Konstrukcja płatowca Ki-106 (rys. 3-41) miała bazować na kształcie standardowego płatowca Ki-84, z tym że nowy samolot powinien być całkowicie wykonany z drewna i stali. W przyszłości części do montażu samolotu miały być wytwarzane w wielu małych zakładach stolarskich zatrudniających niewykwalifikowanych robotników (w tym młodzież i kobiety). Zastosowanie konstrukcji drewnianej skutkowało brakiem konieczności używania w procesie produkcji specjalizowanych narzędzi, pozwalając na produkcję części samolotu także przez firmy spoza branży lotniczej, np. meblarskie, czy producentów instrumentów muzycznych. Ponadto wszystkie ewentualne modyfikacje kadłuba mogły



Rys. 3-41. Japoński myśliwiec Nakajima Ki-106 *hayate* o konstrukcji drewnianej (1945)

być wykonane z użyciem zwykłej piły. Modułowa konstrukcja maszyny umożliwiła rozproszenie produkcji i powierzenie jej wielu podwykonawcom produkującym podzespoły składane w całość dopiero w fabryce. Ostateczny montaż miał następować w zakładach lotniczych. Powyższe rozwiązanie miało zminimalizować straty ponoszone w wyniku amerykańskich nalotów strategicznych. Wyprodukowano tylko trzy prototypy Ki-106 (w tym dwa zdolne do lotu). Samolot okazał się cięższy od Ki-84 o mniej więcej 280 kg, ważył 2948 kg.

Drewno lite, drewno klejone oraz sklejka lotnicza były powszechnie stosowane przy budowie samolotów aż do końca lat czterdziestych XX wieku. Z polskich samolotów okresu 1918-1939, w których zastosowano sklejkę, można wymienić: samolot myśliwski PWS-10, samolot bombowy LWS-6 *zubr*, samoloty szkolne: PWS-26, PWS-33 *wyżel*, PWS-35 *ogar*, RWD-8, amfibię *nikol A-2*, szybowce: CWJ, CW-5 bis, WWS-1 *salamandra*, SG-3, *czajka* oraz motoszybowiec *bąk*.

Najsłynniejszym drewnianym samolotem II wojny światowej był brytyjski dwusilnikowy, dwumiejscowy samolot wielozadaniowy De Havilland DH.98 *mosquito*. Do jego budowy użyto sklejki lotniczej i litego drewna. Ze względu na specyficzną konstrukcję samolot ten nazywany był drewnianym cudem (ang. *wooden wonder*) lub rzadziej drewnianym przerażeniem (ang. *timber terror*), a wśród personelu naziemnego zyskał miano marzenia termita (ang. *termite's dream*) lub komara (ang. *moszquito*), potocznie od *mosquito*).

Niemcy próbowali skopiować ideę zastosowania tanich i dostępnych materiałów realizowaną w konstrukcji *mosquito*. Niemiecki Focke-Wulf TA-154 (1943-1945), zbudowany w całości z drewna, nie osiągnął sukcesu *wooden wondera*. Poszycie większości powierzchni skrzydeł i kadłuba TA-154 stanowiła sklejka. Pozostała część płatowca (w tym krawędzie natarcia skrzydeł) była kryta blachą (vide tabela 26, s. 188). W bardzo wielu niemieckich konstrukcjach lotniczych stosowano elementy drewniane, przykładami mogą być: (1) eksperymentalny myśliwiec przechwytyjący o napędzie raketowym Bachem Ba 349 *natter* (1945) – drewniany kadłub i skrzydła; (2) myśliwiec Ta-152 (1944-1945) – z uwagi na problemy zaopatrzeniowe w produkcji powszechnie stosowano zamienniki deficytowych materiałów, m.in. drewniane usterzenie i kłapy; (3) szybowiec myśliwski Blohm & Voss Bv 40 (1944) – drewniane poszycie kadłuba; (4) lekki bombowiec Junkers (wersje Ju-88A-15 i Ju-88S-2) – drewniana komora bombowa.

Ważniejsze samoloty z lat trzydziestych i czterdziestych XX wieku budowane z drewna przedstawiono w tabeli 26. Wymieniony tam największy samolot, jaki kiedykolwiek wzniósł się w powietrze, H-4 *spruce goose* (ang. świerkowa gęś), miał konstrukcję drewnianą, której ponad 90% masy stanowiło drewno brzozone, a resztę świerkowe, klonowe, topolowe oraz balsy (KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2005 b). Nie zdecydowano się na drewno lite, które jest materiałem anizotropowym i niejednorodnym i może zawierać ukryte wady (przez co wymaga większych współczynników bezpieczeństwa, a więc elementów konstrukcyjnych o większej masie, a to zmniejsza osiągi samolotu). Elementy poszycia skrzydeł i kadłuba wykonano z odpowiednio przygotowanej sklejki z fornirow o grubości poniżej 1 mm. Połączenia wykonywano z użyciem kleju bez zastosowania metalowych łączników. H-4 odbył tylko jeden lot (wykonano jeden pełnowymiarowy prototyp), nie podjęto produkcji seryjnej.

Podstawowymi materiałami drzewnymi stosowanymi w lotnictwie w latach 1900-1950 były tarcica sosnowa, drewno liściaste klejone warstwowo (lignofol) oraz tzw. *sklejka lotnicza*¹⁷¹. Sklejka lotnicza różniła się od zwykłej większą jakością zastosowanych fornirow (brak wad struktury), większą wytrzymałością oraz większą dokładnością wykonania (najcieńsza ujęta w normach sklejka ma grubość 0,4 mm(!) i jest sklejona z trzech warstw fornirow). Właściwości, wytwarzanie i magazynowanie tarcicy

¹⁷¹ Sklejka charakteryzuje się większą wytrzymałością mechaniczną od litego drewna, z którego jest zrobiona (vide informacje o sklejkach na s. 87-89) oraz lepszą jednorodnością struktury (por. tabela 12, s. 34).

Tabela 26

Ważniejsze samoloty drewniane z lat trzydziestych i czterdziestych XX wieku

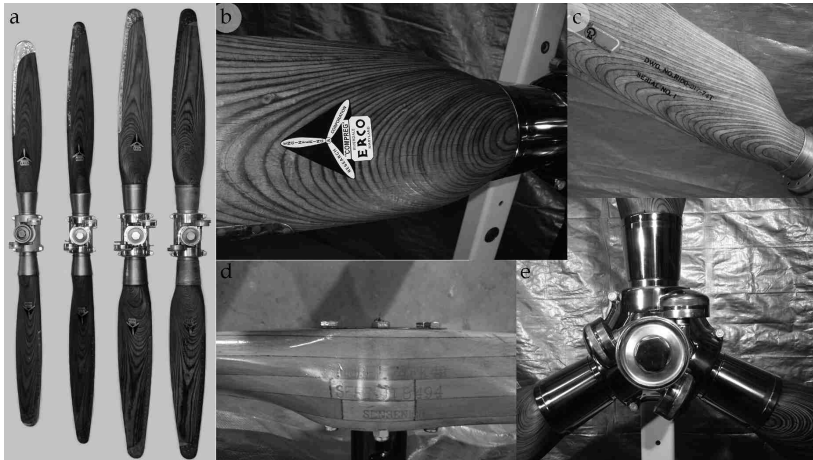
Samolot, kraj, lata produkcji	Układ	Konstrukcja	Uwagi
Focke-Wulf Ta-154, Niemcy, 1943-1945	Dwusilnikowy górnopłat	57% drewna, 30% stali, 13% duraluminium. Poszycie części kadłuba i skrzydeł ze sklejki. Elementy drewniane sklejone klejem <i>tego-film</i> lub <i>kaurit</i> . Drewniane trójpłatowe śmigła.	60-100 egzemplarzy. Prędkość maksymalna 635 km/h (wersja Ta-154 A-4). Nocny myśliwiec.
Nakajima Ki-113, Japonia, 1945	Jednosilnikowy dolnopłat	Drewniano-stalowa. Statecznik pionowy drewniany, częściowo pokryty płótnem, końcówki skrzydeł drewniane.	1 prototyp. Prędkość maksymalna 620 km/h. Myśliwiec.
Tachikawa Ki-106, Japonia, 1945	Jednosilnikowy dolnopłat	Drewniana ze szkieletem stalowym. Drewniane poszycie skrzydeł statecznika pionowego, elementów tylnej części kadłuba, końcówek skrzydeł i popychaczy układu sterowania. Lotki i stery pokryte płótnem.	1 prototyp i 2 egzemplarze. Prędkość maksymalna 618-620 km/h. Myśliwiec.
RWD-22, Polska, 1939	Dwusilnikowy dolnopłat	Skrzydła i kadłub w formie kratownicy stalowo-drewnianej krytej duraluminium, sklejką i płótnem. Usterzenie i pływaki drewniane.	1 prototyp. Prędkość maksymalna 270-290 km/h. Wodnosamolot bombowo-rozpoznawczy.
Lublin R-XX (LWS-1), Polska, 1934	Dwusilnikowy dolnopłat	Skrzydła i kadłub drewniane, kryte sklejką. Usterzenie drewniane, ze statecznikami krytymi sklejką, a sterami krytymi płótnem. Śmigła początkowo czterołopatowe drewniane, później metalowe.	1 prototyp. Prędkość maksymalna 250 km/h. Wodnosamolot torpedowy i rozpoznawczy.
De Havilland <i>mosquito</i> , Anglia, 1940	Dwusilnikowy, dwumiejscowy	Z drewna świerkowego, sklejki gątków liściastych i balsy, pokryty płótnem. Dźwigary skrzydeł, szkielet kadłuba i obramowania drzwi świerkowe. Pokrycie kadłuba z balsy i sklejki 2 mm. Połączenia klejone, wzmacniane metalowymi okuciami.	Kilkaset sztuk. Samolot myśliwski, myśliwsko-bombowy, nocny myśliwiec, bombowiec i samolot rozpoznania.
H-4 <i>spruce goose</i> (świerkowa gęś), USA, 1947	Ośmiosilnikowa łódź latająca	Kadłub i skrzydła zbudowane ze sklejki brzozonej. W konstrukcji wykorzystano drewno klonu, topoli, balsy i świerka. Największy drewniany samolot wszech czasów.	1 latający prototyp. Rozpiętość skrzydeł: 97,54 m, długość: 66,65 m, wys.: 21,18 m.

do budowy samolotów podlegały normalizacji. Przykładami mogą być archiwalne polskie normy „lotnicze” PN-L-19000:1952, PN-L-19001:1952, PN-L-19002:1952, PN-L-19010:1952 lub norma branżowa BN-76/7111-15, których przedmiotem była lotnicza tarcica sosnowa (nieobrzynana i jednostronnie obrzynana, produkowana z drewna sosny zwyczajnej) oraz lotnicza tarcica jesionowa. Normy zawierały m.in.: nazwy i określenia, podział i oznaczenia, wymiary, klasy jakości, właściwości wytrzymałościowe, wytyczne dotyczące magazynowania oraz program badań. Sklejka lotnicza wykonywana była również z fornirów drzew liściastych (głównie brzoźowych). Zawsze była klejona klejem wodoodpornym. Po II wojnie światowej sklejka lotnicza wykorzystywana była do budowy szybowców, np. bardzo znanego polskiego szybowca SZD-9 bis *bocian*. Obecnie w lotnictwie w bardzo małym zakresie wykorzystuje się sklejkę, głównie na elementy drugorzędne lub do remontu starszych konstrukcji. Niewielkie ilości sklejki używają modelarze.

W latach czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku szeroko wykorzystywano drewno lite oraz drewno prasowane warstwowo (lignofol) do wyrobu śmigieł. Ze względów wytrzymałościowych drewno prasowane warstwowo było sprasowywane nierównomiernie (bardziej ścięśnione u nasady śmigła). Nierównomierne ścięśnienie uzyskiwano przez zastosowanie zmiennej liczby fornirów na długości łopaty śmigła podczas układania paczki fornirów w oprzyrządowaniu prasy (szablone śmigła). Często stosowano również różne gatunki drewna, cięższe u nasady i lżejsze na końcach łopat śmigieł (PARCZEWSKI i IN. 1969). Przykłady śmigieł z lat czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku przedstawiono na rysunku 3-42.

Drewno w budowie konstrukcji nośnych samolotów zostało niemal całkowicie wyparte w końcu lat czterdziestych XX wieku przez stopy metali lekkich i tworzywa sztuczne, jednak było ono podstawowym materiałem konstrukcyjnym aż do końca lat siedemdziesiątych XX wieku w budowie szybowców. W Polsce w tym celu było stosowane głównie drewno sosnowe, brzoźowe i jesionowe. Do poszywania powierzchni skrzydeł czy kadłubów w szybowcach drewnianych najczęściej używano sklejki oraz płótna (np. drewniany szybowiec *kobuz*). Materiały drzewne stosowano również na niektóre elementy szkieletu szybowców. Obecnie poszycie szybowców jest budowane głównie z laminatów szklano-epoksydowych, kompozytów włókien węglowych i aramidowych itp.

Przykłady współczesnego zastosowania drewna i tworzyw drewnopochodnych do produkcji śmigieł lotniczych przedstawiono na rysunku 4-16 (s. 333).



Rys. 3-42. Przykłady śmigieł z lat czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku: a - dwułopatowe śmigło z lignofolu (prod. ERCO, typ Compreg 3D40-111), b - zbliżenie śmigła trójłopatowego z lignofolu (prod. ERCO), c - śmigło ze sklejki bukowej (prod. Sensenich, typ 74FK49), d - widok z boku środkowej części śmigła klejonego (prod. ROBY, typ R100-217-74T), e - sposób mocowania łopat śmigła w metalowych tulejach (prod. ERCO)

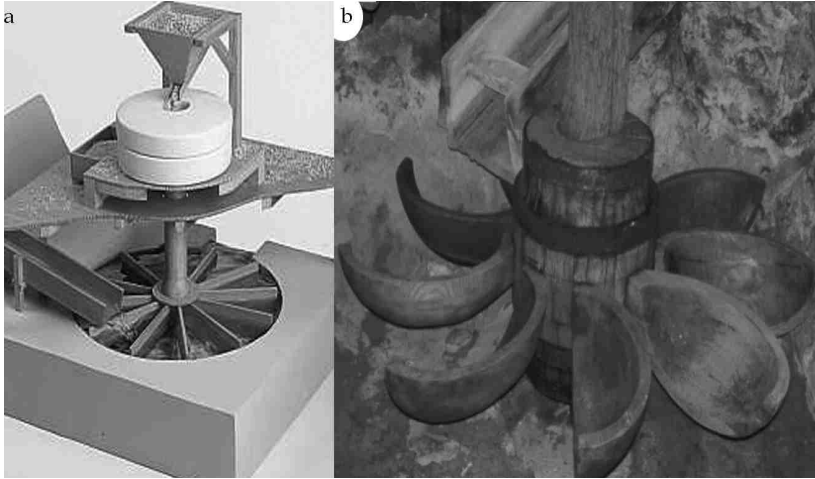
3.4. Maszyny napędowe z drewna i niektóre ich zastosowania

*Poprzez przeszłość ocenia się teraźniejszość
(maksyma rzymska)¹⁷²*

3.4.1. Koła wodne

Koła wodne budowano głównie z drewna dębowego, ale także z sosnowego, modrzewiowego, świerkowego i jodłowego. Najprawdopodobniej najstarsze koła wodne miały wirnik o pionowej osi obrotu, do którego woda była doprowadzana rurą lub korytem o znacznym nachyleniu. W literaturze takie rozwiązanie jest określane mianem *młyna greckiego* (czasem również tureckiego lub bułgarskiego – rys. 3-43). Ten

¹⁷² Tłumaczenie M.S. W oryginale: *Ex praeteritis praesentia aestimantur.*



Rys. 3-43. Warianty konstrukcji młyna greckiego (rekonstrukcja): a - z łopatkami prostymi, b - z łopatkami wklęsłymi

sposób wykorzystania energii wodnej nie wymaga wprawdzie zastosowania przekładni, wymaga jednak dużej prędkości zasilającej wody oraz jest mniej sprawny od klasycznych kół wodnych o poziomej osi obrotu. Koła wodne o pionowej osi obrotu są spotykane w literaturze technicznej do XVII wieku, po tym okresie niemal zupełnie ustępują miejsca kołom o poziomej osi obrotu.

Filon z Bizancjum (ok. 280-ok. 220 p.n.e.) jest autorem najstarszej wzmianki o zastosowaniu koła wodnego (SUWAŁA 2006). Fundamentalne dzieło Filona *Mechanike syntaxis*, składające się z dziewięciu rozdziałów, przetrwało do naszych czasów jedynie we fragmentach. Natomiast najstarszy zachowany techniczny opis konstrukcji silnika wodnego pochodzi z I wieku p.n.e. i jest autorstwa Witruwiusza – architekta cesarza Oktawiana Augusta (por. przypis 2 na s. 10). Opisany przez niego młyn z kołem wodnym o osi poziomej jest wyposażony w przekładnię zębatą, napędzającą kamień młyński. W opisie silnika wodnego i jego zastosowania autor podaje:

1. *Koła o konstrukcji opisanej poniżej są również budowane nad rzekami. Na obwodzie koła rozmieszczone są łopatki, na które napiera prąd wody i wraz ze swoim ruchem wprawia w ruch koło; przez wodę odbywa się cała praca, bez żadnego udziału człowieka.*

2. *Młyny wodne działają na tej samej zasadzie. Wszystko w nich jest takie same, oprócz koła zębatego, które jest zamocowane na drugim końcu wału i umieszczone pionowo. To koło obraca się w tej samej płaszczyźnie, co koło wodne. Z tym [opisywanym] dużym kołem współpracuje mniejsze, również zębate, ale usytuowane poziomo. Przez zęby koła zębatego na osi koła wodnego napędzane jest poziome koło napędzające kamienie młyńskie. Rynna zsypowa, zawieszona nad urządzeniem, zasila młyn ziarnem i mąka jest wytwarzana przez ruch obrotowy¹⁷³ (WITRUWIUSZ 27-13 p.n.e., Liber X, Capitulum V).*

Mechanizm młyna według opisu Witruwiusza przedstawiono na rysunku 3-44 b.

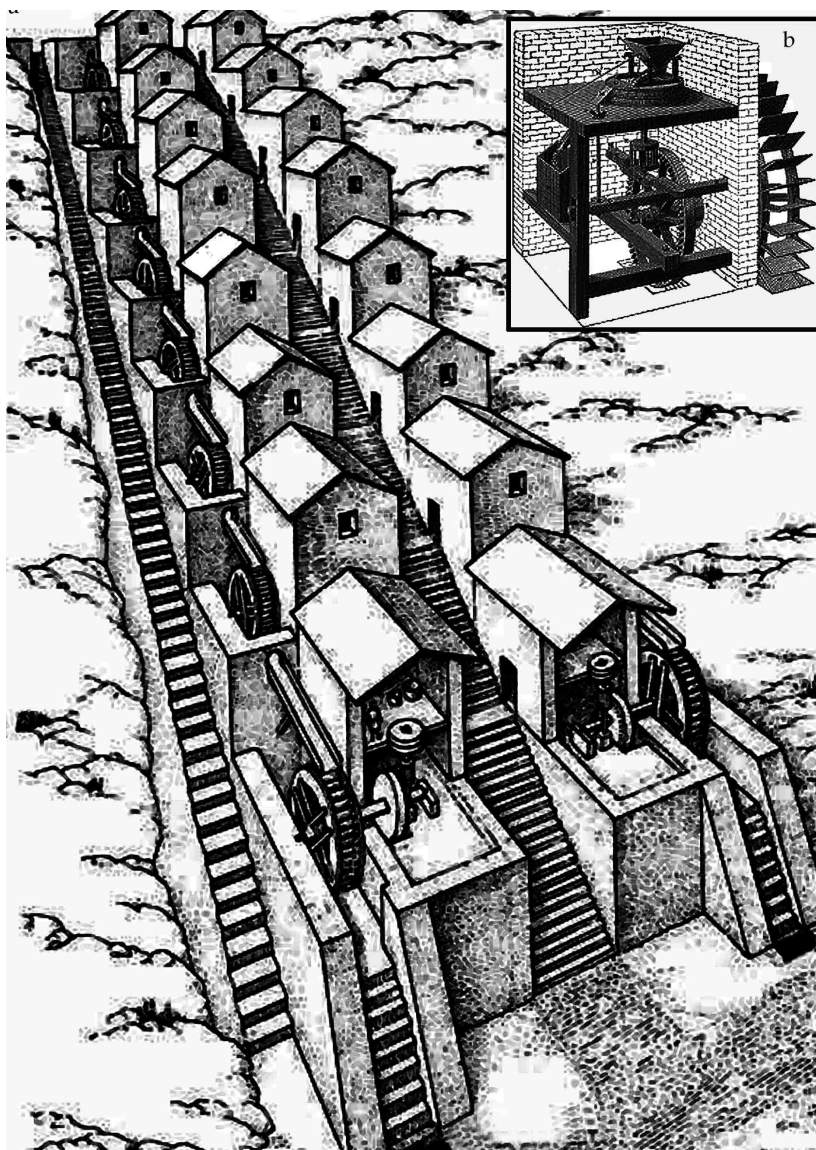
Najbardziej imponujące i jednocześnie najbardziej znane rzymskie zastosowanie kół wodnych miało jednak miejsce kilka wieków później w Barbegal w pobliżu Arles, w dzisiejszej południowej Francji. Od IV wieku n.e. funkcjonował tam imponujący zespół młynów zbożowych wykorzystujący 16 nasiębiernych kół wodnych (rys. 3-44 a). Wydajność tego kompleksu jest szacowana na około 28 t mąki na dobę (ORŁOWSKI 1989). Młyn wyposażony w nasiębierne koło wodne jest zwykle nazywany w literaturze światowej młynem rzymskim lub młynem Witruwiusza.

Z punktu widzenia sposobu doprowadzania wody zasilającej koła wodne o poziomej osi obrotu są klasyfikowane jako: podsiębierne, śródsiębierne oraz nasiębierne.

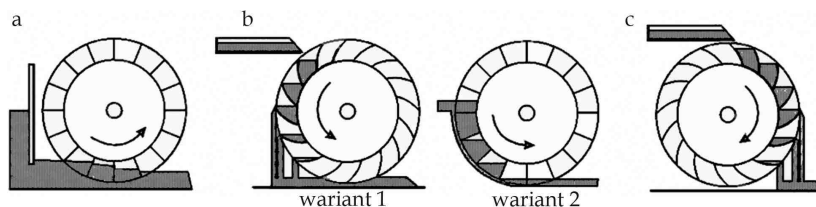
Koła podsiębierne (rys. 3-45 a) były budowane przy bardzo małych różnicach poziomów (poniżej 1 m) i średnich przepływach rzędu 0,1-5 m³/s. Przetwarzały one 20-35% energii kinetycznej przepływającej wody. Koła tego typu były zazwyczaj większe i miały średnicę do 3 m, na obwodzie były wyposażone w łopatki, na które napierał nurt płynącej wody. Oś obracanego w ten sposób koła znajdowała się powyżej poziomu rynny doprowadzającej wodę, a koło obracało się w kierunku przeciwnym do przepływu wody. Im wyższe jest koło wodne, tym większą ma sprawność, jednak i ono ma swoje ograniczenia:

Kół skrzynczastych wysokich niech się strzegą młynarze, bo chociaż takowe są mocniejsze do młcia słabą wodą, wszakże te niewygody z sobą przynoszą. Pierwszą, że groble wysokiej potrzebują albo gotową w niebezpieczeństwo zerwania wysoką wodą wprawują. Drugą, że nierychły obrót wału

¹⁷³ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst zamieszczono na s. 347.



Rys. 3-44. Rzymskie młyny wodne: a - hipotetyczny wygląd zespołu młynów zbożowych w Barbegal (IV wiek n.e.), b - rekonstrukcja mechanizmu młyna na podstawie opisu WITRUWIUSZA (27-13 p.n.e.)



Rys. 3-45. Rodzaje kół wodnych: a – podsiębierne (walne), b – śródsiębierne (w dwóch wariantach: 1 – o większej sprawności, 2 – o mniejszej sprawności), c – nasiebierne (korzeczne)

czynią, gdyż wał pięćłokciowego [5 łokci \approx 2,98 m] koła skrzyńczastego 2 razy się później obróci niż wał koła półtrzecia łokciowego, jako 2 razy jest większe od niego. Zaczyn mało obrotów kamienia wydadją i mlewo czynią niespore (SOŁSKI 1690, Księga I, Zabawa II, Nauka 1).

Kół śródsiębiernych (rys. 3-45 b, w wariacie 1 i 2) używano przy większych spadach (2,5-8 m), lecz przy małej ilości wody (0,1-0,9 m³/s). Wykorzystywały one około 50-60% jej energii. Obrót koła powodowała energia potencjalna znajdującej się w korytkach wody.

Najstarszymi konstrukcyjnie są najprawdopodobniej koła nasiebierne, w których obrót był powodowany energią kinetyczną i potencjalną wody spadającej z położonej powyżej rynny doprowadzającej wodę do korytek umieszczonych na obwodzie koła. W ten sposób ruch obrotowy koła odbywał się zgodnie z kierunkiem płynącej rzeki. Koła nasiebierne były używane przy znacznych różnicach poziomów (3-12 m) i przy dopływie wody 0,1-0,8 m³/s; mogły uzyskać sprawność rzędu 60-80%.

Mechanizm napędowy typowego młyna wodnego składał się z koła wodnego, które przekazywało napęd na wał. Miał on średnicę 500 mm lub większą i był łożyskowany ślizgowo w łożyskach drewnianych smarowanych tłuszczem zwierzęcym. Na przeciwległym końcu wału, wewnątrz budynku, znajdowało się koło przekładni głównej (tzw. *koło palczaste*), nieco mniejsze od koła wodnego. Jego osadzone na obwodzie zęby lub tzw. *palce* zazębiały się z *palcami* (*pałeczkami*) *cewów*, wprowadzając je w ruch. Pierścienie *cewów* były osadzone na pionowej drewnianej (rzadziej metalowej) osi, zwanej wrzecionem, prostopadłej do wału głównego. Dolny koniec wrzeciona opierał się na panewce umieszczonej na poziomej belce, górny koniec wrzeciona był zamocowany w *paprzycy*. *Paprzyca* to żeliwna sztabka trójramienna przenosząca napęd na żarna,

zamocowana w wyżłobieniach (gniazdach) znajdujących się w oku górnego, ruchomego kamienia młyńskiego (*bieguna*).

Zygmunt Gloger w *Encyklopedii staropolskiej ilustrowanej* pisze:

Dawni Niemcy wzięli z włoskiego mulino wyraz swój mulin, a Polacy zrobili z tego młyn. Kiedy się to stało, nikt latami tego dziś nie określi [...] Gdy zaczęto w Polsce spisywać dokumenta, młyny nie należały już do osobliwości, bo np. w r. 1149 Pakosław darowuje nie młyn ze wsią, ale wieś z młynem w Dobrzy: „Pachoslaus villam dedit et molendinum in Dobra”. Bolesław Wstydlawy przywilejem z r. 1258 pozwolił stawiać młyny po obu stronach rz. Nidy (GLOGER 1900-1903, t. III, s. 221).

Jak pisze SUWAŁA (2006), w Polsce pierwsze koło wodne zbudowano w 1145 roku w Łęczycy do napędu młyna, a w XVI wieku było ich około 3000. Urządzenia te, stosowane głównie do napędu młynów zbożowych, rozpowszechniły się na ziemiach polskich w drugiej połowie XI wieku (na Śląsku). Wydajność typowego średniowiecznego młyna wodnego wynosiła około 4 kg mąki na godzinę. Najważniejsze podczas eksploatacji młyna było zapewnienie stałego i równomiernego dopływu wody na koła młyńskie. Wykorzystywano do tego celu miejsca z natury korzystne dla lokalizacji urządzeń młyńskich i dodatkowo sztucznie regulowano przepływ wody, spiętrzając ją, tworząc sztuczne zbiorniki wyposażone w system śluz. Młynarze byli na ogół wysokiej klasy specjalistami, potrafiącymi regulować nurt wodny oraz budować i obsługiwać zespół żarna oraz ich skomplikowany zespół napędu. Młynarz był powszechnie uważany za fachowca w dziedzinie budowy maszyn [*Kto chce dla potrzeb gospodarskich mieć słuszny w domu młynnik na męcie słodów i kasz rozmaitych [...] niech go da w ten sposób zrobić młynarzowi [...]*] (SOLSKI 1690, Księga I, Zabawa II). Cytowany już GLOGER (1900-1903) podaje: [*...] zawód młynarski miał u ludu polskiego większe, niż inne rzemiosła, poważanie. O randze zawodu mogą świadczyć ludowe porzekadła, które oddają szacunek, ale w których też przejawia się zazdrość wobec młynarzy będących najczęściej członkami elity finansowej wsi:*

*O! Nie ma jak to młynarzom, bo na słońce nie wychodzą,
Tylko sobie siedzą w chłodzie, karzą robić na się wodzie*

lub

*Taki sobie młynarz dobry, jak i wojewoda,
Wojewodzie robią ludzie a młynarzowi woda* (KOCHANOWSKI 2005).

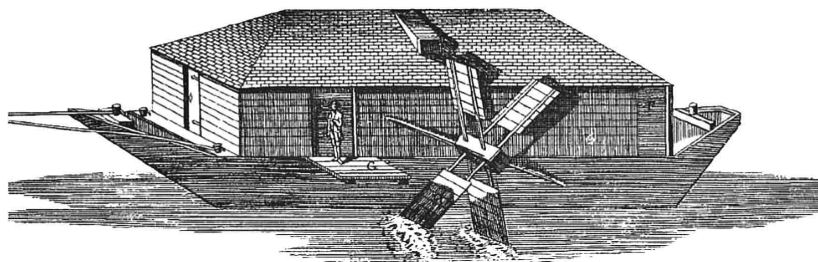
Wielki Młyn wybudowany w XIV wieku w Gdańsku był w czasach późnego średniowiecza największym zakładem przemysłowym w Europie (rys. 3-46).



Rys. 3-46. Wielki Młyn w Gdańsku, rycina Aegidiusa Dickmanna z 1617 roku

Wielki Młyn początkowo był wyposażony w 12, później zaś w 18 wielkich kół napędzanych wodą z kanału Raduni. Koła były rozmieszczone po obu stronach budynku w dwóch rzędach po dziewięć. Młyn był zlokalizowany na niewielkiej wyspie otoczonej ramionami kanału dopływowego, mieścił się w budynku o wymiarach 4×26 m i o wysokości 26 m. Budynek i kanał doprowadzający wodę istnieją do dziś. Aby osiągnąć wymagany dla tak dużej liczby kół spadek wody, wykopano kanał o długości 13 km doprowadzający wodę z rzeki Raduni spod Pruszcza. Pochylenie kanału było mniejsze od pochylenia rzeki, dlatego przy młynie uzyskano różnicę poziomów około 5 m, co z kolei pozwalało osiągnąć imponującą jak na czasy sprzed rewolucji przemysłowej łączną moc na wszystkich kołach rzędu 103 kW (WIŚLICKI 1996).

Specjalną odmianę koła wodnego podsiębiernego wykorzystywano w młynach pływających; koło wodne było zainstalowane na jednej łodzi lub między dwiema połączonymi ze sobą i zakotwiczonymi łodziami, a w ruch wprawiał je prąd wodny w rzece. Przykład takiego rozwiązania przedstawia rysunek 3-47.



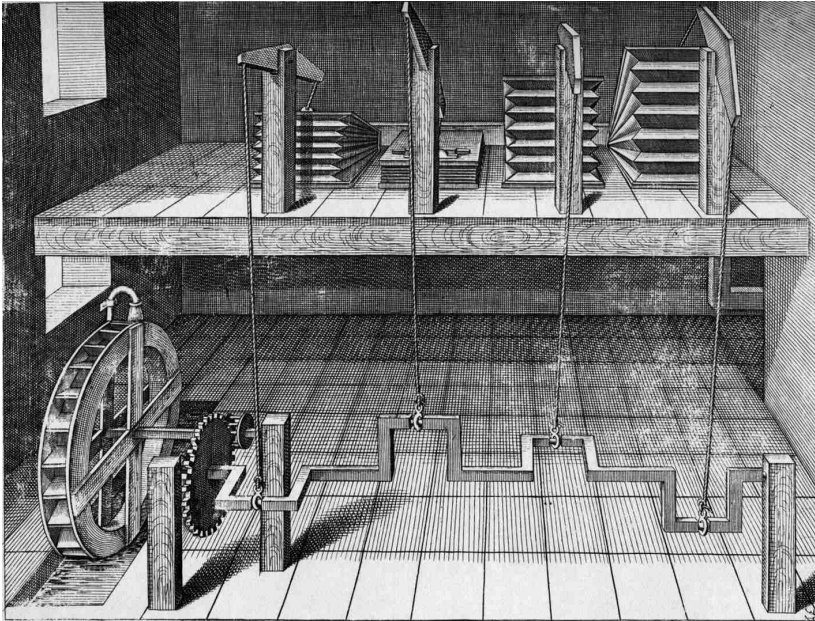
Rys. 3-47. Młyn pływający według AGRICOLI (1555-1557)

Drewniane koła wodne napędzały najróżniejsze urządzenia w zakładach przetwórczych (np. młyny zbożowe i prochowe, folusze¹⁷⁴, piły, młoty itp.). Pod koniec średniowiecza koła wodne stały się najważniejszym źródłem mocy mechanicznej, osiągając średnie moce rzędu 3-6 kW. Jak podaje słynna angielska kronika DOMESDAY BOOK (1086), w Anglii w XI wieku funkcjonowały aż 5624 młyny wodne. Drewniane silniki wodne przyczyniły się w znacznej mierze do uprzemysłowienia Europy. Na rysunku 3-48 przedstawiono koło wodne napędzające miechy według Salomona de Causa.

Na rysunku 3-49 przedstawiono folusz według Pseudo-Juanelo Turriano z 1595 ±10 roku. W instrukcji budowy maszyny napisano:

*A to jest rynna, która doprowadza wodę do koła, B to koło, C to łopatki, oś koła to D. Dwie krzywki E.E są zamontowane na niej [na osi], podrzucając one bijaki F.F na dole. Pod bijakiem jest rączka, która umożliwia zacze-
pienie krzywki. Musi być zachowana ostrożność, żeby młoty nie uderzały w stępę, również nie mogą uderzać za mocno, bo zniszczą sukno. Młoty powinny zostawiać wolne miejsce na 4 palce od ściany i na szerokość dłoni od podstawy, kiedy folują. G to jest ściana, H to podstawa, a bijaki uderzają na wprost w ścianę. Na sukno z góry napływa bieżąca woda z kierunku K [brak na rysunku]. L to sukno. Kołki utrzymują stępę [chodzi prawdo-*

¹⁷⁴ Folusz (piłśniarka) – średniowieczna maszyna używana do produkcji sukna. Tkaniny przeznaczone na sukno wytwarzano w formie grubej wełny, tzw. wełny zgrzebnej, a następnie poddawano folowaniu (spilśnianiu). Folowanie, zwiększające zwartość tkaniny, polegało na umieszczeniu jej w foluszu, czyli urządzeniu napędzanym najczęściej wodą, gdzie stępory uderzały w sukno leżące w stępie (wydrążonej kłodzie). Po folowaniu skurczone o 1/4 sukno naciągano na ramy i suszono na słońcu. Słowo pochodzi od holenderskiego *vollen* (folować).



Rys. 3-48. Koło wodne zastosowane do napędu miechów (DE CAUS 1615)

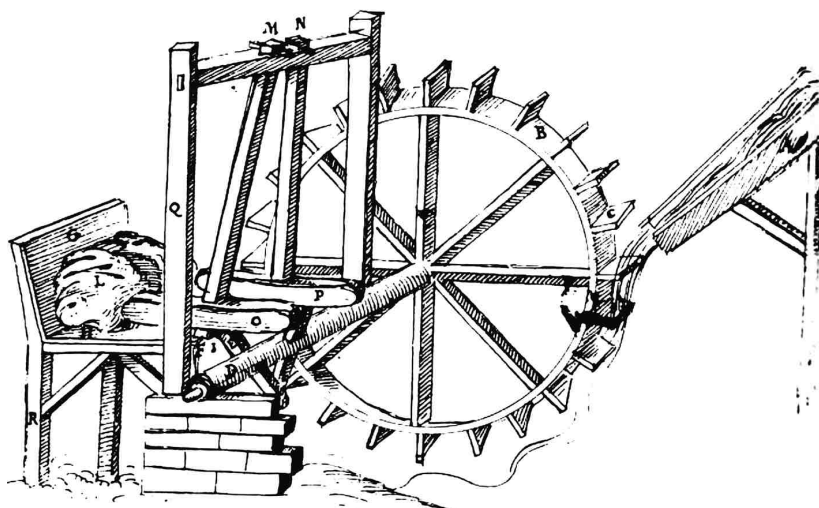
podobnie o zastrzały]. Swoją ramę mają także bijaki, które zawieszono są jak serca dzwonów, zabezpieczone są kółkami M.N. R to statyw stępy. Młoty O.P mają być zrobione z dębu ostrolistnego [*Quercus ilex* L.]. Reszta z jakiegoś dobrego drewna¹⁷⁵.

Sporo informacji o technologii folowania, a przy okazji również o zasadach budowy kół wodnych, zawiera trzytomowy podręcznik *Rękodzieło fabryki sukiennej, która w Krakowie 1786, dla wielu pożytków i zatrudnienia ubogich pracą jest ustanowione*, autorstwa Wacława Sierakowskiego (1740-1806). Warto zacytować dwa fragmenty:

O folowaniu

Trwłość sukien nad wszystkie inne materyje, które się nie folują, okazuje doskonałość oraz i konieczną potrzebę tej folusza maszyny.

¹⁷⁵ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst zamieszczono na s. 349.



Rys. 3-49. Koło wodne zastosowane do napędu folusza według Pseudo-Juliano Turriano (1595 ±10) (NORDON 1986)

Najdokładniej w warsztacie sukno robione, gdy się z warsztatu zdejmie, bydź musi brudne, wietkie [wątłe] i grube. Ani się obejdzie bez dziurek, szpar, chociaż przez dobrą czeladź robione i ładą dobrze dobijane. Po folowaniu jak zaraz jest jaśniejsze, mocniejsze, piękniejsze i miększe i bardziej zbite, chociaż składające je nici połowę swej istoty [grubości] straciły. Zaiste zawsze by magister [majster] bydź przy folowaniu powinien.

O machinie folusza

Folusze różne bydź mogą, obracane wołmi, koźmi, osłami – lecz te bardzo drogie, wiatrem – ten niestateczny. Ale że wody koniecznie trzeba do folowania, zaraz w takich foluszach trzeba stawiać pompy, których utrzymanie drogo kosztuje. Dla tych więc niewygód najlepsze są folusze obracane wodą. Powinien wtedy folusz bydź stawiany albo na rzece, albo na potoku, ale lepiej na potoku, bo nie jest tak podległy wylewom wody, które nie dopuszczają folować. Toż iż łatwiej wodą z potoka folusznik władać sobie może, podług upodobania i potrzeby, a zatym nie tak są sukna wydane na zdziurawienie, mułem zatrzepanie, zalanie etc., jak bywa na rzekach.

W foluszach stawianych na rzekach woda najczęściej spodem obraca koło, bo spadku nie ma. Z potoku zaś woda zawsze spada z wierzchu. Zaczynaj lepiej jest folusz stawiać na potokach, bo ma i poruszenie równe i z góry spadającą

wodę, która jest tęższa. Ale najlepiej jest zgadzać się z okolicznościami, jak można tak stawiać. Zawsze na takiej wodzie stawiać go należy, aby równo w zimie, jak w lecie robiła, bo się na takiej i sukna lepiej przewracają i rozgrzewają. Wodą mętną nigdy sukna dobrze nie wymyje, wody twarde, które nie rozpuszczają mydła, nie dobrze i folują – lepsze nierównie miękkie.

W machinie folusza dość jedno koto, które obracane wodą, rączkami stępy wynosi.

W foluszu te trzy robią się rzeczy: to jest 1° sukna się folują, 2° tłuszcz z nich wyprowadza się, 3° płuczą się na czysto [tom III, rozdział O folowaniu] (NOWAK 1961, s. 205).

Dalszy rozwój silników wodnych jest już ściśle związany z rozwojem turbin wodnych. Podstawą ich rozwoju były prace teoretyczne Daniela Bernoulliego (1700-1782) i Leonharda Eulera (1707-1783) – wynalazcy aparatu kierowniczego, oraz doświadczenia Johanna Andreasa Segnera (1704-1777) (młynek Segnera z 1750 roku) i Claude’a Bourdina – autora nazwy *turbina* (1824). Pierwszą turbiną, która znalazła zastosowanie w przemyśle, była turbina z promieniowym przepływem wody Benoîta Fourneyrona (1827), kolejną – z przepływem osiowym Louisa Dominique’a Girarda (1828), zainstalowana po raz pierwszy w Dawspudzie w Polsce. Popularność turbin rosła powoli, jednak już w latach dwudziestych XX wieku wyparły one prawie wszystkie koła wodne.

3.4.2. Wiatraki

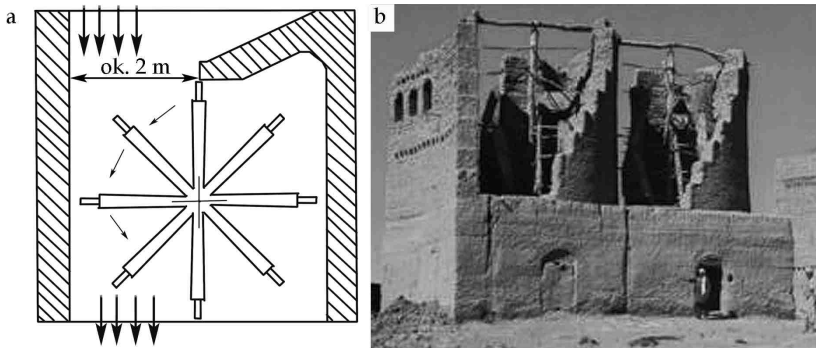
Wiatr jest powszechnym zjawiskiem i łatwo dostępnym źródłem energii, był wykorzystywany przez ludzi do celów technicznych tysiące lat przed pojawieniem się maszyn parowych, początkowo tylko do żeglugi, później również do zapewnienia dmuchu dymarkom¹⁷⁶ oraz do napędu różnego rodzaju urządzeń (pomp, młynów, obrabiarek itp.). Obok energii płynącej wody był głównym motorem rozwoju przemysłowego w dawnych wiekach. Silniki wiatrowe znalazły zastosowanie w napędzie urządzeń, które nie muszą pracować w trybie ciągłym i mogą oczekiwać na wiatr o odpowiedniej prędkości. Wiatraki nadają się więc bardzo dobrze do przepompowywania wody nawadniającej pola, do mielenia

¹⁷⁶ Dymarki (piece do wytopu rudy) na ziemiach polskich były lokalizowane w miejscach odsłoniętych, otwór doprowadzający powietrze wyposażano w wiatrolapy ukierunkowujące i zwiększające prędkość strugi powietrza służącego do nadmuchu.

zboż, ale już mniej do napędu urządzeń kuźniczych (miechów, młotów). Najstarsza wzmianka o użyciu wiatraków (do pompowania wody) pochodzi z około 400 roku p.n.e. z Indii. W Chinach oraz krajach basenu Morza Śródziemnego wiatraki pojawiły się na początku naszej ery lub nieco wcześniej.

Wiatraki wraz z napędzanymi przez nie urządzeniami są obok okrętów największymi maszynami, jakie kiedykolwiek zbudowano z drewna. Istnieją dwa główne ich typy:

- o osi wirnika prostopadłej do kierunku przepływu wiatru (o osi pionowej – wiatraki karuzelowe, rys. 3-50, o osi poziomej – wiatraki bębnowe, rys. 3-51 a),
- o osi wirnika równoległej do kierunku przepływu wiatru, tzw. *wiatraki śmigłowe* (o osi poziomej – rys. 3-51 b).



Rys. 3-50. Perskie wiatraki karuzelowe: a – zasada działania (widok z góry), b – ruiny w Khorasanie (Iran) (SCPES 2007)

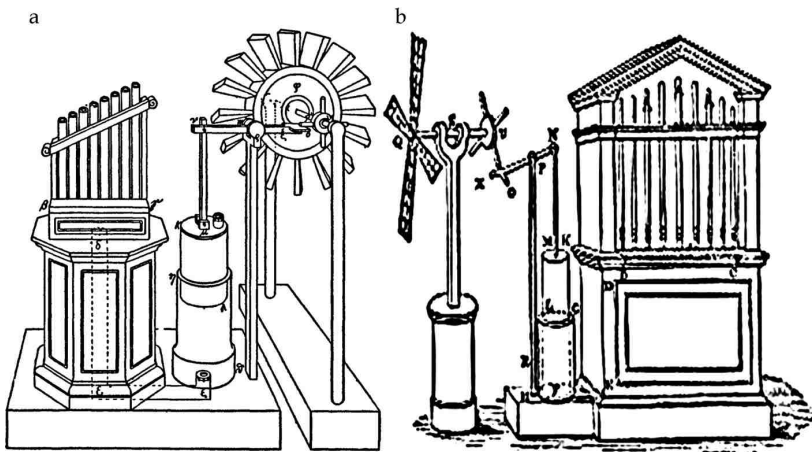
Wiatraki bębnowe oraz wiatraki śmigłowe w odróżnieniu od wiatraków karuzelowych wymagają nastawiania na kierunek wiatru.

W rejonach, w których występują długotrwałe wiatry wiejące z jednego kierunku, znalazły zastosowanie wiatraki karuzelowe. Wirnik takiego wiatraka ma wał pionowy o osi równoległej do łopatek, co umożliwia zastosowanie bardzo prostego układu przeniesienia napędu na żarna. Żarna są zlokalizowane w niższej kondygnacji. Oś obrotu wirnika wiatraka jest jednocześnie osią obrotu żaren.

Podczas pracy wiatraka karuzelowego łopatki leżące z jednej strony wału najczęściej zakrywa się osłoną przeciwwiatrową (rys. 3-50 a). Zmniejsza ona powierzchnię czynną żagli (a zarazem sprawność), co skutkuje

koniecznością budowy o wiele większego wiatraka, aby uzyskać moc porównywalną do tej, jaką ma wiatrak śmigłowy. Szacunkowa moc wiatraka przedstawionego na rysunku 3-50 wynosiła około 400 W na jeden wirnik (przy wietrze o prędkości 6-12 m/s). Wiatraki śmigłowe oraz wiatraki bębnowe (rzadziej stosowane) budowano na obszarach, gdzie często zmienia się kierunek wiatru. Poziomy wirnik tych typów wiatraków był zaopatrzony w pokaźnych rozmiarów skrzydła (wiatrak śmigłowy) lub w bęben z łopatkami (wiatrak bębnowy) osadzony zwykle w drewnianym korpusie, który można było obracać dookoła jego osi, nastawiając w kierunku wiatru.

Siła napędowa pierwszych silników wiatrowych była wykorzystywana głównie do przepompowywania wody i mielenia zboża, ale nie tylko. W pismach Herona z Aleksandrii (ok. 10-70 n.e.), greckiego wynalazcy, zachowała się wzmianka o wiatraku napędzającym organy wodne. Tzw. *organy Herona* mogą być jednak autorskim „dodatkiem” średniowiecznego mnicha kopisty do oryginalnego tekstu. Rekonstrukcję dwóch wariantów instrumentu przedstawia rysunek 3-51.



Rys. 3-51. Napędzane wiatrem organy Herona, rekonstrukcja idei z I wieku n.e.: a – wariant z wiatrakiem bębnowym, b – wariant z wiatrakiem śmigłowym

Struktura konstrukcyjna arabskich wiatraków w ciągu 2000 lat od ich powstania nie ulegała większym zmianom. Na rysunku 3-52 przedstawiono wiatrak tego typu służący do napędu młyna zbożowego.

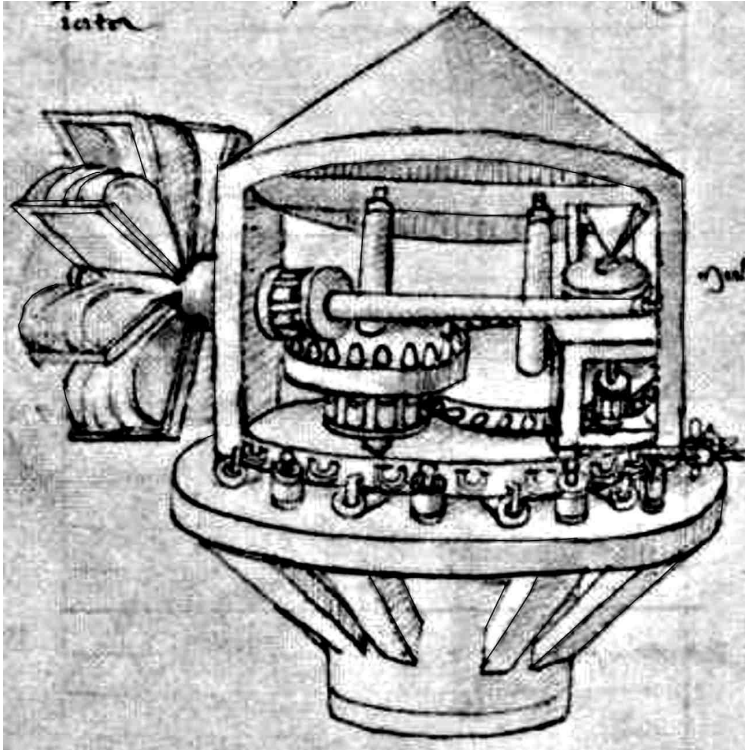


Rys. 3-52. Młyn zbożowy w Mushki Chah (Iran), stan z około 1900 roku (LANDOR 1902)

W VII wieku n.e. urządzenia o poziomej osi obrotu napędzane energią wiatru były powszechnie wykorzystywane do przepompowywania wody w Persji. Zachowane przekazy pisemne sugerują istnienie takiego typu wiatraków, w których górna część, napędzana wiatrem, wystawała ponad lustro wody, a poruszane jej siłą łopaty wprawiały w ruch masy wody. Za panowania kalifa Umara Ibn al-Chattaba (ok. 581-644) konstruktorem tego rodzaju wiatraków według ORŁOWSKIEGO (1989) mógł być Abu Lulua.

Wiatraki bębnowe (rys. 3-53) nie znalazły szerszego zastosowania. Wymagały one nastawiania na kierunek wiatru oraz stosowania wyprofilowanych łopatek lub przysłony. Rysunek 3-53 przedstawia wiatrak bębnowy napędzający młyn zbożowy (DI GIORGIO MARTINI 1484 ±2)¹⁷⁷. Mechanizm napędowy młyna składał się z dwóch przekładni redukcyjnych i jednej multiplikującej, ich łączne przełożenie wynosiło około 4,5 (na 4,5 obrotu wirnika wiatraka przypadał jeden obrót żaren). Bardzo interesujące jest łożyskowanie toczne górnej części (tzw. *czapki*) wiatraka za po-

¹⁷⁷ Włoch Francesco di Giorgio Martini (1439-ok. 1501), malarz, architekt i mechanik. Autor dzieła *Trattato di architettura, ingegneria e arte militare* (*Traktat o architekturze cywilnej i wojskowej*).

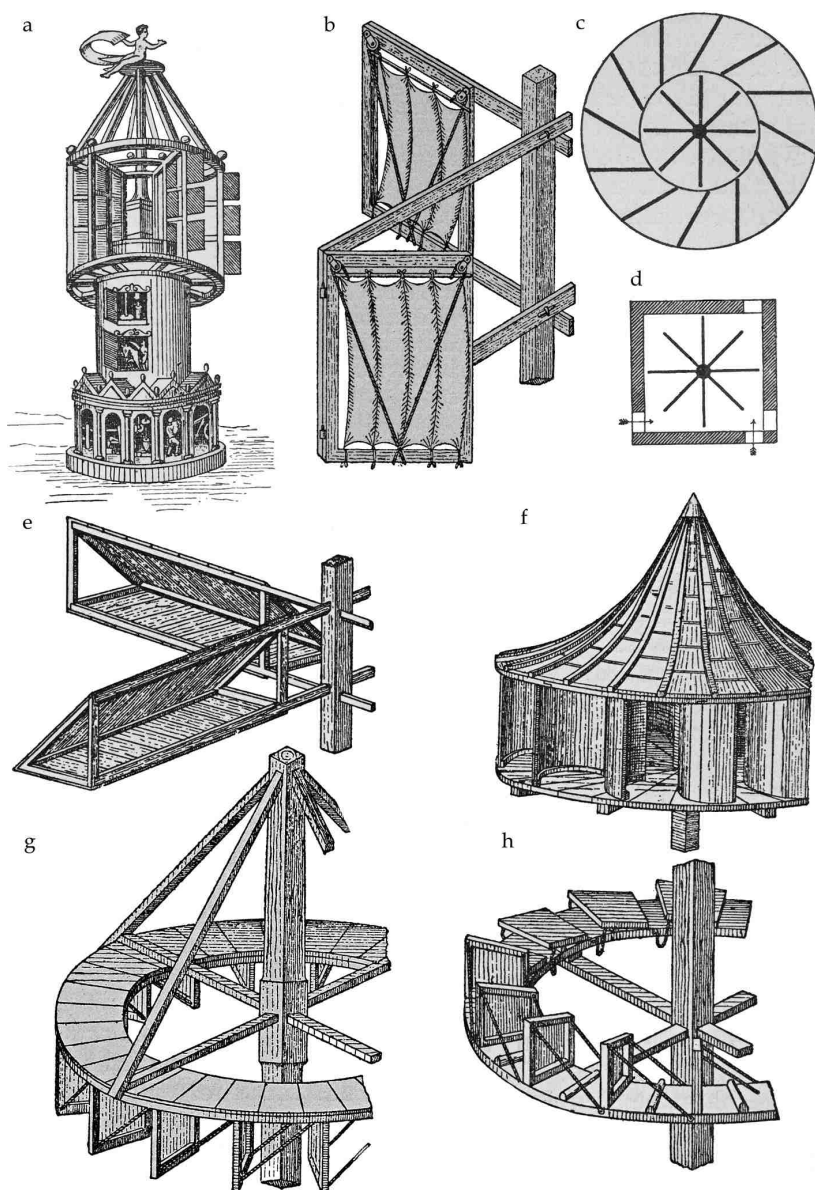


Rys. 3-53. Wiatrak bębnowy napędzający młyn zbożowy według Francesco di Giorgio Martiniego (DI GIORGIO MARTINI 1484 ±2)

mocą rolek. Takie rozwiązanie umożliwia łatwe nastawianie wirnika w kierunku wiatru i było wykorzystywane przez kolejne 500 lat w opisywanych dalej wiatrakach (*holendrach* i *paltrakach*).

Bardzo wiele opisów konstrukcji wiatraków karuzelowych można znaleźć w monumentalnym dziele z 1910 roku *Ruhmesblätter der Technik* (*Chlubne karty techniki*) niemieckiego historyka techniki Franza Marii Feldhaua (1874-1957). Niektóre z nich przedstawiono na rysunku 3-54.

We wszystkich pokazanych rozwiązaniach próbowano wyeliminować konieczność przysłaniania części wiatraka, stosując skrzydła stawiające wiatrowi możliwie duży opór z jednego kierunku, a opływowe z drugiego (rys. 3-54 b, f, g, h). Szczególnie pomysłowe jest rozwiązanie b, polegające na zastosowaniu dzielonych skrzydeł rozkładających się

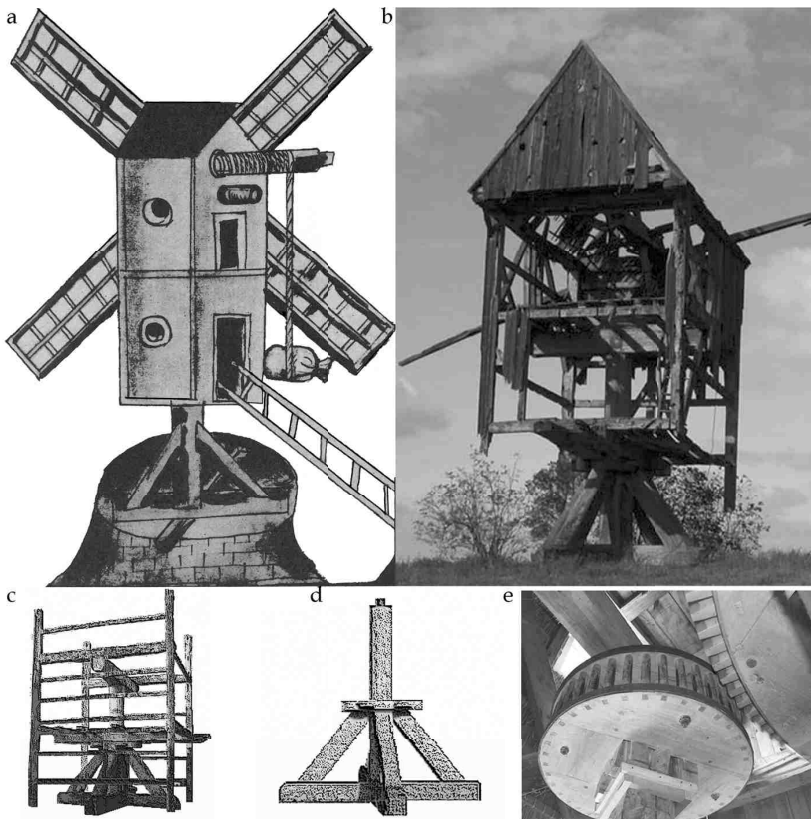


Rys. 3-54. Wiatraki karuzelowe: a - z 1567 roku, b-h - z 1617 roku (FELDHAUS 1910)

samoczynnie pod wpływem wiatru z jednej strony, a składających pod wpływem wiatru z drugiej.

Prawdopodobnie wiatrak europejski powstał w XII wieku na podstawie nieprecyzyjnych wiadomości o wiatrakach azjatyckich od powracających uczestników pierwszych wypraw krzyżowych.

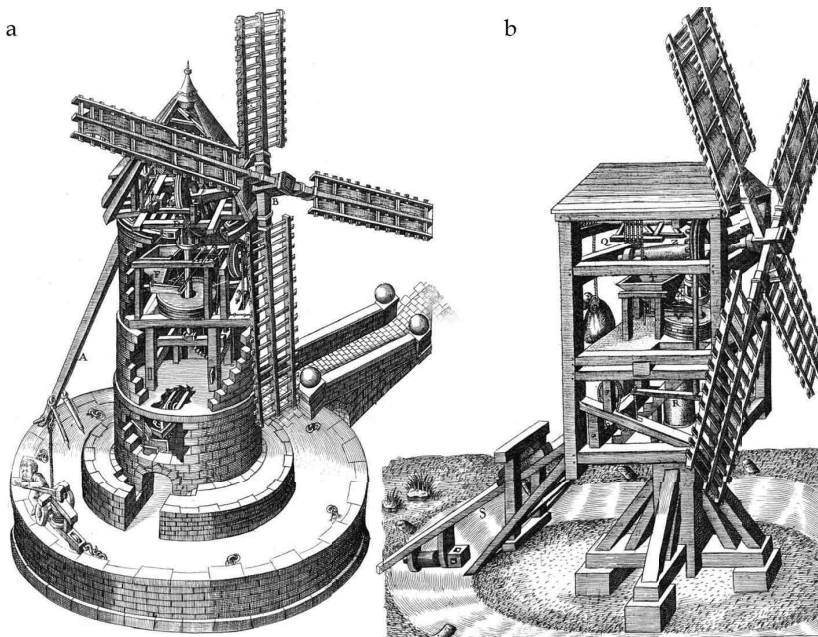
Na rysunku 3-55 a zamieszczono jedno z najstarszych przedstawień wiatraka europejskiego (z 1430 roku). Jak wspomniano, rodowód tego wiatraka jest wcześniejszy. Pierwsza wzmianka o tego typu maszynie w Europie pochodzi z Francji z 1105 roku. W końcu XII wieku używano wiatraków w Normandii (ok. 1180 roku) i w Anglii (ok. 1185 roku). W XIII wieku zaczęły się szerzej rozpowszechniać (np. Kolonia – 1222 rok, Siena



Rys. 3-55. Wiatrak koźlak: a – według rysunku z 1430 roku (FELDHAUS 1910), b – pozostałości w Czarnotkach (woj. wielkopolskie), c – rama, d – kozioł, e – przekładnia główna

- 1237 rok, Pomorze Gdańskie - 1271 rok), a w XIV wieku stosowano już niemal na całym obszarze Europy (ORŁOWSKI 1989). Najstarszym konstrukcyjnie wiatrakiem europejskim jest *koźlak*, jego nazwa wywodzi się od kozła o podstawie krzyżowej (rys. 3-55 d), na której obracała się drewniana rama (rys. 3-55 c).

Wiatraki śmigłowe wymagały obracania śmigieł w kierunku wiatru, dlatego cały wiatrak (rys. 3-56 b) lub tylko jego górna część (rys. 3-56 a) były zamocowane obrotowo (RAMELLI 1588)¹⁷⁸.



Rys. 3-56. Wiatraki Agostino Ramello (RAMELLI 1588): a - z obracaną górną częścią (protoplasta tzw. *holendra*), b - obracany na tzw. *koźle* (*koźlak*)

Nieco odmienne były wiatraki stosowane wówczas w krajach śródziemnomorskich (Grecja, południowa Francja, Włochy, Hiszpania), gdzie wiały regularne wiatry o przewidywalnym, cyklicznie zmiennym kie-

¹⁷⁸ Agostino Ramelli (1531-1600) - włoski inżynier; autor książki *Le diverse et artificiose macchine del capitano Agostino Ramelli* [...] (1588), opisującej ówczesne maszyny, w tym skonstruowane przez Ramello. Uznaje się go za autora koncepcji silnika Wankla.

runku; wiatraki te zachowały się na ogół w dość dobrym stanie po dziś dzień, np. na Cykladach. Ich skrzydła były zazwyczaj wyposażone w płócienne żagle, rozpinane na drewnianych ramach (rys. 3-57 a) lub śmigłach (rys. 3-57 b). Wiatrak przedstawiony na rysunku 3-57 b pochodzi z hiszpańskiego regionu La Mancha, z którego wywodził się Miguel de Cervantes, autor powieści *Don Kichot z Manczy* (hiszp. *Don Quijote de la Mancha*), w której wiatraki odgrywały dość istotną rolę.



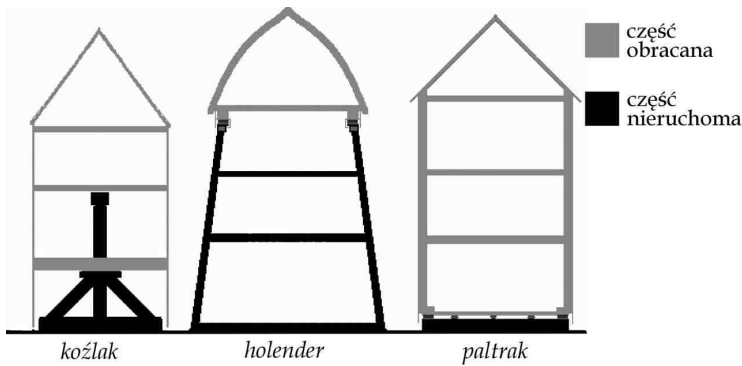
Rys. 3-57. Wieżyczkowe wiatraki śródziemnomorskie (stan obecny): a - z „żaglowym” śmigłem, grecka wyspa Mykonos, b - w hiszpańskim Campo de Criptana (region La Mancha)

Z 1344 roku pochodzi pierwsza udokumentowana wiadomość o użyciu w Holandii wiatraka do wypompowywania wody przy osuszaniu terenów zalanych przez morze. Od XV wieku używano tam masowo wiatraków do tego celu, zwłaszcza w okręgu Zaan, gdzie liczba wiatraków czynnych przy osuszaniu depresji doszła pod koniec XVII wieku do około 700, a na początku XIX wieku – gdy zaczęto zastępować je maszynami parowymi – nawet do 900. Tam też zaczęto ich używać do innych zadań. W 1589 roku cieśla z Delft, Cornelius Dircksz Muys, zastosował wiatrak do napędu bagrownicy (pogłębiarki) (ORŁOWSKI 1989), a Cornelis Corneliszoon (ok. 1550-ok. 1600 lub 1607) użył go z dobrym skutkiem do napędu pilarki ramowej (po roku 1594) oraz pras w wytlaczarni oleju (1597).

Wiatraki w Polsce

Autor cytowanego wcześniej pierwszego polskojęzycznego podręcznika z zakresu mechaniki i budowy maszyn Stanisław Solski preferuje koła wodne oraz kieraty jako pewniejsze do napędu różnego rodzaju urządzeń (dźwignic, pomp, młynów, obrabiarek). Wiatraki są dla niego rezerwowym źródłem energii; o *młynach wietrznych*, jak je nazywa, pisze: *Takie młyny są potrzebne na miejscach, gdzie o wodę trudno i bydła skąpo, a wiatry częste panują* (SOLSKI 1690).

Wiatraki budowane na ziemiach polskich można podzielić na trzy typy: *koźlak*, *holender* oraz *paltrak* (rys. 3-58).



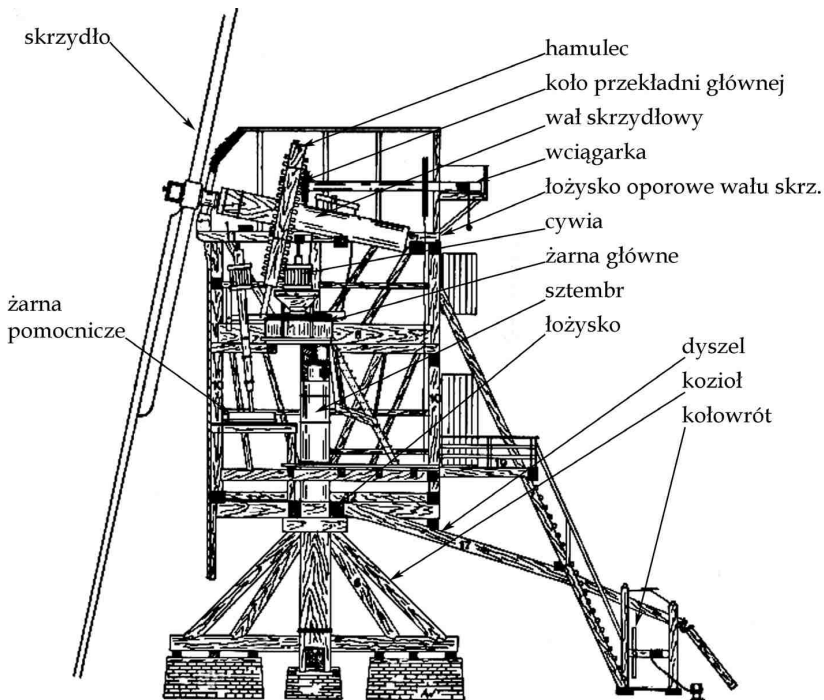
Rys. 3-58. Typy wiatraków budowanych na ziemiach polskich

Pierwsza wzmianka o pojawieniu się wiatraków na ziemiach etnicznie polskich pochodzi z drugiej połowy XIII wieku (SZYMAŃSKI 2007). Jest ona zawarta w zezwoleniu na budowę młynów poruszanych powietrzem, pochodzącym z 1271 roku, a wydanym norbertanom z klasztoru w Białym Buku (koło Trzebiatowa) przez księcia Wiesława II z Rugii (ok. 1240-1302). Zapis książąt pomorskich na rzecz cysterek w Szczecinie z 1289 roku wyraźnie informuje o istnieniu wiatraka. Kolejne wzmianki informują o wiatrakach w Kobylinie (1303) i Wschowie (1325). W XIV i XV stuleciu budowie te były już powszechnie znane na ziemiach północnej, północno-zachodniej i środkowej Polski (ORŁOWSKI 1985). W XVIII wieku na terenie Rzeczypospolitej pracowało już około 20 000 wiatraków. Często występowały one w dużych skupiskach, np. na terenie wschodniego Mazowsza. Pozostałe do naszych czasów konstrukcje pochodzą jednak głównie z XIX i początków XX wieku (KOZAKIEWICZ 2007). Wiatraki

w zależności od przeznaczenia dzieliły się na mączniaki, owsiaki, kaszaki i śrutowniki, w niektórych z nich tłoczono też olej, a inne służyły do przepompowywania wody (wiatrakiem można: *wodę z rowów gonić na wyższe miejsca* – SOLSKI 1690). Dopiero w XIX wieku pojawiły się wiatraki wielofunkcyjne, np. z wyprowadzeniem napędu do podłączenia zewnętrznej młockarni (JAGODZIŃSKI 1959).

Koźlak

Podobnie jak w pozostałej części Europy, również w Polsce konstrukcyjnie najstarszym typem wiatraka jest *wiatrak koźlowy*, czyli *koźlak* (przekrój *koźlaka* pokazany jest na rys. 3-59). Takie wiatraki pojawiły się na ziemiach polskich w pierwszej połowie XIV wieku na Kujawach i w Wielkopolsce, natomiast rozpowszechnienie ich stosowania przypada na wiek XV. *Koźlaki* dotrwały bez większych zmian konstrukcyjnych do XX wieku i stanowiły najliczniejszą grupę wiatraków w Polsce. Były urządzeniami



Rys. 3-59. Wiatrak typu *koźlak*

niemal całkowicie drewnianymi, osadzonymi na fundamencie składającym się z nieruchomej podstawy, ich wysokość razem z fundamentem dochodziła do 35 m (zazwyczaj nie przekraczała jednak 25 m). Na ich budowę zużywano około 80 m³ drewna. Całość była zwieńczona dwuspadowym dachem obitym gontem. Typowy *koźlak* był budowany na planie czworoboku i miał łącznie trzy kondygnacje – dolna była zajęta przez konstrukcję *kozła*, dwie wyższe były przeznaczone do produkcji mąki. Dwie obracane górne kondygnacje były wykonane w formie konstrukcji szkieletowej (słupowo-ramowej), ze ścianami obitymi deskami. Zwykle sosnowe deskowanie ścian wiatraka nie sięgało do samej ziemi (ze względu na koszt i ciężar) i odsłaniało widoczny z daleka charakterystyczny koziół, wsparty na fundamencie z odpowiednio ułożonych podciosanych głazów polodowcowych. Koziół *wiatraka koźłowego* dał zapewne początek bajkom o chatce na kurzej łapce (ORŁOWSKI 1985), które prawdopodobnie miały zniechęcić dzieci od zbliżania się do wiatraków (ich skrzydła były przyczyną wielu wypadków śmiertelnych). Młynarze na ogół należeli do grupy ludzi majątnych i wpływowych, stawianych w hierarchii na równi z wójtem czy plebanem.

Koronną częścią *koźlaka* jest jego podstawa (*koziół*), którego centralną częścią jest pionowy słupek (*sztembr*) – oś obrotu całej konstrukcji wraz ze wszystkimi znajdującymi się wewnątrz mechanizmami. *Sztembr*, o wysokości do 5 m (zazwyczaj ok. 3 m) i średnicy do 1,8 m (zwykle ok. 0,6-1,2 m), najczęściej był podparty czterema zastrzałami z bali sosnowych o przekroju zbliżonym do kwadratu (o wymiarach ok. 0,5 × 0,5 m), a jego dolne zakończenie utwierdzano w dwóch krzyżujących się legarach. Na górnym końcu *sztembra* znajdowało się wzdłużne drewniane łożysko ślizgowe, które tworzyła górna płaszczyzna *sztembra* oraz masywna (1,5 × 0,5 × 0,5 m) belka nośna, tzw. *mącznica*. Ciężar górnej, obracanej części wiatraka był przenoszony na *mącznicę* za pomocą tzw. *mącznych rygli* – poprzecznych belek położonych na *mącznicy*. Drewno na elementy nośne pochodziło z pni 120-150-letnich dębów (takie drewno jest trwalsze, ponieważ ma stosunkowo duży udział twardzieli i jednocześnie wiek jego najstarszych warstw jest na tyle młody, że prawdopodobieństwo, iż są one spróchniałe, jest niewielkie).

Wiatrak koźłowy był obracany na dębowym czopie po to, aby jego śmigło wyposażone w cztery skrzydła mogło przyjąć odpowiednie położenie w stosunku do wiatru. Do obracania wiatraka służył drąg drewniany o długości 8-9 m (tzw. *łogon* lub *dyszlel*) wystający z tylnej ściany (przeciwległej do ściany wietrznej ze śmigłem). *Dyszlel* był przytwierdzony

jednym końcem do belek izbicowych wewnątrz wiatraka, a drugim oparty na odpowiedniej podpórcie. Na jego zewnętrznym końcu mógł się znajdować kołowrót lub zaczep liny do kołowrotu stacjonarnego, który można było przenosić po obwodzie i osadzać w kilku wcześniej przygotowanych stanowiskach. Kiedy dyszel zbliżał się do kołowrotu stacjonarnego, przerywano nastawianie, odwijano linę i przekładano kołowrót. Nieco odmiennym rozwiązaniem było zastosowanie kołowrotu przemieszczającego się razem z wiatrakiem (rys. 3-60). Kołowrót na dyszlu zakotwiczano za pomocą liny z rozmieszczonymi na okręgu osadzonymi w ziemi słupkami. Zamiast kołowrotu do obrócenia korpusu wiatraka można było użyć koni.



Rys. 3-60. Kołowrót do nastawiania wiatraka (młyn w Ede w Holandii; zbudowany na przełomie XVI i XVII wieku, stan obecny)

Ogólny opis techniczny *koźlaka* został zamieszczony w *Architekcie polskim: Wiatraki mają części przedniejszych siedm: 1. stolec, na którym się cały młyn obraca; 2. dyszel, którym się obraca do wiatru; 3. skrzydła; 4. wał w głowie trzymający skrzydła; 5. koło paleczne w tymże wale do góry stojące; 6. zastawkę*

tamującą obrót skrzydeł i kamienia; cewy na górnym wrzecionie obracające kamień; 8. wrzeciono spodnie, które dźwiga kamień. [...] Skrzydła na wale 4 bywają długie łokci 10 albo 8 [6,0 lub 4,8 m]. Na tymże wale jest osadzone koło paleczne, które ma dyjаметru [średnicy] łokci 5 bez ćwierci [2,8 m]. Liczy palców 96, obraca cewy w cewek 8 i tak kamień obraca razów 12 gdy skrzydła raz (SOLSKI 1690, Księga I, Zabawa II, Część 5).

Specyficzną odmianą *koźlaków*, spotykaną jedynie w północno-wschodniej części naszego kraju, w okolicach Sokółki koło Białegostoku, są tzw. *wiatraki sokólskie*. Cechą charakterystyczną typowego wiatraka sokólskiego jest kamienny fundament w kształcie ściętego stożka, podwyższający całą konstrukcję. Stożek ten, zwany kopcem, wykonywany był z polnych kamieni i cementowo-wapiennej zaprawy, w jego osi osadzano słup, na którym wspierała się dwukondygnacyjna, drewniana konstrukcja wiatraka. Zamocowanie śmigieł wyżej zwiększało sprawność napędu.

Holender

Tuż Belgowie, Hollandowie referendi, ziemią i łądem mocni, i porządni nie tylko ręką i siłą, ale też machinami, aproszami¹⁷⁹ i ogniem, inwencjami nad innych waleczniejsi (CHMIEŁOWSKI 1745-1746)¹⁸⁰.

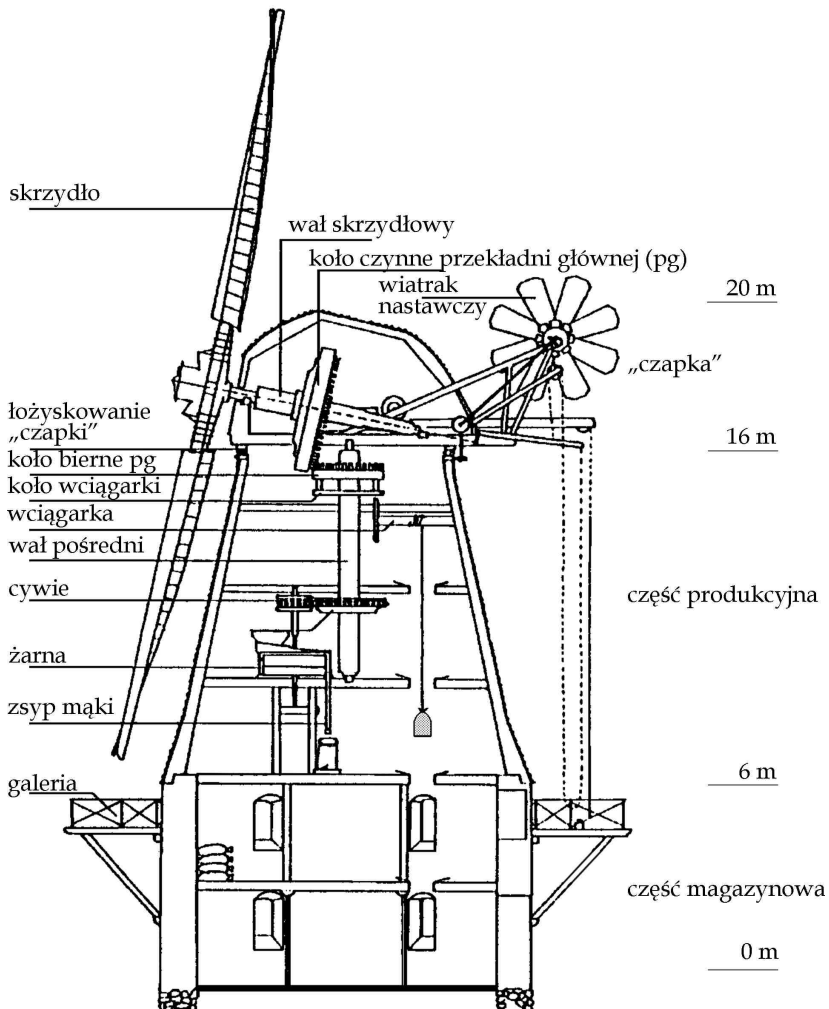
Drugi rodzaj wiatraka występującego w Polsce to tzw. *holender* (*wiatrak holenderski* lub *wiatrak wieżyczkowy* – rys. 3-61). Wymyślony we Włoszech, a dopracowany, jak wskazuje jego nazwa, w Niderlandach pojawił się w Polsce w drugiej połowie XVIII wieku i zyskał popularność w zachodniej i północnej jej części, jednak nawet tam nie wyparł tradycyjnych *koźlaków*. *Holender* był zazwyczaj murowany z cegły i kamieni, rzadziej wykonywany z drewna. Jego masywny, nieruchomy korpus (zwykle budowany na planie koła lub wieloboku foremnego) był zwieńczony obrotową wieżyczką w kształcie stożka lub kopuły. Obracając wieżyczkę, można było ustawiać łopaty śmigła do wiatru.

Powstanie pierwszych wiatraków wieżyczkowych z ruchomą częścią dachową datuje się na koniec XIV wieku. Ostateczną formę nadał im w XVII wieku Jan Adriaanszoon Leeghwater (1575-1650).

Holendry stały się najpopularniejszymi typami wiatraków w większości krajów europejskich.

¹⁷⁹ *Aprosz* – podkop lub rów umożliwiający zbliżenie się do obleganej twierdzy.

¹⁸⁰ W rozdziale: *Siejba deukaliona i pyrry, alias narodów walecznych... Lokacja krótką*.



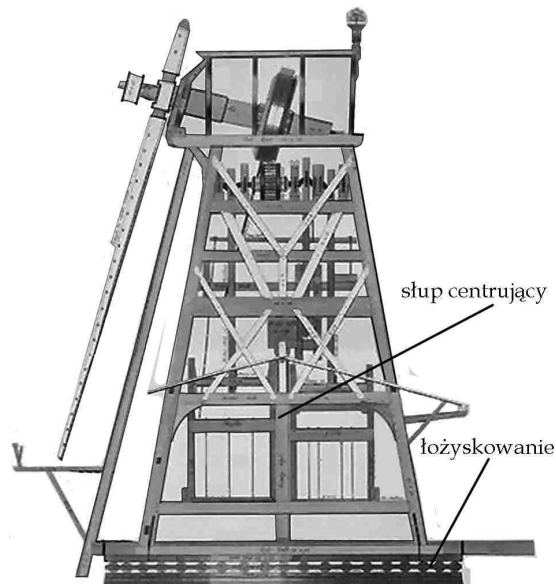
Rys. 3-61. Wiatrak typu holender

Paltrak

Trzeci rodzaj młyna wietrznego występujący w Polsce – *paltrak* – według FINSTERBUSCHA i TIELEGO (1987) został skonstruowany na początku XVII wieku w Holandii (*paltraki* doskonale nadawały się do przecierania drewna i dlatego znalazły szerokie zastosowanie również w tartacznictwie). Ten typ wiatraka łączy w sobie cechy konstrukcyjne dwu

poprzednich typów – ma część nieruchomą i obrotową. *Paltrak*, podobnie jak *koźlak*, jest obracany w całości wraz z maszynami podczas nastawiania na kierunek wiatru, jednak w odróżnieniu od *koźlaka* mechanizm obrotu w *paltraku* jest solidniejszy. Górna obracająca się część ma więcej urządzeń i większą masę; jest obracana przez przetaczanie na żeliwnych rolkach po kołowym torze osadzonym na fundamencie. Mechanizm obrotu jest płaski. *Paltrak*, podobnie jak *koźlak*, ma dyszel, zwykle napędzany drewnianym kołowrotem, na który nawija się linę umocowaną do końca dyszla.

Paltraki miały na ogół trzy kondygnacje; układ wnętrza zapożyczony był albo z *koźlaków*, albo z *holendrów*. Przekrój wnętrza *paltraka* przedstawiono na rysunku 3-62 (oznaczono tylko elementy odróżniające ten typ wiatraka od *koźlaków* i *holendrów*).



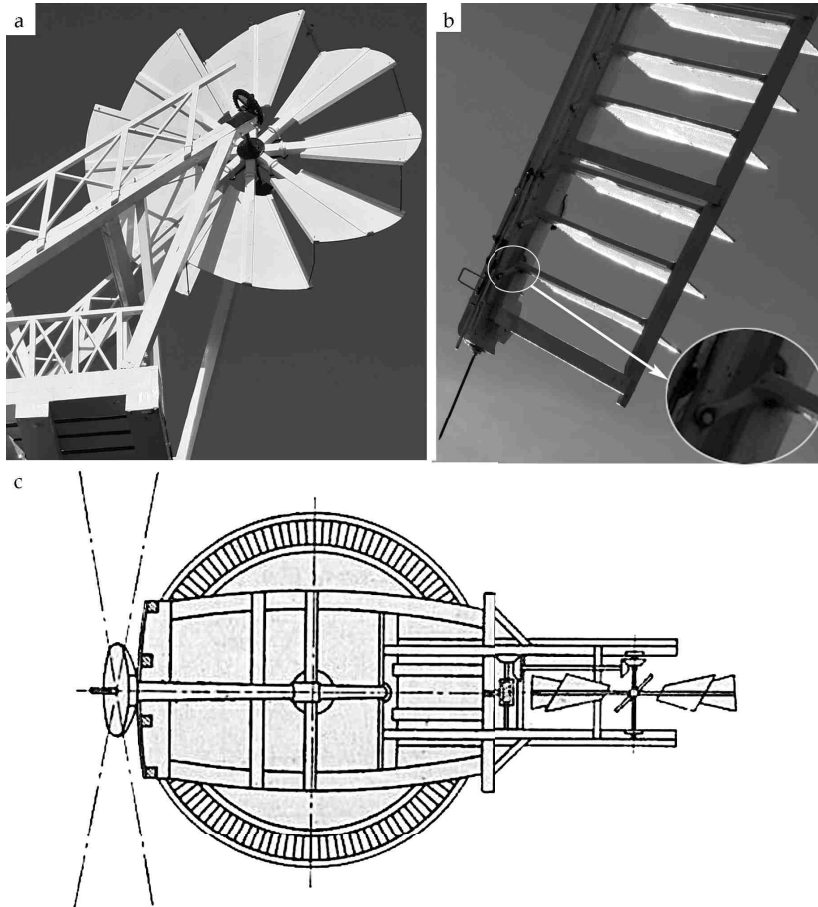
Rys. 3-62. Wiatrak typu *paltrak*

Obsługa i eksploatacja wiatraka

Obsługa i eksploatacja wiatraka napędzającego młyn zbożowy była dość uciążliwa. Klasyczne śmigło wiatraka miało sporo wad, m.in. małą sprawność ogólną, niewielki zakres wykorzystywanych prędkości

wiatru, trudności w regulacji prędkości obrotowej. Niewielka sprawność powodowała konieczność budowy wielkopowierzchniowych i przez to ciężkich skrzydeł zamocowanych na grubym i ciężkim wale. Taki układ o dużej bezwładności uniemożliwiał efektywne wykorzystanie wiatru o niewielkich prędkościach oraz utrudniał regulację hamulcem. Zarówno same skrzydła, jak i część ruchoma wiatraka musiały być ustawiane ręcznie wielokrotnie w ciągu dnia w zależności od zmieniającego się kierunku wiatru. Zapewniało to stałe zajęcie samemu młynarzowi oraz całej jego rodzinie. Powierzchnię czynną śmigła wiatraka regulowano, dodając lub ujmując pewną liczbę drewnianych łopatek do/z każdego z czterech ramion. Nie był to jedyny system sterowania: regulacja prędkości wiatraka odbywała się też za pomocą zwijanych żagli montowanych na końcach skrzydeł lub przez umiejętne operowanie hamulcem. Regulacja prędkości obrotowej za pomocą hamulca bywała dość niebezpieczna – ciepło powstałe wskutek tarcia mogło wzniecić pożar. Z kolei nagle porwy wiatru mogły roztrzaskać skrzydła, powodując znaczne szkody. Zdarzało się, że gdy hamulec zawiódł, a młynarz akurat znajdował się na ramieniu skrzydła i dokonywał regulacji, nagły podmuch wyrzucał go w powietrze! Po skończonej pracy zabezpieczano się młyn przed uszkodzeniami podczas ewentualnej nocnej burzy i wichury przez ściągnięcie wszystkich łopatek i zablokowanie śmigła w stałej pozycji. Dzisiejszym odpowiednikiem średniowiecznej technologii jest sterowany komputerowo system parkowania śmigieł w pozycję *chorągiewki*. Przed 1772 rokiem przy wiatraku musiał ktoś stale dozorować. Konstrukcja śmigieł przez wiele lat była zresztą najsłabszą częścią budowli. Były one narażone na zniszczenia, a częsta wymiana uszkodzonych części stawała się głównym zajęciem pracującego właściciela, stąd też pierwsze udoskonalenia konstrukcyjne zmierzały ku poprawie możliwości regulacyjnych śmigieł, ich sprawności i wytrzymałości. W roku 1772 problem ten rozwiązał Szkot Andrew Meikle (1719-1811), zastępując drewniane łopatki (lub żagle) listewkami, które samoczynnie się otwierały i zamykały (tzw. *spring sails*), podobnie jak żaluzje, zmieniając swoją czynną powierzchnię (rys. 3-63 b). *Kiedy silny podmuch wiatru uderza w skrzydła, pokonuje opór sprężyn i listwy się uchylają, dzięki czemu wiatr swobodnie przepływa między nimi i prędkość obrotów maleje. Gdy wiatr słabnie, sprężyny pokonują nacisk wiatru i listwy się zamykają, wskutek czego wiatr napiera na większą powierzchnię i skrzydła poruszają się z niezmienną prędkością* (WATTS 2006).

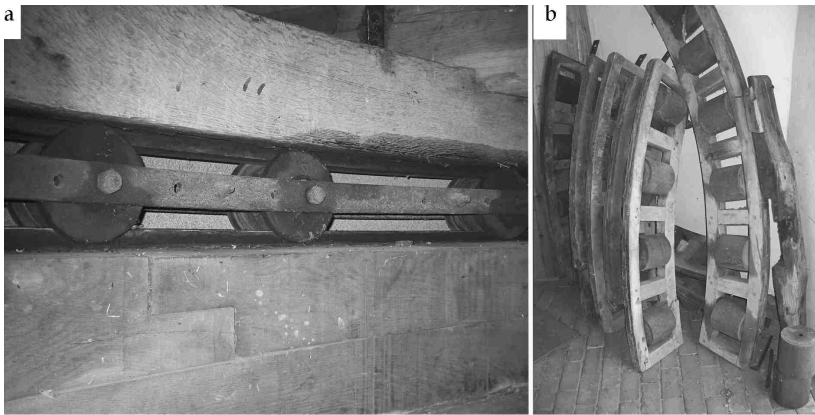
Udoskonalenia wprowadzone przez Meikle'a nie ograniczyły się jedynie do półautomatycznej regulacji prędkości obrotowej śmigła



Rys. 3-63. XIX-wieczne usprawnienia wiatraków: a – wiatrak nastawczy, b – *spring sails*, c – szkic silnika nastawczego – widok z góry (BARANOWICZ 2008)

sprężynowymi żaglami – opracował on również sposób automatycznego pozycjonowania śmigieł względem kierunku wiatru. Na *czapce* wiatraka umieścił mniejsze śmigło napędzające mechanizm jej obrotu (po przeciwległej stronie w stosunku do dużych skrzydeł). Pomocniczy wiatrak nastawczy, pełniąc rolę steru kierunku, za pomocą przekładni zębatych wykonanych z drewna ustawiał automatycznie duże śmigła w stosunku do kierunku wiatru (rys. 3-63 a).

Obracanie *czapki* wiatraka mogło być realizowane ręcznie: (1) za pośrednictwem korby i zestawu przekładni lub (2) za pośrednictwem dyszła sięgającego od *czapki* do podłoża – były to typowe rozwiązania stosowane we wcześniejszych konstrukcjach. W rozwiązaniach nowszych, po udoskonaleniach Meikle'a, *czapka* mogła się też obracać samoczynnie za pomocą dodatkowego wiatraka nastawczego (rys. 3-63 c). Głównym elementem układu nastawiania *czapki* wiatraka była zębata, umieszczona na obwodzie głowicy, koncentrycznie z bieżnią łożyska (rys. 3-64 a). *Czapka* obracała się na żeliwnych rolkach osadzonych w koszyku (rys. 3-64 b), przetaczających się po żeliwnym pierścieniu umocowanym na nieruchomej części wiatraka.



Rys. 3-64. Łożyskowanie korpusu wiatraka: a - fragment łożyska tocznego, b - zdemontowane wałki w koszykach

Do początku XVIII wieku wszystkie silniki wiatrowe budowano jedynie na podstawie doświadczenia i intuicji rzemieślniczej. Sytuację tę zmieniła wydana w 1738 roku przez Daniela Bernoulliego (1700-1782), twórcę kinetycznej teorii gazów, monografia *Hydrodynamique*. Na jej podstawie Anglik John Smeaton (1724-1792) dokonał licznych udoskonaleń konstrukcji śmigieł wiatraków. Istotny skok technologiczny w budowie wiatraków związany z rozwojem techniki nastąpił jednak dopiero w pierwszej połowie XX wieku. Przez osłonięcie tylnej strony skrzydeł odpowiednio załamanymi płaszczyznami i przez zastosowanie zmiennego, regulowanego automatycznie kąta ustawienia żeber osiągnięto dwu-, a nawet trzykrotny wzrost mocy.

Budowa i działanie układu napędowego typowego wiatraka na przykładzie koźlaka

Długość każdego z czterech skrzydeł typowego wiatraka wynosiła 5 m, zatem średnica koła zakreślanego przez skrzydła to 10 m, a jego powierzchnia – blisko 80 m². Szacowana moc maksymalna, przy założonej optymalnej prędkości wiatru 6 m/s, wynosi około 4 kW. Przy takiej mocy koźlak był w stanie w ciągu 120-150 wietrznych dni w roku zebrać 60-90 t ziarna.

Głównym urządzeniem technologicznym wiatraka były żarna zbudowane z dwóch współpracujących kamieni: górnego – obrotowego – tzw. *bieguna* i dolnego – nieruchomego – *leżaka*, zamkniętych w obudowie zwanej *ubą*. Kamienie miały rowki na płaszczyznach roboczych. Odległość między kamieniami można było regulować w zależności od żądanej grubości przemiału.

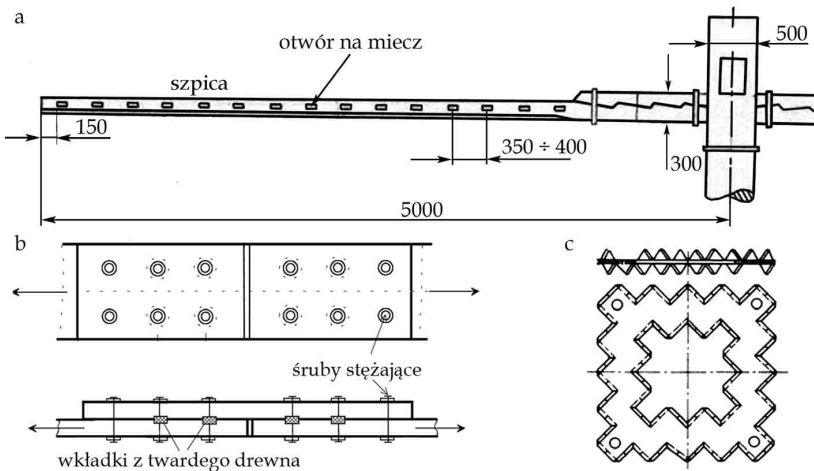
Przywożone do wiatraka zboże wciągano na linie w workach na drugie piętro przez klapę w podłodze balkonu i wsypywano do zbiornika (poruszanego za pomocą trzęsacza), z którego dostawało się pomiędzy kamienie. Pod wpływem siły odśrodkowej, wywołanej ruchem obrotowym bieguna względem nieruchomego leżaka, zboże przesuwało się ku zewnętrznym częściom kamieni. Przy przerobie zboża na razówkę lub śrutę dokonywano jednorazowego przemiału. Przy lepszych gatunkach mąki mlewo po przejściu przez kamienie kierowano na przesiewacz, w którym oddzielano mąkę o potrzebnych właściwościach, otręby zaś kierowano do oddzielnego zbiornika. Sita przesiewacza były wprowadzane w ruch za pomocą przekładni pasowej. Oś sita była nachylona pod kątem 5° do poziomu, dzięki czemu mlewo przesypywało się swobodnie. W zależności od wymagań stawianych przez odbiorcę proces ten mógł być powtarzany wielokrotnie. Gotowy produkt spadał przez rękaw zsykowy na sita umieszczone na pierwszym piętrze, skąd przesypywano go do worków i na linie opuszczano do oczekującego wozu.

Śmigło

Śmigło wiatraka składa się z dwóch tzw. *śmig* przechodzących przez *głowę wału skrzydłowego*. Istnieją dwie odmiany konstrukcyjne osadzania *śmig*: (1) każda *śmiga* składa się z dwóch tzw. *szpic* zamocowanych zakładkowo w miejscu przechodzenia przez *głowę wału skrzydłowego* lub (2) każda *śmiga* składa się z trzech elementów konstrukcyjnych. Pierwszym jest krótka belka, tzw. *bursztyk* (lub *bortnica*), zamocowana centralnie i stanowiąca część nośną. Do niej są przymocowane od strony zewnętrznej dwie

szpice. Na szpicach są umocowane poprzecznie tzw. *miecze* przechodzące przez nie niesymetrycznie; do szpic zaś są przymocowane pod zmiennym kątem krótkie łaty, zwane też *knapkami*. Łącznie z bursztykiem tworzą one szkielet nośny usztywniony listwami na krawędziach wzdłużnych, równoległych do bursztyku. Zmienny kąt przechodzenia mieczy przez bursztyk pozwala uzyskać aerodynamiczny kształt skrzydła wiatraka. Dobrze ukształtowane *śmigła* mogą osiągać moc nawet 10 kW, a całe śmigło może ważyć około 1 t. Śmigło jest umocowane na wale skrzydłowym wystającym z korpusu wiatraka na wysokości 10-15 m.

Ramię skrzydła było wykonane z wysezonowanej kłody sosnowej lub jodłowej długości 6 m lub nieznacznie większej. Średnica cieńszego końca ramienia wynosiła około 150 mm, natomiast grubszego, w miejscu przyszłego osadzenia w wale, przynajmniej 200 mm. Ramiona skrzydeł mogły być wykonane również z krótszych kłód. Przy takim rozwiązaniu para przeciwległych ramion była zbudowana z jednej części środkowej i dwu części skrajnych połączonych klamrami lub śrubami stężającymi. Połączenie mogło być wzmocnione kształtowo za pomocą klamer (rys. 3-65 a), wkładek z twardego drewna (rys. 3-65 b) lub dwustronnych metalowych okuć (rys. 3-65 c). Innym sposobem jest połączenie klamrami spinającymi (rys. 3-69 c, s. 225).



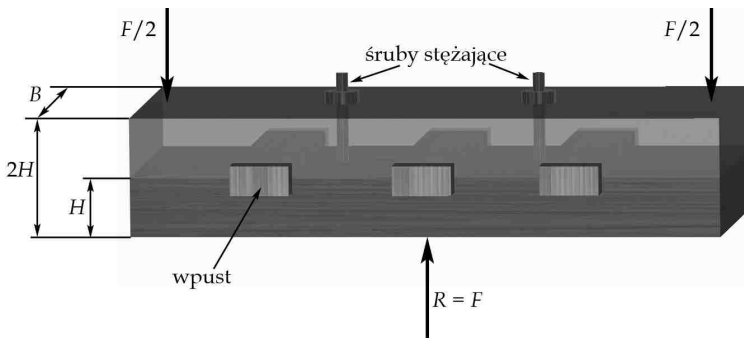
Rys. 3-65. Sposoby zamocowania ramion śmigła wiatraka: a - kształtowe połączenie części ramion z użyciem klamer, b - połączenie za pomocą wkładek i śrub stężających, c - dwustronna metalowa wkładka wzmocniająca połączenia kształtowe

Stosowanie metalowych okuć (rys. 3-65 c) ma swoje uzasadnienie. RYŻYŃSKI (2002) zauważył, że *dwa drewniane pale połączone klockami mają nośność [na zginanie] dwa razy większą niż dwa bale położone na sobie swobodnie*. Przykład zginanego zestawu dwóch belek przedstawia rysunek 3-66. Ich wytrzymałość na zginanie opisuje znana zależność:

$$M_g/W_x \geq k_g$$

gdzie:

M_g - moment gnący,
 W_x - wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie,
 k_g - dopuszczalne naprężenia zginające.



Rys. 3-66. Połączone konstrukcyjnie belki (górna narysowana jako transparentna)

Wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie W_x dla przekroju prostokątnego wyraża się zależnością: $W_x = (H^2 \cdot B)/6$, ten sam wskaźnik dla zestawu dwóch niepołączonych konstrukcyjnie belek wynosi $2W_x$, a dla połączonych klockami belek:

$$W'_x = \frac{B(2H)^2}{6}$$

stąd łatwo zauważyć, że:

$$\frac{W'_x}{2W_x} = \frac{\frac{B(2H)^2}{6}}{2 \cdot \frac{BH^2}{6}} = \frac{(2H)^2}{2H^2} = 2$$

Wiatraki ze skrzydłami o zmiennym kącie ustawienia żeber znacznie lepiej wykorzystują wiatr niż skrzydła o stałym kącie ustawienia. Celem uzyskania większej sprawności poszczególne otwory w ramieniu, w którym osadzano żebra, były wykonywane ukośnie. Kąty zamocowania poszczególnych żeber zależały od odległości żebra od osi obrotu. Przykładowe wartości dla wiatraka o średnicy śmigła 10 m podano w tabeli 27.

Tabela 27

Kąty ustawienia łopatek w skrzydłach wiatraka o średnicy śmigła 10 m (BARANOWICZ 2008)

Nr kolejny żebra	Odległość żebra od osi obrotu [m]	Kąt zaklinowania	Grubość ramienia [mm]
1	1,25	25°00'	175
2	2,0	20°54'	169
3	2,50	18°27'	165
4	3,0	16°26'	161
5	3,50	14°40'	159
6	4,0	13°28'	155
7	4,50	12°15'	151
8	5,0	11°24'	147

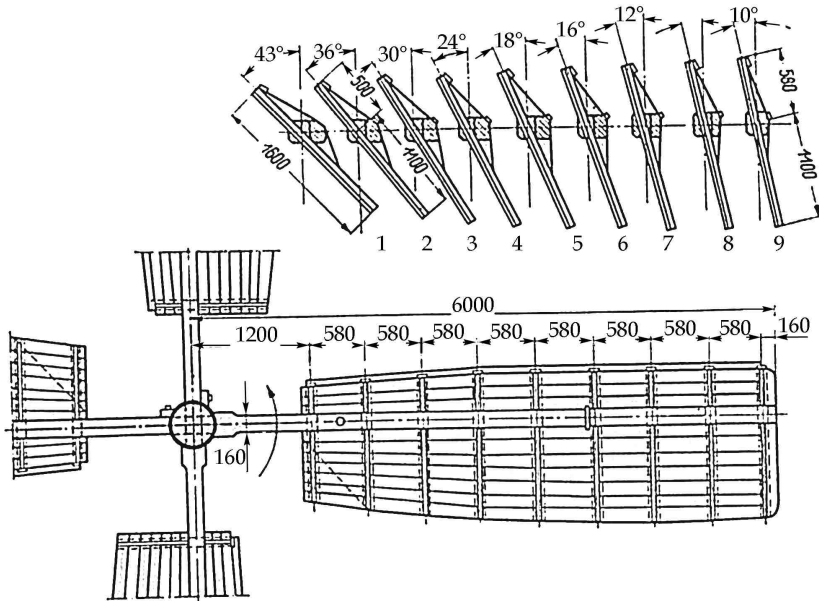
Nieco inne wartości zawiera instrukcja budowy rosyjskiego wiatraka typu WIME (tab. 28, rys. 3-67).

Tabela 28

Kąty ustawienia łopatek w skrzydłach rosyjskiego wiatraka WIME (BARANOWICZ 2008)

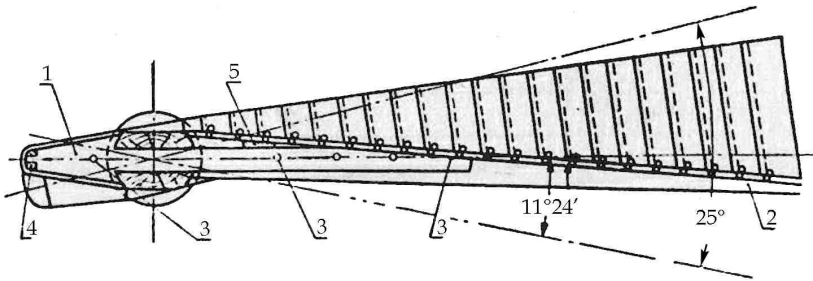
Średnica wirnika [m]	Odstęp między łopatkami [mm]	Kąty umocowania żeber [°]								
		numer żebra, licząc od wału								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	430	43	35	28	22	17	13	11	10	-
10	480	43	36	29	23	18	15	12	11	10
12	580	43	36	30	24	18	15	12	11	10

Do prawidłowego wiercenia otworów w ramionach używano wzorników z zaznaczonymi wartościami właściwych kątów. Po wywierceniu otwory powiększano do potrzebnych wymiarów dłutem.



Rys. 3-67. Zmienne kąty łopatek poprawiające sprawność wiatraka (na podstawie BARANOWICZA 2008)

Każde żebro skrzydłowe było zbudowane zazwyczaj z dwóch części o grubości 18 mm wykonanych z desek sosnowych lub jodłowych (rys. 3-68). Obie te części osadzano w otworze w ramieniu skrzydłowym, część (1) z jednej strony ramienia, a część (2) z drugiej, i łączono jesionowymi lub dębowymi kołkami (3) o średnicy 12 mm rozmieszczonymi w odległościach około 112 mm. Czoła zamocowanych w ten sposób żebier łączono zaokrąglonymi listwami (4) (mogły być one wzmocnione blachą). Podobnie łączono poszczególne żebra z drugiej strony ramienia listwą (5). Do tak wykonanego szkieletu skrzydła odpowiednimi gwoździami przybijano poszycie stałe skrzydła, wykonane z deszczulek sosnowych lub jodłowych o grubości 7 mm. Poszycie zdejmowane, umieszczone w skrajnych częściach skrzydła, było wykonane z powiązanych ze sobą deszczulek, które wsuwano między poszczególne żebra i odpowiednio



Rys. 3-68. Żebro skrzydła wiatraka osadzone w ramieniu (opis w tekście)
(na podstawie BARANOWICZA 2008)

zabezpieczano przed wysunięciem. Podczas budowy skrzydeł zwracano uwagę na możliwie jednakowe wykonanie, tak aby uzyskać ich jednaki ciężar, a przez to dobre wyważenie całego koła wiatrowego. Ciężar pojedynczego skrzydła wynosił około 115 kg.

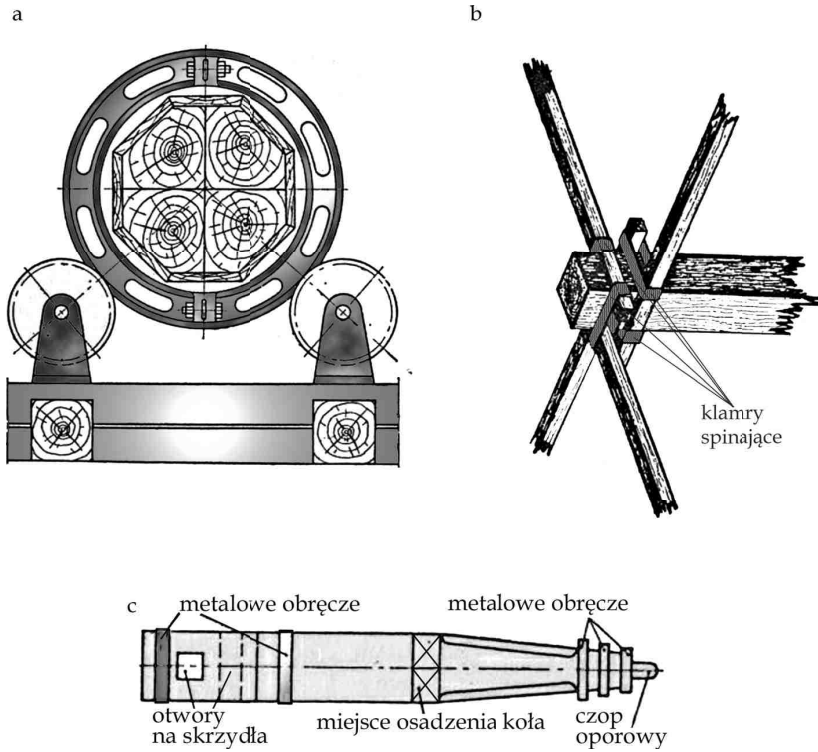
Wał główny (wał skrzydłowy) wiatraka

Wał główny wiatraka, tzw. *wał skrzydłowy*, przedstawiony na rysunku 3-69, wykonywano z lekkiego drewna (sosny lub jodły). W przypadku wiatraka o średnicy śmigła 10 m wał miał zazwyczaj średnicę 500 mm. Mógł być wykonany z pojedynczej kłody lub też złożony z czterech cieńszych kłód ściśle do siebie dopasowanych i ściągniętych stalowymi obręczami nakładanymi na gorąco (rys. 3-69 a, c). Wał wykonany z jednej kłody był zwykle cieńszy od wału składanego, a żeby nie osłabiać go otworami do osadzenia skrzydeł, mocowano je parami z użyciem klamer (rys. 3-69 c). Drewniany wał skrzydłowy wraz z okuciami mógł ważyć nawet do 1,5 t. Jego grubsza część wystawała poza *ścianę przednią*¹⁸¹. Wał był w dwóch miejscach podparty łożyskami: od strony śmigła stosowano łożyskowanie na rolkach (opartych na *oczepie*¹⁸²), natomiast od strony koła palczastego znajdowało się oporowe łożysko ślizgowe (które tworzył stalowy czop wału i drewniana panewka, tzw. *wolniczka*¹⁸³). Oś wału była zwykle nachylona do poziomu pod kątem 10-15°. Na wale skrzydłowym

¹⁸¹ *Ściana przednia* (tzw. *ściana wietrzna*) – ściana, na której mocowano śmigło wiatraka (przeciwległa ściana, ze schodami i wejściem, to *ściana tylna*).

¹⁸² *Oczep* – pozioma belka wiążąca końce słupów drewnianej ściany wietrznej.

¹⁸³ *Wolniczka* – krótka belka z twardego drewna (np. grabowego), odporne na ścieranie.



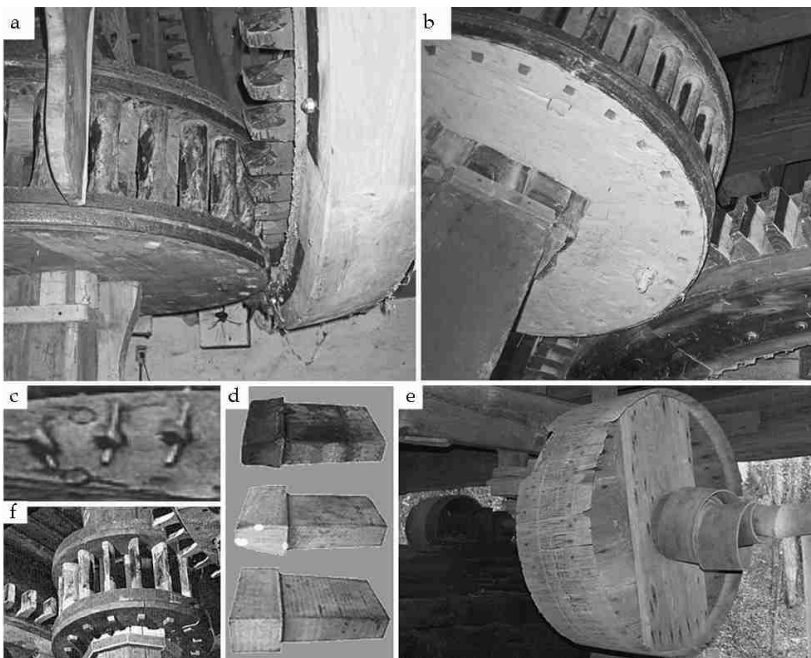
Rys. 3-69. Wał skrzydłowy wiatraka: a – łożyskowanie wału składanego z czterech kłód, b – sposób mocowania skrzydeł z użyciem klamer spinających, c – konstrukcja wału z otworami na skrzydła

były osadzone koła przekazujące napęd na żarna oraz wciągarkę. W wale znajdowały się prostokątne otwory przelotowe do mocowania skrzydeł oraz obrobione „na kwadrat” miejsce osadzenia dużego koła palczastego o zębach wykonanych najczęściej z twardego drewna grabu. Duże koło palczaste przekazywało napęd na urządzenia młynarskie.

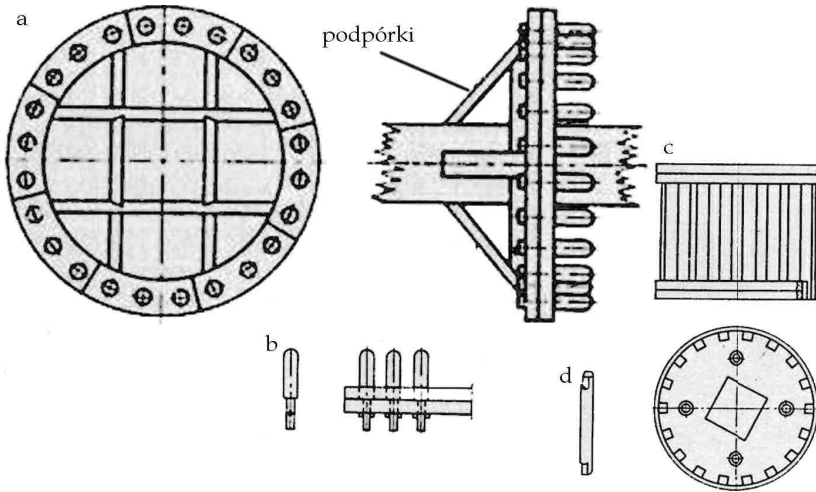
Przekładnia główna

Wiatr, jako siła napędowa, napierając na skrzydła, wprowadzał w ruch drewniany główny wał napędowy, na którym było osadzone koło palczaste. Kamienie młyńskie były napędzane przez kątową, przyspieszającą przekładnię główną, którą stanowił układ: koło palczaste – cewy. Jej szczegóły konstrukcyjne mogły się różnić w zależności od regionu.

Przykładowa budowa przekładni głównej (rys. 3-70) mogła wyglądać następująco: obręcz koła palczastego o średnicy 1,5 m i grubości 0,18 m zbudowana była z 16 wycinków koła wykonanych z sosnowych desek. Wycinki były zestawione w dwa ośmioczęściowe pierścienie o grubości 90 mm każdy. Osiem wycinków w każdym pierścieniu było względem siebie tak ustawione, że ich końce wypadały w środkach wycinków drugiego pierścienia. Połączenia były wykonane z udziałem dębowych kółków pasowanych na wcisk i zabezpieczonych przed wysunięciem zawleczkami. Obręcz koła była wyposażona w ramiona, umożliwiające osadzenie jej na wale skrzydłowym. Koło czynne (palczaste) (rys. 3-71 a) miało zwykle około 70-90 zębów wykonanych z twardego drewna grabu (rys. 3-71 b), przenoszących napęd na koło bierne (*cewy* – rys. 3-71 c) o 6-20 zębach. Kamienie młyńskie obracały się zatem kilkakrotnie szybciej od śmigła wiatraka.



Rys. 3-70. Rozwiązania przekładni głównej: a – przekładnia kąтова, b – przekładnia prosta, c – sposób mocowania zębów (widok od tyłu), d – drewniane zęby (drewno jabłoni, wiśni lub grabu), e – przekładnia pasowa na pas płaski, f – *cewy* z możliwością zazębienia przemiennie z dwoma kołami



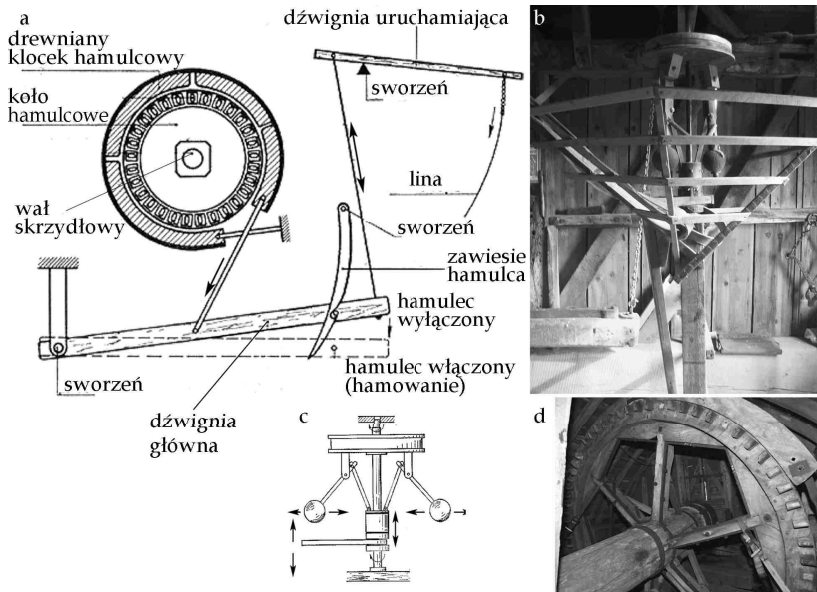
Rys. 3-71. Koła przekładni głównej: a - koło palczaste, b - palec koła, c - cewy, d - cewka

Palce, osadzone w piaście koła palczastego, były zazwyczaj wysunięte z niej na długość równą 1,5 swojej grubości, a przed całkowitym wysunięciem z otworów piasty zabezpieczone były klinami. Wykonane w ten sposób koło osadzone na wale skrzydłowym zazwyczaj było zaopatrzone w podpórki (rys. 3-71 a).

Małe koło bierne przekładni (*cewy*) składało się z dwóch drewnianych pierścieni połączonych drewnianymi kołkami (*cewkami*) o odstępach pomiędzy nimi oraz długości zapewniającymi możliwość współpracy z zębami koła palczastego. Podobnie jak w przypadku koła palczastego, każdy z dwóch pierścieni *cew* był zrobiony z dwu drewnianych tarcz zestawionych każda z dwu połówek połączonych ze sobą klejem kostnym, kołkami, a czasem również z użyciem metalowych okuć.

Metalowa oś *cew* - *socha* - wprowadzała w ruch obrotowy kamień młyński. Koło palczaste było wyposażone w hamulec klockowy - tzw. *bicycho* (rys. 3-72 a, d), które działało na zasadzie docisku i umożliwiało kontrolę prędkości obrotowej. Do automatycznej regulacji prędkości obrotowej wału stosowano regulatory odśrodkowe (rys. 3-72 b, c), kojarzone powszechnie z regulatorami silników parowych.

Wszystkie zachowane wiatraki można uznać za symbole 700-letniej tradycji polskiego młynarstwa. Niestety, ich stan obecny jest w większości krytyczny. Pozbawiane właścicieli czy też opiekunów prawnych



Rys. 3-72. Regulacja prędkości obrotowej: a - zasada działania hamulca klockowego, b - regulator odśrodkowy (młyn w Ede w Holandii zbudowany w 1595 roku, regulator pochodzi z późniejszego okresu), c - zasada działania regulatora, d - hamulec klockowy wału skrzydłowego (młyn Lacey Green, Buckinghamshire w Anglii, zbudowany około 1650 roku)

niszczają, odchodzą w zapomnienie. Wiatraki nie służyły tylko i wyłącznie do mielenia zboża. Po zainstalowaniu odpowiednich urządzeń za ich pomocą rozdrabniano także różne inne surowce (cukier, gorczycę, kakao). Ich siła napędowa była używana do przepompowywania wody (odwadniania terenu), a sporadycznie w tartakach i papierniach.

Współczesne kompozytowe koła zębate o korpusie polimerowym z osadzonymi w nim metalowymi zębami są wzorowane na kołach drewnianych. Koła kompozytowe, w porównaniu z metalowymi, charakteryzują się: cichobieżnością, lekkością, odpornością na zużycie i uderzenia, ponieważ sprężystość korpusu zmniejsza naciski powierzchniowe.

3.4.3. Koła deptakowe i kieraty

Starożytne i średniowieczne maszyny technologiczne (młyny, dźwigi, pompy itp.) były poruszane siłą wiatru (wiatraki bębnowe, karuzelowe,

śmigłowe), wody (koła i turbiny wodne) lub mięśni ludzi i zwierząt. *Silniki żywe*, czyli poruszane siłą mięśni koła deptakowe i kieraty, popularne w starożytności i we wczesnym średniowieczu, u schyłku średniowiecza straciły nieco na popularności. Używano ich głównie jako urządzeń pomocniczych w pracy dorywczej, ponieważ nie pozwalały na osiągnięcie i utrzymanie w dostatecznie długim czasie odpowiedniej mocy napędu. W czasach oświecenia urządzenia tego typu były już uważane za przestarzałe; świadczy o tym uwaga Stanisława Solskiego:

Na pewnym miejscu zawiódł znacznie jeden [młynarz] pana wyciągnąwszy go na stawianie młyna, o którym twierdził, że w nim zdoła w metciu para ludzi w kole [deptakowym] chodzących. Aż gdy młyn postawił i kamienie osadził, a mlewo ni uszło, młynarz został w kłopotcie, a pan nabawił się konfuzji. Wiedzieć tedy trzeba, że chodzenie w kole przydać się może do ciągnięcia wody, nie do młynów, gdyż nie zdoła obracaniu kamienia mielącego (SOLSKI 1690, Księga I, Zabawa II, Nauka 20).

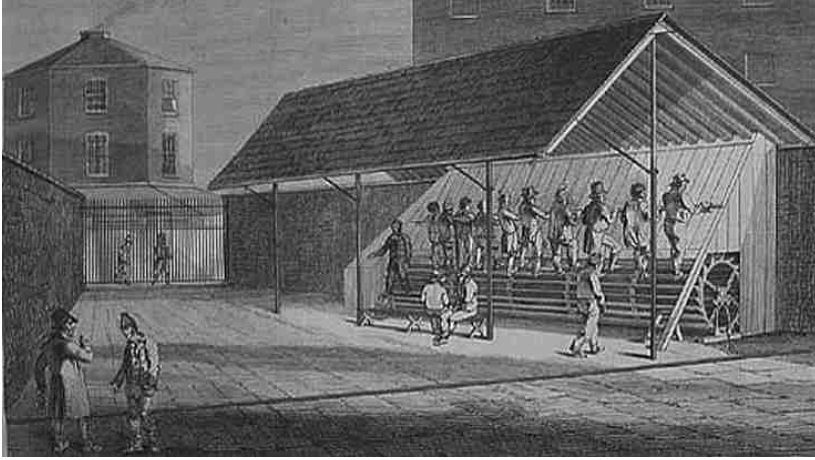
A o młynach napędzanych kieratem, czyli o młynach, w których *woły na kole chodzą*, ten sam autor pisze:

Młyna takiego nie widziałem nigdy, nawet jego abrysu między abrysami różnych młynów. Mam go za podejrzaną za jego wczesność [tu: przestarzałość]. Ponieważ gdyby sposobniejszy był nad insze, niepochybnie by go po innych miejscach używano i indzienijerowie, którzy najmniejsze wynalazki dowcipu ludzkiego drukują, jego by nie opuścili, przynajmniej abrysu (SOLSKI 1690, Księga I, Zabawa II, Nauka 18).

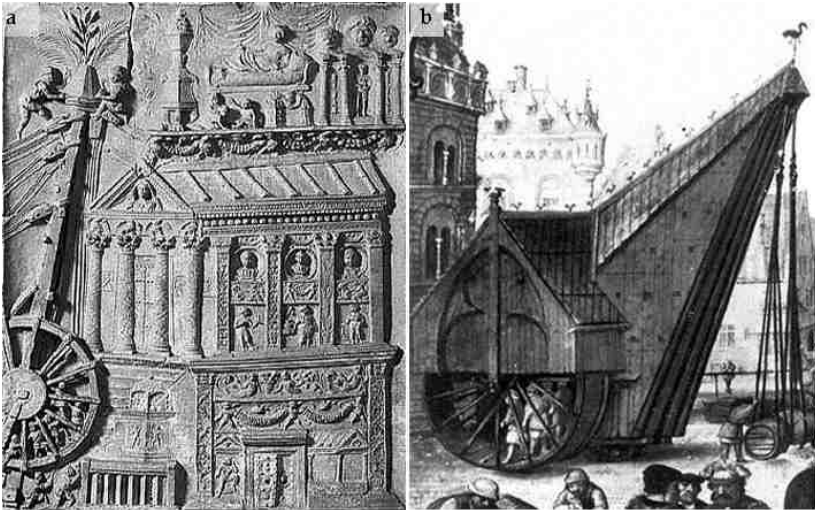
O pomocniczej jedynie roli urządzeń kieratowych w XVII wieku może świadczyć informacja, że na dziedzińcu zamkowym zamku książęcego w Sulechowie, mając na uwadze zabezpieczenie się przed ewentualną klęską głodu grożącego w przypadku długotrwałego oblężenia, zbudowano rezerwowy młyn zbożowy napędzany końskim kieratem.

Koła deptakowe były stosowane nawet jeszcze w XIX wieku. Tego typu urządzenie (rys. 3-73) znajdowało się w więzieniu w Brixton w Anglii; więźniowie przez 10 min chodzili na kole, a przez kolejne 5 odpoczywali, następnie powtarzali cykl. Koło deptakowe początkowo służyło do napędu młyna, później było stosowane jedynie jako forma kary, w połowie XIX wieku zostało zdemontowane.

Rysunek 3-74 przedstawia zastosowanie koła deptakowego w dźwigach.



Rys. 3-73. Koło deptakowe w więzieniu *Brixton House of Correction* w Londynie (1821) (LONDON GUILDHALL LIBRARY 2008)



Rys. 3-74. Koła deptakowe do napędu dźwigów: a - dźwig rzymski - nagrobna płaskorzeźba z Kapui (I wiek p.n.e.), b - średniowieczny portowy żuraw holenderski (ok. 1500 roku, rys. z 1620 roku)

Koła deptakowe nie zawsze były napędzane przez ludzi; przykład koła deptakowego napędzanego przez woły przedstawia rysunek 3-75.



Rys. 3-75. Koło deptakowe napędzające młyn zbożowy według Vittorio Zonki (ZONCA 1607)

Samuel Bogusław Linde wyjaśnia, że kierat, pochodzący od słowa niemieckiego *Kehrrad*, oznacza: *windę, którą co z dołu wyciągają i wyjaśnia dalej: koło wielkie poziome z cewami, który liną wielkie ciężary z głębizny wyprawdza. [...] wał kołem obłożony iako w młynach do ciągnięcia i ruszenia ciężarów. [...] w koło to wchodzi chłopy a depcąc wewnątrz w jego cewach lub szczęblach, obracają je* (LINDE 1807-1814, t. I, cz. 2, s. 994). Bardziej szczegółowa definicja słowa *kierat* znajduje się w *Słowniku języka polskiego* pod redakcją Jana Karłowicza, Adama Kryńskiego i Władysława Niedźwiedzkiego, gdzie kierat związany jest znaczeniowo z kołem palczastym: *poziomo na stojącym wale osadzonym i obracany zwykle przez konie, niekiedy przez ludzi, służące do nadawania ruchu jakiejś maszynie (np. we młynach), lub do windowania zgłębi ciężarów (np. w kopalniach), kołowrót konny, winda z wałem pionowym, mającym ramiona dla ludzi lub koni obracających* (SŁOWNIK JĘZYKA POLSKIEGO... 1900, s. 327).

Najstarsze znane wzmianki o kieratach, czyli wykorzystaniu siły zwierzęcej do celów innych niż pociągowe, pochodzą z V wieku p.n.e. W Lawronie w Grecji zastosowano młyn poruszany przez osły do rozkruszania rudy wydobywanej w miejscowych kopalniach srebra. Pomimo że jest to pierwszy przykład wykorzystania siły zwierzęcia do napędu urządzenia technologicznego, przez kolejne 1500 lat, aż do X wieku, nie potrafiono

w pełni wykorzystać siły zwierząt pociągowych z powodów niedoskonalości stosowanego zaprzęgu. Okres powszechniejszego wykorzystania młynów kieratowych przypada na III wiek p.n.e. Najczęściej wykorzystywano kieraty do napędu młynów klepsydrowych, których część górna, poruszana za pośrednictwem krótkiego poziomego drąga przez przemieszczające się po okręgu zwierzę, obracała się na czopie. Typowy kierat, stosowany do XIX wieku w kopalniach, a do XX wieku w rolnictwie, został skonstruowany w średniowieczu – zwierzęta zaprzęgano do końców kilkumetrowych drewnianych dłuźyc¹⁸⁴; dzięki temu zwierzęta pociągowe przemieszczały się po okręgu o średnicy około 7 m i były znacznie sprawniejsze od „kołujących” prawie w miejscu zwierząt starożytnych.

SOLSKI (1690) w Księdze I (Zabawa II, Nauka 1) zatytułowanej *Przestrogi powszechnie, a koniecznie potrzebne do używania bydła we wszystkich młynach, które konie albo woły obracają* zawarł wiele praktycznych rad dla użytkowników kieratów:

1. *Bydło obierać na obracanie koła jako najstapistsze [ociężałe].*
2. *Do jednego dyszla nigdy nie wiązać pary jednej koni albo wołów, ale pojedynkiem, dlatego że koń dalszy od wału więcej kroków czynić musi aniżeli drugi. Na przykład: jeżeli cyrkułu konia bliższego, w którym chodzi, dyjamer [średnica] jest łokci 12 [~7,1 m], a koń stąpa po 3 ćwierci jednym krokiem, musi czynić kroków 51; koń zaś dalszy, że dyjamer tego chodzenia musi być 3 łokciami dłuższy, uczyni kroków 60 i półtrzecia [62,5], to jest półdwanasta [11,5] więcej.*
3. *Bydło u dyszłów wiązać jako najkrócej przy samym orczyku i przestrzeżać, żeby bydło chodziło krzyżową linią od dyszla, gdyż im się bardziej zbliża ku wałowi, tym sobie więcej ciężaru przyczynia, dyszel i wał wciągając.*
4. *Orczyki na samym końcu dyszla niech będą przyprawione dla zakładania postronków od koni.*
5. *Jarzmo wołowe niech będzie do samego dyszla przyprawione.*

Najstarsza wzmianka o zastosowaniu koła kieratowego w Polsce pochodzi z 1323 roku ze Wschowy. W XV wieku tego typu drewniane silniki były powszechnie stosowane do napędu pomp oraz urządzeń dźwigowych w górnictwie. Na przełomie XIV i XV wieku górnicze roboty eksploatacyjne i transport podziemny odbywały się jeszcze sposobem

¹⁸⁴ W opisach SOLSKIEGO (1690) oraz w oszacowaniach Watta z 1782 roku dotyczących mocy ciąglej konia pociągowego (SHELTON KIRBY 1990) dłużyce miały długość trochę ponad 3,5 m.

ręcznym. Urobek z szybów wyciągano linami za pomocą *haspli* (*kabestanów*) poruszanych siłą mięśni. Około roku 1400 w największej polskiej kopalni soli – w Wieliczce – zastąpiono *hasple* kołami deptakowymi. Były to koła drabinowe osadzone na wale linowym, obracane pod ciężarem deptaczy stąpających po szczeblach. Następnym etapem rozwoju urządzeń transportowych był kierat konny, wprowadzony do kopalni w połowie XV wieku. Postęp techniczny, przejawiający się mechanizacją, wpłynął na zwiększenie produkcji, a zarazem zysków płynących z wielickiej kopalni.

Interesujące są zagadnienia energetyczne napędu deptakowego i kieratowego, a dotyczące tzw. *dzielności źródła pracy*:

W życiu codziennym zależy nie tylko na ilości pracy, ale także w jakim czasie została dokonana.

Zdolność zatem silnika (motoru) względnie jakiegokolwiek źródła pracy lub energii do wykonania w tym samym czasie stosunkowo większej ilości pracy jest dzielnością [...] (SKWARCZYŃSKI 1925, s. 29).

Jak pisze WIŚLICKI (1996), jednym z podstawowych osiągnięć technicznych od okresu średniowiecza do rewolucji przemysłowej było stosowanie na szeroką skalę, zgodnie z ówczesnym stanem techniki, energii ze źródeł odtwarzalnych, tj. energii wodnej i wiatru, oraz energii *silników żywych*, czyli ludzi i zwierząt. Jak wspomniano wcześniej (s. 123), powołując się na HARRISONA (1939), moc ciąгла generowana przez jednego człowieka wynosi około 1/10 mocy ciąglą konia – czyli około 0,1 KM (73,5 W). WIŚLICKI (1996) szacuje moc ciąglą człowieka na 0,10-0,16 KM, podobne wartości podaje KENNETH MAJOR (1985), uzupełniając, że moc ciąglą źle odżywianego więźnia lub jeńca wynosi około 60% mocy człowieka wolnego.

Silnikami żywymi, oprócz ludzi i koni, były także woły, muły, a czasem osły. Konie są jednymi z najstarszych zwierząt domowych. W czasach antycznych uprząż konia tworzyły pasy obejmujące jego szyję, co utrudniało oddychanie i ograniczało siłę pociągową zwierzęcia. Znaczącym usprawnieniem było zastosowanie w Europie na przełomie IX i X wieku chomąta, opierającego się na łopatkach konia. Koń mógł swobodnie oddychać i rozwijać znacznie większą moc w dłuższym czasie. Chomąto, chociaż wykonane głównie ze skóry, miało również elementy drewniane; kleszczyny (czyli obejmę) były wykonywane z drewna¹⁸⁵.

¹⁸⁵ Uprząż, czyli główny element zaprzęgu, funkcjonalnie składa się z części: ciągnących, wstrzymujących, kierujących; istnieją dwa rodzaje uprzęży: chomątowa

Tabela 29

Orientacyjne osiągi silników

Rodzaj silnika	Praca krótkotrwała			Praca długotrwała				
	maksymalna siła [N]	maksymalna prędkość bez obciążenia [m/s]	maksymalna moc [kW]	prostoliniowa pociągowa				obrotowa (kierat lub koło deptakowe), moc [kW]
				siła [kG]	prędkość z obciążeniem [km/h]	moc [kW]	liczba godzin na dobę	
Człowiek (70 kg)	600	20 (36)	0,3 (0,8)	80 ^d	2,5-3 ^d	0,16 ^a	8	0,06 ^d -0,10 ^b
Koń (400 kg)	2 400	60 (72)	2,5	530 ^d	5-6 ^c	0,93 ^a	5-6 ^c	0,50 ^d -0,74 ^b
Wół (450 kg)	2 800	40	2,7	530 ^d	2,5 ^d	0,48 ^a	6 ^d	0,45 ^d -0,70 ^b
Muł (300 kg)	2 000	45	2,0	270 ^d	5-6 ^c	0,55 ^a	7-8 ^c	0,40 ^d -0,50 ^b
Osioł (150 kg)	1 200	45	1,2	140 ^d	3-4 ^c	0,32 ^a	5-6 ^c	0,15 ^d -0,25 ^b
Wiatrak	-	-	-	-	-	-	-	3,7-7,4 ^b
Koło wodne	-	-	-	-	-	-	-	1,8-11,0 ^b

^aKENNETH MAJOR (1985), ^bWIŚLICKI (1996), ^cSIMS i IN. (2003), ^dLOWET (2004).

Orientacyjne osiągi silników: żywych (ludzie i zwierzęta), wiatrowego (klasyczny wiatrak śmigłowy) i wodnego (klasyczne koło wodne) zawiera tabela 29. Liczby w nawiasach dotyczą wyników rekordowych, możliwych do uzyskania w krótkim czasie.

Przyjmuje się, że dla uzyskania z silnika żywego mocy ciągłej w granicach 0,74 kW (1 KM) potrzeba 570-850 kg żywej wagi¹⁸⁶ (współczynnik

i szorowa (tzw. półszorok); w uprzęży chomątowej główną częścią jest chomąto (z pasami lub postronkami pociągowymi), w uprzęży szorowej - napierśnik. W Polsce były używane chomąta: krakowskie (najbardziej rozpowszechnione - kleszczyzny drewniane), śląskie (przystosowane do pojazdu na wysokich kołach), podlaskie (o ruchomych dolnych częściach kleszczyzn, stosowane najczęściej z dugą - kleszczyzny i duga drewniane) i angielskie (kleszczyzny metalowe) (SZEWCZYK 1973).

¹⁸⁶ SKWARCZYŃSKI (1925) podaje, że do uzyskania 1 KM potrzeba około 720 kg żywej wagi.

mocy do wagi [W/kg] według LOWETA (2004) wynosi: dla człowieka – 0,86, konia – 1,25, wołu – 1, muła, osła i wielbłąda – 1,33, bawołu – 0,95). Klasyczna jednostka mocy, brytyjski koń parowy (BHP), którego wartość wynosi 98,6% zdefiniowanego w Niemczech w XIX stuleciu metrycznego konia mechanicznego (KM), został zaproponowany przez Jamesa Watta. Watt zmierzył, że przeciętny koń w pracy ciągłej w kopalni napędzający kierat o promieniu 12 stóp (3,66 m), obciążony siłą 180 funtów (800,68 N), obróci go 144 razy na godzinę (2,4 razy na minutę). Moc takiego konia wynosi 32,572 ft·lbf/min (po zaokrągleniu 33 ft·lbf/min), co zostało przyjęte jako 1 BHP. Przedstawianie osiągnięć swoich maszyn parowych w koniach mechanicznych miało dla producentów cel marketingowy. Pierwsza maszyna Watta (pompa kopalniana) miała moc 4 BHP, czyli mogła zastąpić pracę czterech koni.

Analizując tabelę 29, warto pamiętać, że waga konia wynosi 300-600 kg, wołu – 400-900 kg, muła – 200-350 kg, osła – 120-200 kg.

O prędkości pracy silników żywych Skwarczyński pisze:

W każdym rodzaju pracy istnieje pewna prędkość [...] i czas trwania [...], które silnikowi (motorowi) żywemu najwięcej odpowiadają i pozwalają na rozwinięcie największej siły normalnej P (w kilogramach). W tych warunkach będzie oczywiście także i dzielność, czyli skutek pracy silnika najkorzystniejszy [...] (SKWARCZYŃSKI 1925, s. 31).

O dzielności pracy ludzi ten sam autor pisze:

Na podstawie doświadczeń co do przeróżniejszych zajęć, wykonywanych przez średnio silnych, 65 do 80 kg ważących robotników w ciągu około 10 godzin rzeczywistych roboczych [...] dzielność pracy ludzkiej: $E = 1/21 HP^{187}$. [...] Przerwy z powodu znużenia wynoszą średnio 35% istotnego czasu roboczego (SKWARCZYŃSKI 1925, s. 31).

Tak więc długotrwała, 10-godzinna napędowa wydajność energetyczna brutto (wraz z przerwami na odpoczynek) 21 ludzi jest równoważna wydajności energetycznej jednego konia mechanicznego generowanego przez silnik pracujący w tym samym czasie bez przerw.

¹⁸⁷ HP u Skwarczyńskiego oznacza Brytyjskiego Konia Parowego (BHP).

3.5. Wybrane maszyny robocze z drewna

Każda wystarczająco zaawansowana technologia jest nieodróżnialna od magii
(Arthur C. Clarke, ur. 1917)¹⁸⁸

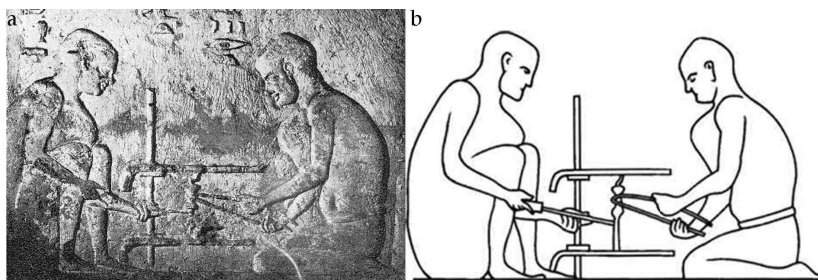
3.5.1. Tokarki

Obrabiarki są rodzajem maszyn przeznaczonych do fizycznej realizacji technologii (zmiany kształtu, wymiarów i struktury geometrycznej powierzchni materiałów). Zajmują szczególne miejsce w historii techniki. Od początków cywilizacji każda nowatorska obrabiarka zwiększała potencjał produkcyjny i nierzadko przyczyniała się do powstawania nowych możliwości wytwarzania przedmiotów o cechach niemożliwych do uzyskania za pomocą wcześniej stosowanych metod.

Tokarka jest rodzajem obrabiarki przeznaczonej do obróbki skrawaniem powierzchni obrotowych przedmiotów, jej cechą charakterystyczną jest realizacja tego procesu przez wzdłużny i poprzeczny posuwowy ruch narzędzia oraz obrotowy ruch główny przedmiotu obrabianego. Za pomocą tokarki można obrabiać zewnętrzne i wewnętrzne powierzchnie obrotowe – toczyć i gwintować oraz wykonywać otwory (wiercić lub wytaczać). Typowym narzędziem tokarskim jest *nóż tokarski*, początkowo trzymany w ręku, później mocowany w suporcie. Pierwowzorami tokarki były najprawdopodobniej koło garncarskie oraz urządzenie do rozpalać ognia z napędem sznurowym, z którego około 6000 lat temu powstał rodzaj wiertarki z napędem smyczkowym (z wiertłem krzemieniowym) do wiercenia otworów w drewnie.

Tradycja przypisuje wynalezienie tokarki Teodorosowi z Samos (pierwsza połowa VI wieku p.n.e.), który miał opracować nową technikę produkcji trzonów kolumn właśnie przez toczenie. Nowa maszyna posłużyła do trzeciej przebudowy świątyni Hery (*herajonu*) w latach 570-550 p.n.e. Niestety, nie zachował się jeden z najstarszych traktatów o architekturze autorstwa Teodorosa, a pierwsza historycznie tokarka znana jest jedynie ze wzmianek innych autorów. Najstarsze znane przedstawienie tokarki to egipski relief z 300 roku p.n.e. Na rysunku 3-76 przedstawiono

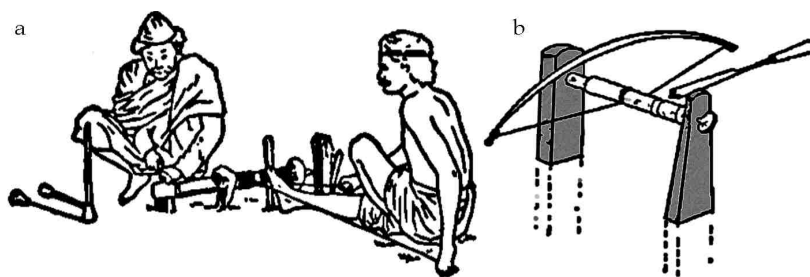
¹⁸⁸ Tłumaczenie M.S. Najślynniejsze z trzech praw futurologicznych znanego wynalazcy, filozofa i pisarza w oryginale brzmi następująco: *Any sufficiently advanced technology is indistinguishable from magic* (CLARKE 1962).



Rys. 3-76. Najstarsze przedstawienie tokarki, Egipt, 300 rok p.n.e. (NICHOLSON i SHAW 2000): a - relief, b - rysunek sporządzony na podstawie reliefu

taką, napędzaną sznurem, egipską tokarkę o pionowej osi obrotu, przeznaczoną do wykonywania nóg krzeseł.

W Chinach, Indiach oraz krajach basenu Morza Śródziemnego przez całą starożytność i średniowiecze były stosowane tokarki z różnego rodzaju napędem sznurowym. Indyjską tokarkę z takim napędem przedstawia rysunek 3-77 a, a ulepszoną konstrukcją rzymską – rysunek 3-77 b.

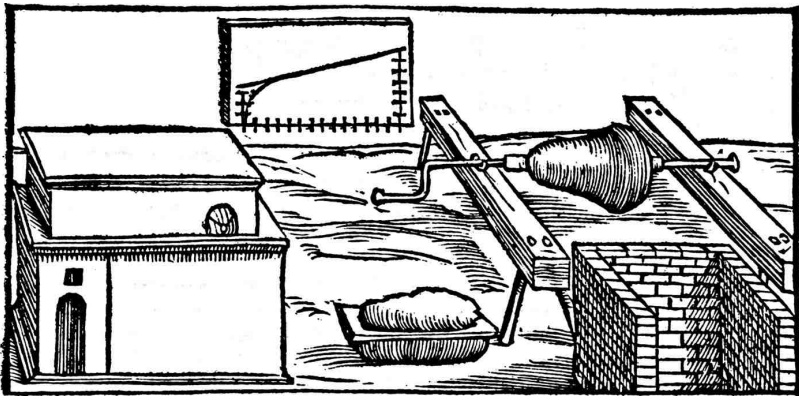


Rys. 3-77. Tokarki z napędem sznurowym (DAUMAS 1980): a - indyjska, b - rzymska

Znaczny postęp w konstrukcji tokarek nastąpił w czasach renesansu, skonstruowano wtedy duże maszyny tego typu służące do obróbki wykańczającej dzwonów (wytaczania¹⁸⁹ otworów po odlaniu), później również luf armatnich. Wprowadzono napęd pasowy, pojawiły się obrabiarki specjalne, podjęto również próby zastosowania kół wodnych. Przykład

¹⁸⁹ Wytaczanie – sposób obróbki otworów (uprzednio odlanych, odkutych lub wywierconych) za pomocą noży, zwanych wytaczakami (tokarki), lub wytaczadeł (frezarki).

specjalnej tokarki do wytaczania rdzeni odlewniczych dzwonów, według Biringucciego (1540), przedstawia rysunek 3-78; zgodnie z ideą toczenia ruch główny obrotowy wykonuje przedmiot obrabiany, ruch posuwowy – narzędzie (drewniany wytaczak trzymany w ręku rzemieślnika, niewidoczny na rysunku). Konstrukcja nośna opisywanej maszyny była zrobiona z drewna, zastosowano w niej napęd ręczny (korbowy), bez koła zamachowego, co przy znacznej masie i związanej z tym bezwładności rdzenia wykonanego z drewna i masy formierskiej było rozwiązaniem spełniającym swoją rolę.



Rys. 3-78. Tokarka do wytaczania rdzeni odlewniczych dzwonów według Vannoccio Biringucciego (BIRINGUCCIO 1540)

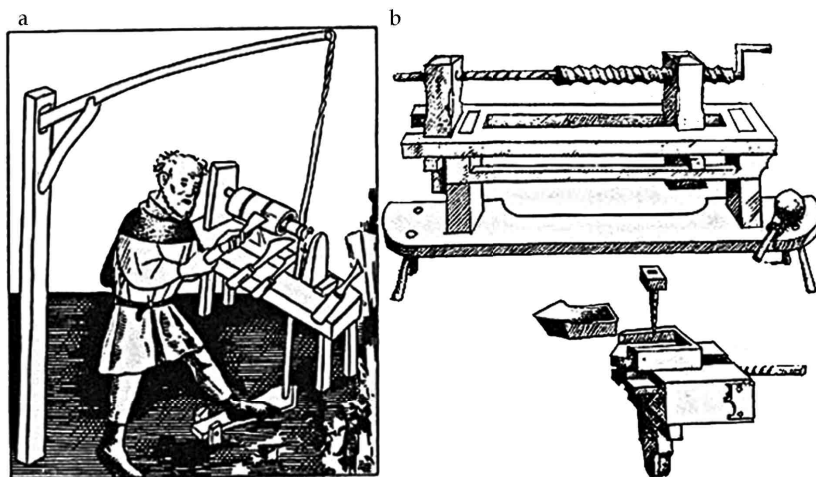
Vannoccio Biringuccio (1480-ok. 1539) w instrukcji wykonania rdzenia odlewniczego za pomocą swojej maszyny napisał:

Najpierw weź miarę z tego rysunku, żeby wykonać rdzeń z dębu albo innego podobnego suchego [sezonowanego] drewna, tak długi i gruby, jak wymaga tego praca, którą masz do zrobienia. Osadź ten rdzeń na osi na dwóch kozłach dobrze utwierdzonych w podłożu, w taki sposób, żeby się mógł obracać gładko, kiedy naciśniesz na korbę. Oś powinna być na tyle długa, by można ją było pewnie oprzeć na czopach, jak również taka, żeby umożliwiła wysuszenie glinianego rdzenia ogniem w sposób niezagrażający drewnianym kozłom. U jednego końca wrzeczona uformuj masę z gliny na kształt piramidy grubej u stopy, a cienkiej u głowy dzwonu; krótszą od wysokości, jaką ma mieć dzwon; krawędź uformuj precyzyjnie, postępując

się liniątem lub deską. Żeby było szybciej i żeby rdzeń był lżejszy, dla dużych dzwonów wykonaj duży rdzennik z drewna i pokryj go dokładnie gliną. Ten element [drewniany rdzennik] nazywa się szkieletem i wykonuje się go tak, by miał 1/3 grubości rdzenia. Wykonawszy to wszystko, pokryj całość mokrym popiołem i wygładź do kształtu, jaki rdzeń ma mieć¹⁹⁰.

Jak wiadomo, modele odlewnicze i rdzenie dzwonów wykonywano głównie na tokarkach karuzelowych (o pionowej osi obrotu). Zastosowanie poziomej osi obrotu rdzenia dzwonu umożliwiło równomierne jego wysuszenie nad rozpalonym pod spodem ogniem bez konieczności przenoszenia rdzenia z miękkiej masy formierskiej.

Popularną formą napędu pierwszych tokarek był napęd sprężynowy. Na rysunku 3-79 a przedstawiono XV-wieczną obrabiarkę, w której obrabiany przedmiot był napędzany przez ciągną nawiniętą na wrzeciono – zamocowane górnym końcem w elemencie sprężystym, a dolnym – w napędzającej maszynę dźwigni nożnej.

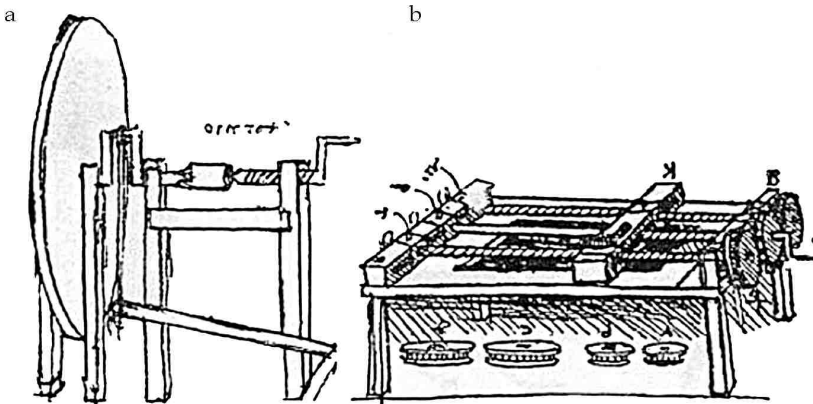


Rys. 3-79. Tokarki niemieckie (WOODBURY 1963): a – sprężynowa, Mendel Housebook (ok. 1436), b – suport (1480)

¹⁹⁰ Tłumaczenie M.S. Włoskie *forma*, w zależności od kontekstu, przetłumaczono jako *rdzeń* lub *rdzennik*. Wyrażenie *questa prima parte la chiamano la roccha* przetłumaczono kontekstowo, jako: *Ten element* [drewniany rdzennik] *nazywa się szkieletem*. Oryginalny tekst zamieszczono na s. 348.

Element sprężysty mógł być wykonany ze sprężystego drewna (jodły, cisu, jesionu, wiązu) lub odkuty z żelaza. Tokarz na rysunku trzyma narzędzie oparte o podtrzymkę w ręce, a obrabiany przedmiot wykonuje oscylacyjny ruch obrotowy. Na rysunku 3-79 b przedstawiono suport tokarki zegarmistrzowskiej do nacinania gwintów, jest to bardzo ważne udoskonalenie zwiększające dokładność obróbki.

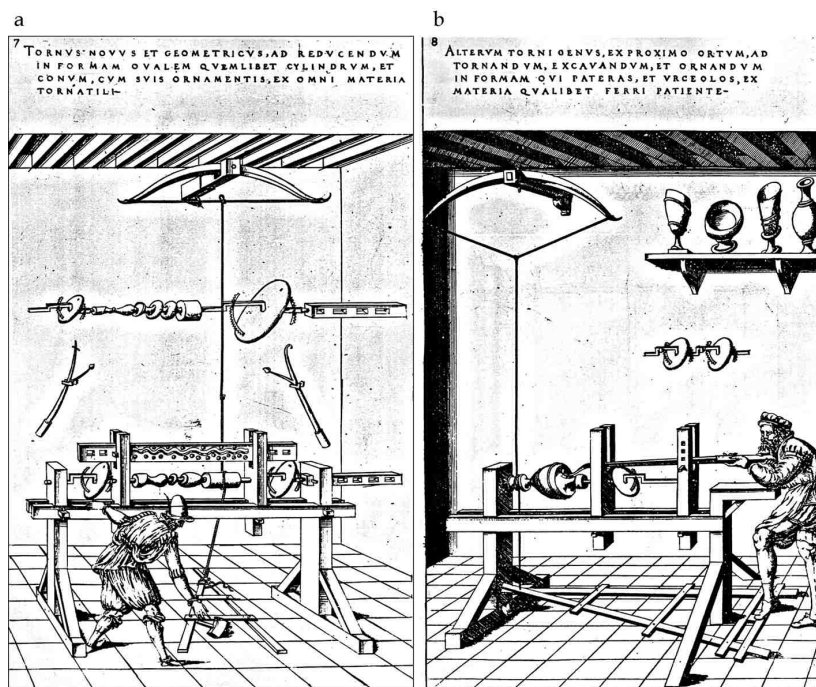
Różne pomysły tokarek przedstawił Leonardo da Vinci, ale, jak wiadomo, jego pomysłowość tylko nieznacznie przyczyniła się do rozwoju techniki – większość jego notatek pozostała nieznaną aż do XIX wieku. Na rysunku 3-80 a przedstawiono tokarkę napędzaną mechanizmem korbowo-wodzikowym wyposażoną w koło zamachowe, a na rysunku 3-80 b – gwintownicę wyposażoną w szereg przekładni do nacinania gwintów o różnych skokach.



Rys. 3-80. Maszyny Leonarda da Vinci (LEONARDO DA VINCI 1483-1499): a – tokarka, b – gwintownica

Jak wspomniano, podczas toczenia obrabiany przedmiot jest wprowadzany w ruch obrotowy (ruch główny), a narzędzie (nóż tokarski) – w ruch posuwowy. W zależności od usytuowania obrabianej powierzchni różni się toczenie zewnętrzne (powierzchni zewnętrznych) i toczenie wewnętrzne (otworów) oraz toczenie wzdłużne (narzędzie przesuwa się wzdłuż osi przedmiotu obrabianego) i toczenie poprzeczne (przesuw narzędzia jest prostopadły do osi przedmiotu). Toczenie wzdłużne ma miejsce np. przy obróbce wałków gładkich i stopniowych, poprzeczne – np. przy przecinaniu i obróbce powierzchni czołowych.

Dwa warianty napędu, umożliwiające toczenie poprzeczne (rys. 3-81 a) oraz wzdłużne (rys. 3-81 b), zamieścił Jacques D. Besson¹⁹¹ w dziele *Theatrum instrumentorum et machinarum* z 1578 roku (BESSON 1578). Maszyny, podobnie jak przedstawione na rysunku 3-79 a, są napędzane dźwigniami nożnymi, a narzędzie (wytaczak) jest trzymane w ręku i oparte o podtrzymańkę.



Rys. 3-81. Dwa warianty napędu sprężynowego tokarek (BESSON 1578): a - do toczenia poprzecznego, b - do toczenia wzdłużnego

¹⁹¹ Jacques Besson (?1540-1573) – francuski wynalazca, który prawdopodobnie około roku 1568 wynalazł tokarkę do produkcji śrub (vide s. 241). Autor dzieła *Theatrum instrumentorum et machinarum* (łac. teatr instrumentów i maszyn) wydane w 1578 roku, w którym opisał i przedstawił na miedziorytach kilkadziesiąt oryginalnych oraz ulepszonych przez siebie maszyn. Publikacja Bessona była pierwszą na świecie wydrukowaną książką techniczną. Od 1999 roku jest dostępna online po łacinie, poprzedzona współczesnym angielskojęzycznym wstępem (www.sil.si.edu).

W nagłówku rysunku 3-81 a znajduje się napis:

Nowa tokarka geometryczna do redukowania w formy owalne każdego walca, stożka wraz z możliwością wykonywania ornamentów [w przedmiotach] z każdej materii obrabialnej¹⁹².

W nagłówku rysunku 3-81 b napis głosi:

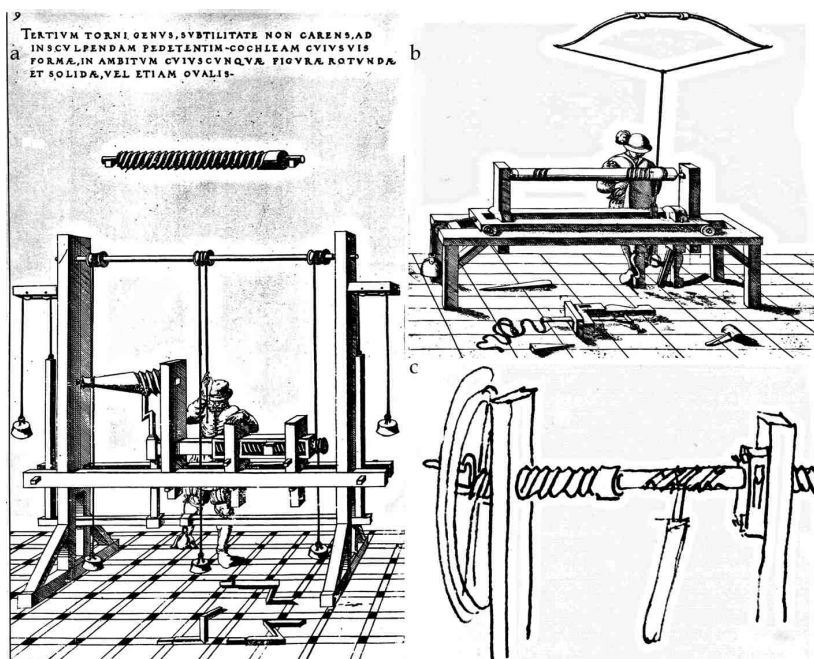
Kolejny typ tokarki wywodzący się z poprzedniej, do toczenia, wiercenia i ornamentowania np. pucharów i dzbanów z każdej materii obrabialnej żelazem¹⁹³.

Obie tokarki z rysunku 3-81 mają układ sprężynowy, magazynujący energię w płaskiej sprężynie zamocowanej nad maszyną. Ruch główny (obrotowy) przedmiotu obrabianego odbywa się naprzemiennie w lewą i prawą stronę. Napęd w lewą stronę odbywa się za pomocą jednostronnej dźwigni nożnej, natomiast w prawą – dzięki energii zmagazynowanej w sprężynie płaskiej zamocowanej pod sufitem.

Szczególnie precyzyjnej obróbki wymaga toczenie gwintów. Jacques D. Besson dokonał bardzo ważnego udoskonalenia umożliwiającego precyzyjne nacinanie linii śrubowych o żądanej geometrii. W tokarce kopiarce z napędem grawitacyjnym, przedstawionej na rysunku 3-82 a, zsynchronizował ruch posuwowy z ruchem głównym (przedmiot obrabiany znajduje się po lewej stronie rysunku). Pionowo zorientowany nóż jest prowadzony przez śrubę znajdującą się w środkowej części rysunku. Układ ciężarków zapewnia właściwy nacisk narzędzia na przedmiot obrabiany oraz umożliwia napęd. Maszyna Bessona wycinała precyzyjną, powstającą w wielu przejściach narzędzia, linię śrubową na powierzchniach walcowych i stożkowych. Drewniane przekładnie śrubowe były w tym okresie szeroko wykorzystywane w prasach do winogron, dokładna obróbka linii śrubowej zwiększała sprawność, niezawodność oraz żywotność takiej prasy. W nagłówku rysunku swojej tokarki do

¹⁹² Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *Tornus novus et geometricus, ad reducendum in formam ovalem quemlibet cylindrum, et conum, cum suis ornamentis, ex omni materia tornatili* (BESSON 1578).

¹⁹³ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *Alterum torni genus, ex proximo ortum, ad tornandum, excavandum, et ornandum in formam ovi pateras, et urceolos, ex materia qualibet ferri patiente* (BESSON 1578).



Rys. 3-82. Tokarki do gwintów: a – kopiarka (BESSON 1578), b – z napędem sprężynowym (ERRARD 1584), c – z kołem zamachowym (Schickhardt 1610 ±25, NEUE FORSCHUNGEN... 2002)

gwintów (rys. 3-82 a) Besson podkreśla ewidentne zalety nowej obrabiarki w zakresie dokładności obróbki oraz jej uniwersalność:

*Trzeci typ tokarki, nie bez subtelności, do rzeźbienia krok po kroku we-
 wnętrz spiralnej linii każdego typu w litych figurach obrotowych, ale także
 w wydrążonych¹⁹⁴.*

Jean Errard de Bar-le-Duc w opisie swojej maszyny, przedstawionej na rysunku 3-82 b, zachwalał możliwość wykonywania gwintu bez modelu (kopii w toczeniu kopiowym), niestety nie podał szczegółów. Najprawdopodobniej jest to maszyna przerysowana z podręcznika Bessona.

¹⁹⁴ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *Tertium torni genus, subtilitate non carens, ad insculpendam pedetentim cochleam cuiusvis formae, in ambitum cuiuscunque figurae rotundae et solidae, vel etiam ovalis* (BESSON 1578).

Pomimo wynalezienia suportu, jeszcze w XVII wieku wycinano gwinty narzędziem trzymanym w ręku. Służącą do tego celu maszynę przedstawiono na rysunku 3-82 c.

Konwisarstwo, czyli wyrób naczyń i przedmiotów cynowych i ołowianych, rozwijało się głównie w większych miastach. Konwisarze, oprócz cynowych naczyń stołowych: talerzy, mis, półmisek, dzbanów, kufli, kubków, łyżek itp., wytwarzali też lichtarze, kałamarze i odważniki (BURDECKI 1938). Prawdziwym przełomem było udane zastosowanie na przełomie XV i XVI wieku w maszynach używanych w konwisarstwie koła zamachowego. Takie koło dzięki swojej dość dużej masie zapewnia równomierność ruchu obrotowego. Dodatkowo koło zamachowe wyeliminowało jeszcze jedną niedoskonałość wczesnych tokarek, dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania uzyskano ciągły, jednokierunkowy ruch obrotowy. Jedną z pierwszych tokarek tego typu, konstrukcji Josta Ammana (?1539-1591), przedstawia rysunek 3-83.

Tokarka Josta Ammana służyła do wykonywania drewnianych modeli odlewniczych, do odciskania kształtów w formach piaskowych pucharów na wino, mogła także służyć do polerowania odlanych naczyń. Dodatkową zaletą opisywanej tokarki, w porównaniu z prezentowaną wcześniej maszyną Leonarda da Vinci, było zastosowanie „zewnątrznego” źródła napędu – maszynę napędzał pomocnik, co umożliwiała skupienie się tokarza na precyzyjnej obróbce.

Na rysunku 3-84 przedstawiono tokarkę o ruchu jednokierunkowym wyposażoną w napęd korbowy współpracujący z elementem sprężystym wspomagającym ruch mechanizmu korbowego. Jej konstruktorem był Cherubin d’Orleans (1613-1697).

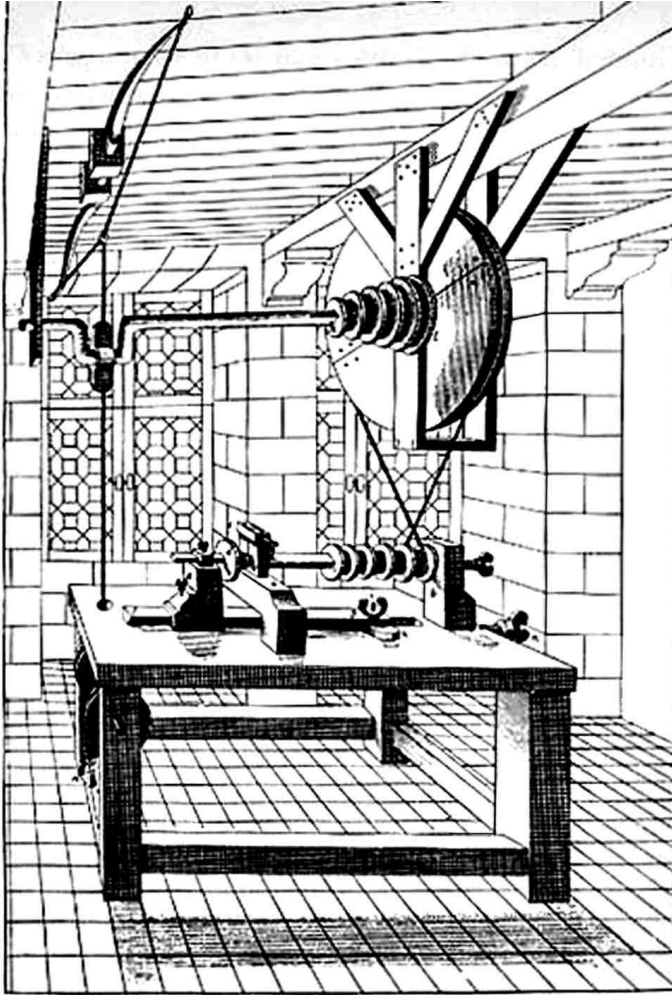
Równomierność pracy zapewniało duże koło zamachowe. Wprawdzie na rysunku nie widać źródła napędu, ale prawdopodobnie była nim dźwignia napędzana nogą. Innowacją było zastosowanie zestawu kół pasowych o różnych średnicach, co umożliwiała dobór przełożenia do wymagań obróbkowych. Maszyna służyła do obróbki soczewek okularowych oraz stosowanych w aparaturze naukowej. Była wyposażona w najnowszą zdobycz oświeceniowej myśli technicznej – łożyskowanie toczne.

Na rysunku 3-85 przedstawiono tokarkę konstrukcji Salomona de Causa z 1615 roku. Maszyna była wyposażona w masywne napędowe koło zamachowe będące jednocześnie dużym kołem przekładni pasowej. Koło zamachowe napędzał pomocnik, używając do tego celu korby. Układ napędowy maszyny miał dwie przekładnie: pierwszą stanowiła para: korba napędowa – duże koło, drugą para: duże koło – małe koło przekładni



Rys. 3-83. Tokarka o ruchu jednokierunkowym wyposażona w koło zamachowe, Das Ständebuch 1568 (WOODBURY 1963)

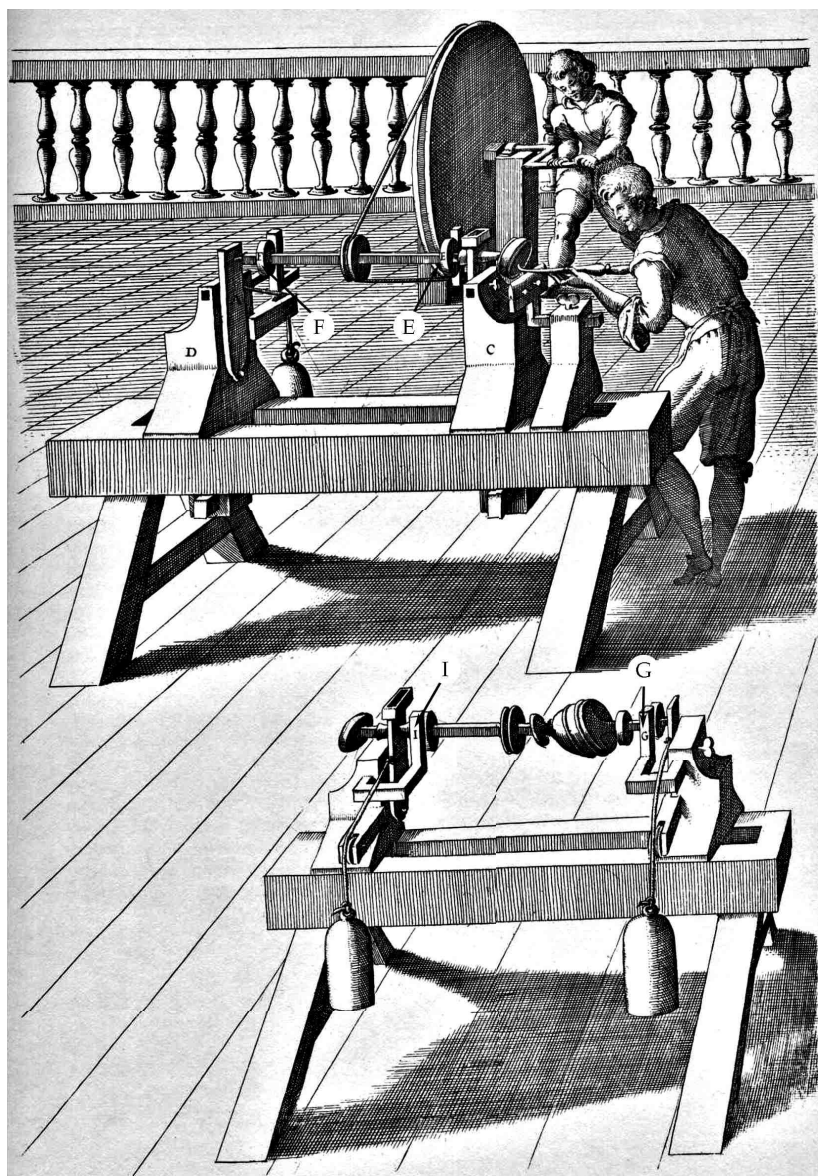
pasowej. Dzięki takiemu rozwiązaniu ruch obrotowy przedmiotu obrabianego mógł się odbywać 20-30 razy szybciej niż ruch obrotowy korby. Zastosowanie tak dużego przełożenia umożliwiało wspomniane koło zamachowe magazynujące energię zdolną do zrównoważenia nierównomiernego jej poboru w trakcie przerywanej obróbki. Opisywana maszyna miała jeszcze jedno pomysłowe rozwiązanie konstrukcyjne – siła naciągu pasa przekładni pasowej była wywierana (i jednocześnie regulowana) dwoma obciążnikami. Obciążniki wywierały nacisk na dwie dźwignie jednoramienne, które dociskały dwa krążki zamocowane na wrzecionie



Rys. 3-84. Tokarka z jednokierunkowym napędem sprężynowym wyposażona w koło zamachowe i archetyp wrzeciennika, 1677 (FELDHAUS 1910)

tokarki (oznaczone na drugoplanowym rysunku literami „E” oraz „F”) do dwóch ograniczników (oznaczonych „I” oraz „G”).

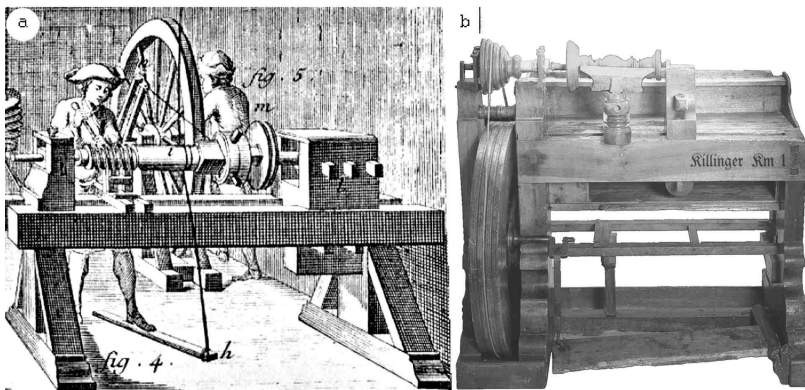
Tokarka de Causa służyła do obróbki kielichów i pucharów, narzędziem było wytaczadło trzymane w ręku przez tokarza. Można je było oprzeć na regulowanej podtrzymańce (widocznej na szkicu na drugim



Rys. 3-85. Tokarka z kołem zamachowym (DE CAUS 1615)

planie). Obrabiany przedmiot mógł być mocowany na dwa sposoby: (1) w specjalistycznych kłach (szkic na pierwszym planie) – co umożliwiałoby toczenie poprzeczne lub (2) tak, aby możliwe było toczenie wzdłużne (obróbka otworu od czoła – szkic na drugim planie). Obrabiarkę wyposażono w regulowany układ dwóch koników, oznaczonych literami „D” i „C” na szkicu na drugim planie. Rozstaw koników można było zmieniać, przesuwać je po prowadnicach i blokując przesuw za pomocą dwóch wbijanych klinów. Obrabiarka była wykonana z solidnych i masywnych drewnianych elementów konstrukcyjnych zapewniających stabilność.

Koniec powszechnego stosowania drewna w konstrukcjach nośnych tokarek przypada na połowę XVIII wieku. Jedne z ostatnich drewnianych tokarek przedstawia rysunek 3-86.



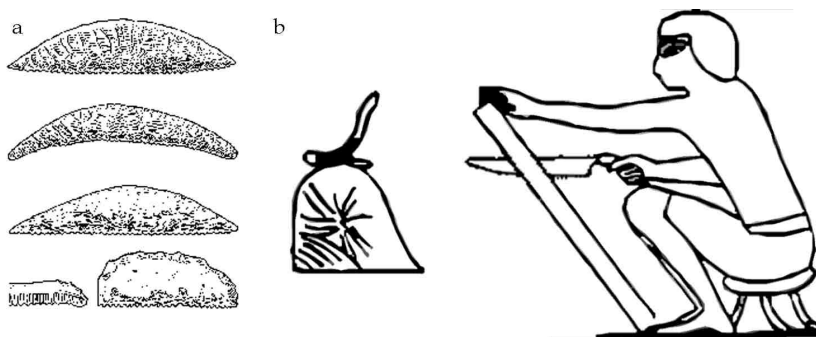
Rys. 3-86. Jedne z ostatnich drewnianych tokarek: a – tokarka do gwintów (DIDEROT 1740), b – tokarka firmy Killinger (XIX wiek)

Masową produkcję znormalizowanych części maszyn w linii technologicznej wyposażonej w obrabiarki realizujące kolejne operacje na obrabianych przedmiotach zainicjował w pierwszej połowie XVIII wieku Szwed Christopher Polhem (1661-1751). Dopiero jednak w drugiej połowie tego stulecia powstały podwaliny nowoczesnego przemysłu maszynowego. Francuz Jacques de Vaucanson (1709-1782), znany konstruktor automatów, skonstruował tokarkę kłową (1751), a brytyjski inżynier mechanik John Wilkinson (1728-1808) – precyzyjną wytaczarkę do cylindrów (1775). Zmierzch drewnianych obrabiarek nastąpił na przełomie XVIII i XIX wieku. W 1797 roku Henry Maudslay (1771-1831) zbudował pierwszą całkowicie

metalową tokarkę, a na przełomie lat trzydziestych i czterdziestych XIX wieku Anglik Joseph Whitworth (1803-1887) zbudował pierwszą tokarkę do znormalizowanych gwintów w systemie swojego autorstwa (pierwszy znormalizowany zarys gwintu, tzw. *gwint Whitwortha*). W 1845 roku Amerykanin S. Fith wynalazł tokarkę rewolwerową (ORŁOWSKI 1989). W 1870 roku w USA zastosowano tokarki automatyczne, w 1928 – obrabiarki wielooperacyjne, a w 1935 roku zbudowano linię wytwórczą złożoną z ciągu obrabiarek połączonych urządzeniami transportowymi.

3.5.2. Pilarki

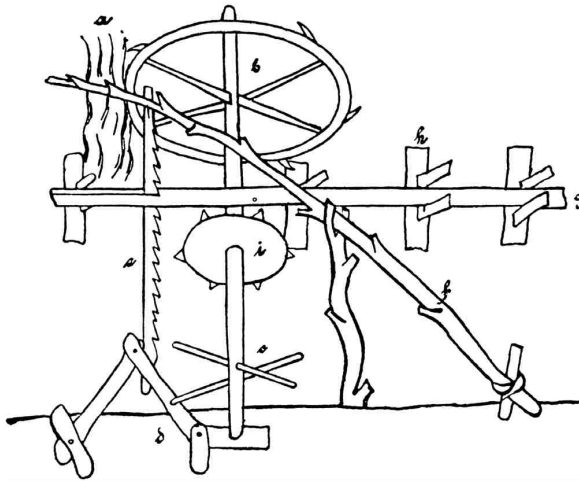
W czasach najdawniejszych drewno przecinano za pomocą narzędzi krzemienych pozbawionych uchwytów (rys. 3-87 a). Istotnym usprawnieniem było wynalezienie pił z brązu składających się z dwóch konstrukcyjnie oddzielonych elementów, uchwytu i części roboczej. Najstarsze znane przedstawienie pilarza przy pracy pochodzi z płaskorzeźby ściiennej wykonanej w grobowcu Wezyra Rehmire w Egipcie (rys. 3-87 b).



Rys. 3-87. Najstarsze piły (EVOLUTION... 2008): a – krzemienne (8000-4500 p.n.e.), b – najstarsze przedstawienie pilarza przy pracy, Egipt, 1450 rok p.n.e.

Zapotrzebowanie na przetarte drewno budowlane, skutnicze oraz do budowy pojazdów i innych urządzeń było bardzo duże. Przecieranie ręczne drewna wymagało olbrzymiego wkładu energii. Tracze zajmujący się tym, wyposażeni w niezbędne narzędzia, wykonywali swoją pracę z użyciem dwóch kozłów, na których na wysokości 2,0-2,5 m nad ziemią umieszczali kłodę. Jeden z traczy stawał na kłodzie, a drugi pod nią. Twarz dolnego pilarza zakrywało płótno zabezpieczające jego oczy przed

zapróśzeniem spadającymi wiórami. Było to bardzo energochłonne zajęcie, jego mechanizacja w średniowieczu zwiększyła wydajność dwu-, trzyosobowego zespołu pilarzy ponad trzydziestokrotnie. Najstarszy znany szkic urządzenia do mechanicznego przecierania drewna (pilarki) przedstawiono na rysunku 3-88; pochodzi on z poradnika dla budowniczych *Carnet de dessins* napisanego w latach 1235-1245 przez Villarda DE HONNECOURTA (ok. 1200-?). Na 33 pergaminowych kartach poradnika, o wymiarach 24 × 16 cm, znajduje się ponad 300 szkiców (m.in. schematycznych rysunków technicznych maszyn) wykonanych piórkem wraz z objaśnieniami. Do najciekawszych szkiców technicznych należą: najstarsze znane przedstawienie mechanizmu napędowego zegara (napęd grawitacyjny) oraz wspomniana pilarka podpisana: *jak zrobić pity pitujące same przez się*¹⁹⁵.



Rys. 3-88. Najstarszy znany szkic pilarki (DE HONNECOURT 1235-1245)

Szkic pilarki Villarda de Honnecourta jest kombinacją rzutu z góry i rzutu z boku. Nie zachowano na nim proporcji wymiarowych, nie dołą-

¹⁹⁵ Tłumaczenie M.S. na podstawie tekstu we współczesnym języku francuskim. Transkrybowany ze szkicu starofrancuski tekst Villarda de Honnecourta: *Par chu fait om une soore soir par li sole*, we współczesnej francuszczyźnie brzmi: *Par ce moyen on fait une scie scier par elle seule* (BECHMANN 1993, s. 278).

czono żadnych danych geometrycznych ani parametrów technicznych; pominięto pewne szczegóły konstrukcyjne. Autor przedstawił pilarkę w sposób bardzo uproszczony, najprawdopodobniej wychodząc z założenia, że nie ma potrzeby przedstawiania detali oczywistych dla ówczesnych rzemieślników, tym bardziej, że mogłyby one utrudnić pokazanie w sposób przejrzysty samej idei mechanicznego przecierania drewna.

Wszystkie elementy składowe obrabiarki, z wyjątkiem piły, były wykonane z drewna. Energii napędowej dostarczało koło wodne, na którego wale były osadzone: koło zębate mechanizmu posuwu¹⁹⁶ oraz dwa popychacze zapewniające ruch roboczy (w dół) piły przecinającej kłodę. Ruch powrotny (w górę) wywoływała sprężysta gałąź. Koło zębate mechanizmu posuwu było umieszczone pod kłodą. Zespół trzech prowadnic zapewniał prostoliniowość posuwu.

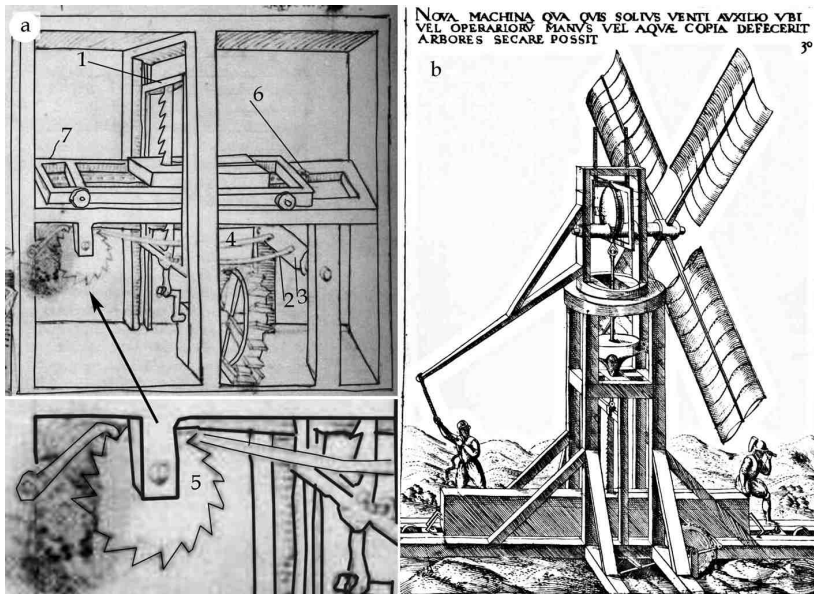
Villard de Honnecourt, sporządzając zapis konstrukcji swojej pilarki, nie ustrzegł się pewnych błędów. Już nawet pobieżna analiza kinematyczna maszyny pozwala stwierdzić, że łopatki koła wodnego napędzającego obrabiarkę ustawione są w sposób powodujący jego obracanie w przeciwną stronę (kłoda odsuwa się od piły, zamiast się na nią nasuwać), koło zębate mechanizmu posuwu nadaje kłodzie nadmierną prędkość liniową (brak przekładni), a samo narzędzie (piła) jest pozbawione ramy piłowej i nie ma należytego prowadzenia.

Przedstawiona na rysunku 3-88 idea powiązania dwóch ruchów (roboczego narzędzia oraz posuwowego obrabianego elementu) zasadniczo nie odbiega od idei stosowanej we współczesnych pilarkach ramowych. Szkic Villarda de Honnecourta był inspiracją dla kolejnych twórców techniki, którzy ulepszali ideę zmechanizowanej produkcji tarcicy.

Według KOPKEGO (1956) najstarsze pewne, potwierdzone źródłami piśnianymi, zastosowanie mechanicznej pilarki pochodzi z 1322 roku. W jednej z kronik miejskich jest wzmianka, że maszyna tego typu służyła do przecierania drewna budowlanego z pobliskiego lasu miejskiego w Augsburgu. Obrabiarka była wykonana niemal w całości z drewna (poza piłą, częściami łożyskowania oraz okuciami), a jej napęd stanowiło koło wodne.

Autorem konstrukcji pilarki ramowej z napędem korbowym (zblizonym do stosowanego współcześnie) jest Francesco di Giorgio Martini. Jego pilarkę z roku 1484 ±2, napędzaną kołem wodnym, pokazano na rysunku 3-89 a. Pilarka jest przedstawiona w perspektywie (dodatkowo

¹⁹⁶ Być może koło zębate nie służyło do posuwu, lecz napędzało cofanie kłody, a posuw był realizowany ręcznie (KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2006 c).



Rys. 3-89. Pilarki ramowe: a – z napędem korbowym i posuwem (DI GIORGIO MARTINI 1484 ±2), b – z napędem mimośrodowym (ERRARD 1584)

Martini zastosował cieniowanie, aby uzyskać efekt trójwymiarowości); w porównaniu z rysunkiem pilarki Villarda de Honnecourta jest to rysunek bardziej kompletny, jednak pewne ważne szczegóły konstrukcyjne są pokazane dość pobieżnie.

Koło wodne, wykonane jako podsiębierne¹⁹⁷, jest napędzane od strumienia wody poprowadzonego w niższej, nie pokazanej na rysunku, kondygnacji. Wał koła wodnego jest łożyskowany tylko z jednej strony. Sposób napędu ramy piłowej jest jasny już na pierwszy rzut oka – koło wodne bezpośrednio (bez przekładni) napędza korbę, do której jest przymocowany wodzik przekazujący ruch postępowo-zwrotny na ramę piłową. Nieco trudniejszy w interpretacji jest sposób realizacji posuwu, ponieważ na rysunku nie przedstawiono kilku elementów realizującego go mechanizmu.

Istotną innowacją w pilarce ramowej Martiniego jest zastosowanie przerywanego posuwu. Mechanizm posuwu działa następująco: ruch roboczy ramy piłowej (1) w dół powoduje pociągnięcie sztywnego wodzika (2),

¹⁹⁷ Vide opis kół wodnych na s. 190 i dalszych.

który obraca o pewien kąt wałek (3); wałek (3) przez popychacz (4) powoduje obrót koła zębatego (5) w lewo o pewien niewielki kąt; zapadka (6) uniemożliwia cofnięcie się koła (5); koło (5) napędza niewidoczny na rysunku wałek, na który nawija się lina (6) przebiegająca pod prowadnicami wózka (7); lina (6) pociąga wózek (7), na którym spoczywa przecinany materiał. Ruch posuwowy następuje tylko wtedy, kiedy rama (1) podąża w dół, posuw zatrzymuje się podczas ruchu ramy w górę.

Ruch postępowo-zwrotny ramy piłowej może być również realizowany przez układ mimośrodowy. Bardzo interesujące, o 100 lat późniejsze rozwiązanie napędu pilarki ramowej przedstawił Francuz Jean Errard de Bar-le-Duc (ok. 1554-1610). Obrabiarkę jego konstrukcji, pokazaną na rysunku 3-89 b, wyróżnia napęd silnikiem wiatrowym przekazywany przez mimośród. Śmigło wiatraka jest zamontowane obrotowo w sposób umożliwiający nastawianie go na kierunek wiatru. Niestety, autor nie przewidział zastosowania mechanicznego posuwu i musiał on być realizowany ręcznie. Niezależnie od Jeana Errarda de Bar-le-Duca na ten sam pomysł wpadł wspomniany na s. 208 Holender Cornelis Corneliszoon; zmodernizował on skonstruowany przez siebie pływający trak wodny (napędzany kołem wodnym) i po roku 1594 zbudował jego wersję napędzaną energią wiatru. Jego konstrukcja znalazła wielu późniejszych naśladowców.

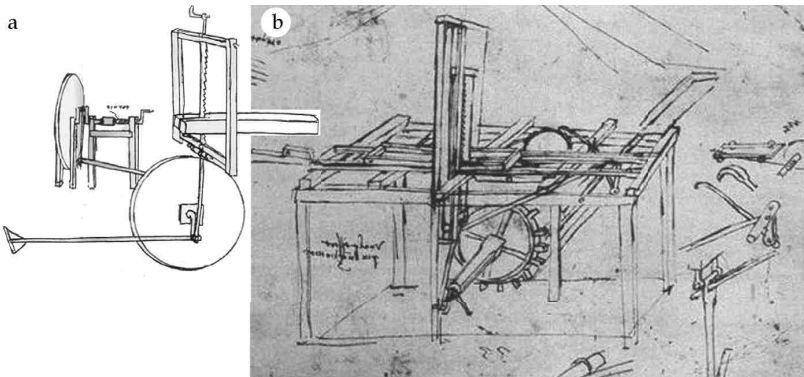
W nagłówku rysunku 3-89 b Jean Errard de Bar-le-Duc napisał:

*Nowa maszyna, która pomoże poruszać piłą łatwo, kiedy brak jest siły ludzkiej i wodnej*¹⁹⁸.

Koncepcja mechanicznego przecierania drewna interesowała również, o 13 lat młodszego od Martiniego, Leonarda da Vinci. Jedną z jego pilarek, przedstawioną na rysunku 3-90 a, była wyposażona w koło zamachowe, które magazynowało energię i kompensowało nierównomierny jej pobór przez maszynę.

W pilarkach ramowych ruch roboczy piły (najczęściej w dół) wymagał dostarczenia o wiele większej energii niż ruch jałowy (powrotny w górę), który we wczesnych pilarkach mógł się odbywać bez dostarczania energii (np. z wykorzystaniem zmagazynowanej energii potencjalnej sprężystości w elastycznej gałęzi – por. rys. 3-88). Z problemu nierównomiernego zapotrzebowania na energię podczas pracy pilarki ramowej zdawał sobie

¹⁹⁸ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *Nova machina qua quis solius venti auxilio ubi vel operariorum manus vel aquae copia defecerit arbores secare possit.*

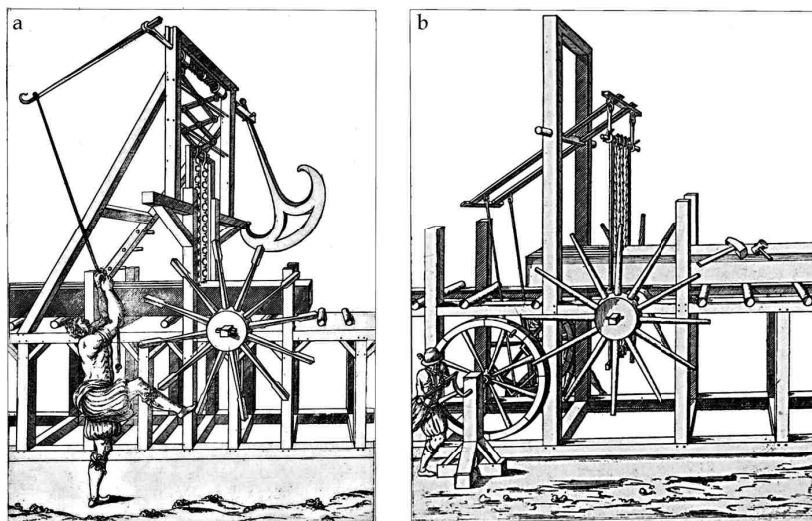


Rys. 3-90. Obrabiarki Leonarda da Vinci (LEONARDO DA VINCI 1483-1499): a – na pierwszym planie pilarka, na drugim tokarka – obie maszyny wyposażone w koła zamachowe, b – pilarka ramowa napędzana kołem wodnym

sprawę Leonardo da Vinci, który postanowił zastosować koło zamachowe magazynujące energię (rys. 3-90 a). Jednak nie rozwiązał do końca całej kinematyki obrabiarki; nie jest dokładnie jasne, co (lub kto) miałoby być źródłem napędu, nie ma też mechanizmu posuwowego. Pilarka z kołem zamachowym pozostała najprawdopodobniej jedynie w stadium projektu. O wiele ciekawsza jest pilarka napędzana kołem wodnym przedstawiona na rysunku 3-90 b. Nowością w tej obrabiarce jest ustawienie tzw. *przechyłki* (odchylenia ramy piłowej od pionu) – takie rozwiązanie konstrukcyjne umożliwia zastosowanie o wiele mniej skomplikowanego mechanizmu realizującego posuw ciągły. Ruch posuwowy obrabianego materiału zapewniany był przez nawijającą się na wał linę, zębata z zapadką uniemożliwiała odsuwanie się kłody od piły. Obok rysunku pilarki znajduje się kilka szkiców dodatkowych przedstawiających szczegóły konstrukcyjne mechanizmu posuwu oraz mechanizmu napędu ramy.

Autorem bardzo ciekawych rozwiązań sposobu napędu pilarek ramowych jest cytowany wcześniej Jacques Besson. Jego nowatorskie konstrukcje tego typu maszyn przedstawia rysunek 3-91.

W pilarce wahadłowej (rys. 3-91 a) równomierność pracy maszyny zapewniało masywne wahadło, które dzięki swojej dużej masie magazynowało energię. Po rozkołysaniu wahadła należało przesunąć kłodę za pomocą koła napędzanego nogą. Przesuw kłody (posuw) mógł być realizowany w sposób ciągły – wystarczyło jedynie wywierać nogą nacisk na koło napędzające mechanizm posuwu. Pełne rozkołysanie wahadła



Rys. 3-91. Pilarki ramowe (BESSON 1578): a – wahadłowa, b – korbowa

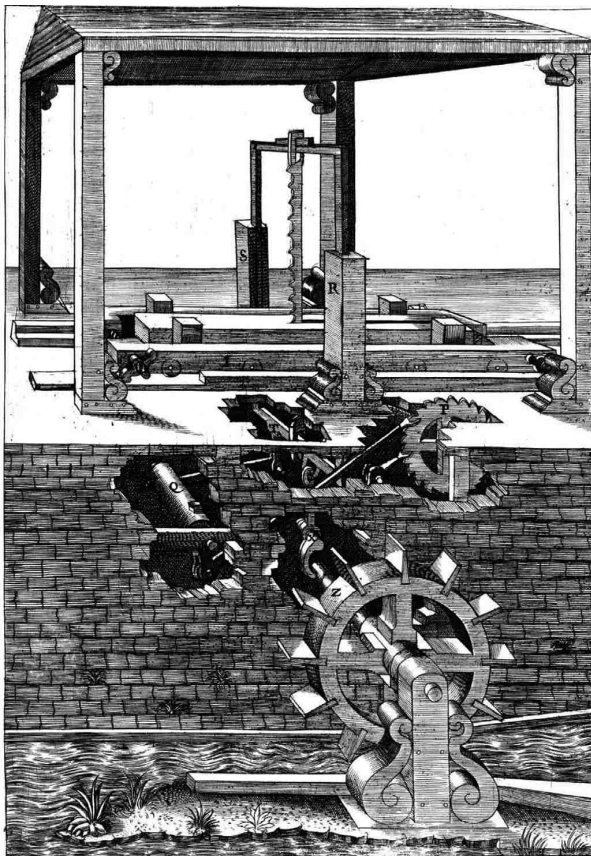
powodowało uzyskanie pełnego skoku ramy piłowej. Zamocowane w ramie piły były wyposażone w zęby dwustronnego skrawania (tzw. *M-ksztaltne*), zatem nie było ruchu jałowego, piły skrawały w obu kierunkach. Dwukierunkowe skrawanie eliminowało konieczność stosowania przechyłki lub nieciągłego posuwu. Ruch ramy w górę oraz w dół był realizowany przez dwie przekładnie śrubowe o przeciwnych i dużych skokach gwintów (zestawione zgodnie z zasadą tzw. *śruby rzymskiej*) współpracujące z układem krzyżowych dźwigni zwielokrotniających przesuw nakrętek do wymaganego skoku ramy piłowej.

W pilarence ramowej korbowej (przedstawionej na rysunku 3-91 b) konstruktor przez umieszczenie ramy piłowej na końcu dźwigni dwuramiennej uzyskał ruch piły po linii krzywej. Maszyna była napędzana przez dwóch ludzi obracających kołami napędowymi znajdującymi się po jej obu stronach (na rysunku widoczne tylko jedno). Ruch roboczy piły (skrawanie) odbywał się w górę. Wynikało to z ograniczonej wytrzymałości na wyboczenie dźwigni układu napędowego.

Nawet pobieżna analiza energetyczna pilarek Bessona prowadzi do wniosku, że jeden człowiek nie jest w stanie ich napędzać. Wymagana moc napędu wydajnej mechanicznej pilarki do kłód drewna to minimum 1,5 kW (STIEBER 1922), co według analiz energetycznych przytoczonych na s. 234 (tab. 29) przekłada się na moc ciągłą generowaną przez 15 ludzi.

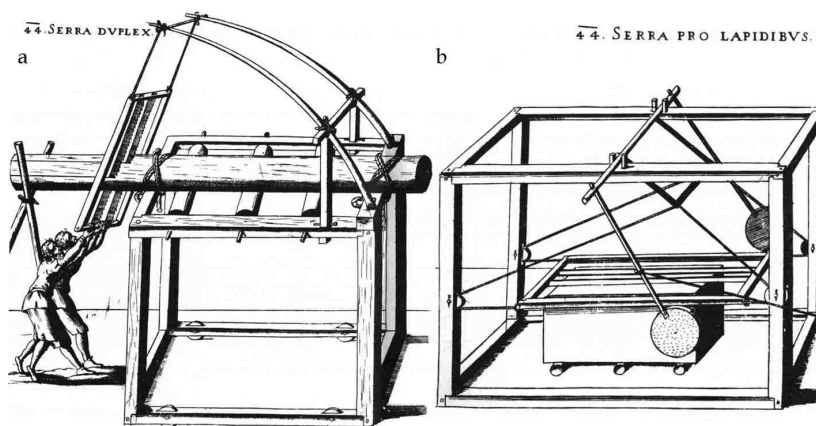
Jednak należy przyznać, że koncepcje rozwiązania transmisji napędu są bardzo interesujące.

Agostino Ramelli (1531?-1608?) sporządzał rysunki dokładniejsze niż te wykonywane przez poprzedników (Francesco di Giorgio Martini i Leonardo da Vinci), przedstawiały one nawet najdrobniejsze szczegóły konstrukcyjne. W swoich maszynach zastosował sprawdzone rozwiązania. Jego pilarka ramowa miała napęd korbowy oraz posuw przerywany. Jeszcze w 1930 roku w Engadynie w Szwajcarii widziano funkcjonującą pilarkę ramową o konstrukcji drewnianej, niemal identyczną jak przedstawiona na rysunku 3-92 pilarka Ramellego (KOPKE 1956, s. 91).



Rys. 3-92. Pilarka ramowa napędzana kołem wodnym (RAMELLI 1588)

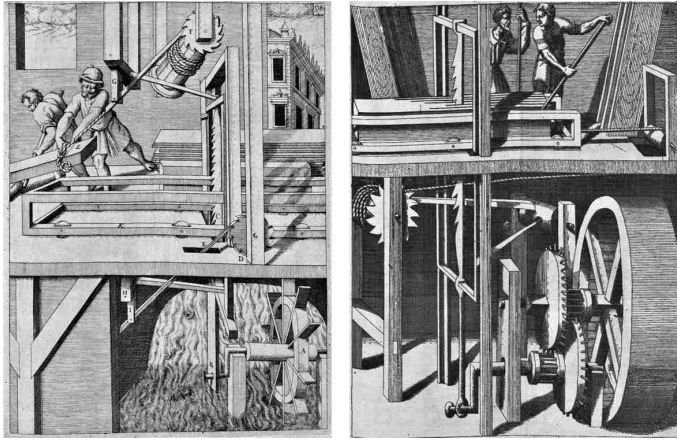
Wymieniony wcześniej Fausto Veranzio jest autorem dzieła z dziedziny budowy maszyn *Machinae Novae*, które opublikował w Wenecji w 1615 roku. Veranzio podjął próbę usprawnienia ruchu roboczego ramy piłowej polegającą na zastosowaniu sprężystego mechanizmu jej ruchu powrotnego (rys. 3-93 a). W pilarence jego autorstwa brakuje jednak mechanizmu posuwowego oraz układu prowadzącego ramę piłową. Część z jego projektów nigdy nie doczekała się realizacji ze względu na błędne założenia. Wydaje się, że do takich nierealnych rozwiązań należy pilarka z mechanizmem wahadłowym (rys. 3-93 b).



Rys. 3-93. Pilarki ramowe konstrukcji Veranzia (1615): a – pionowa ze sprężynowym mechanizmem powrotu ramy piłowej, b – pozioma z napędem wahadłowym (FELDHAUSE 1910)

Pilarki ramowe konstrukcji Jacopo Strady (1507-1588) wyróżnia zastosowanie układów wspomagających załadunek materiału do maszyny (rys. 3-94).

Dość zaawansowaną technicznie pilarkę do obróbki drewna można odnaleźć w *Architeckie polskim* Stanisława Solkiego (SOLSKI 1690). *Architekt polski* był podręcznikiem mechaniki i budowy maszyn przeznaczonym dla szerokiego kręgu odbiorców. To monumentalne dzieło potwierdza, że w dziedzinie budowy maszyn polska XVII-wieczna literatura techniczna znajdowała się w ścisłej czołówce europejskiej. Zachowana część *Architekta...*, pomyślana jako wstęp do obszerniejszej publikacji (dalsze części nie zostały prawdopodobnie w ogóle napisane), obejmuje trzy księgi zawierające 245 rysunków i traktuje niemal wyłącznie o zagadnieniach

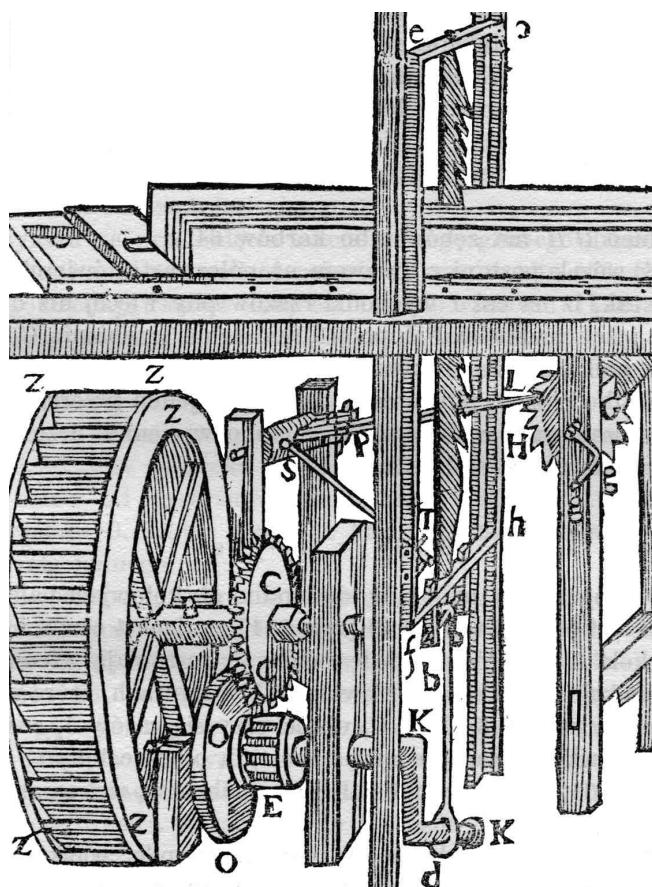


Rys. 3-94. Pilarki ramowe konstrukcji Jacopo Strady (STRADA 1617-1618)

mechaniki i budowy maszyn. Księgę, czyli *Zabawę I*, otwiera wykład elementarnych praw mechaniki, zilustrowany na konkretnych przykładach – dźwigni, śruby, kołowrotu itp. *Zabawa II* poświęcona jest zagadnieniom budowy maszyn: młynów (wodnych, kieratowych, wietrznych, wozowych), pilarek do drewna oraz innych urządzeń, w których mają zastosowanie napędy mechaniczne. Zamieszczono w niej wiele wzorów do obliczeń inżynierskich oraz tablice służące m.in. do doboru parametrów kół zębatych dla projektowanych maszyn i urządzeń. *Zabawa III* zawiera wiadomości z hydromechaniki. W *Architekcie...* znajduje się szczegółowy opis konstrukcji kilkudziesięciu maszyn i urządzeń. Zamieszczone rysunki mają opisane w tekście odnośniki oznaczone kolejnymi literami alfabetu, ułatwia to zrozumienie zasad działania urządzeń. Wskazówki przeznaczone dla budowniczych opisywanych konstrukcji opatrzone są wieloma praktycznymi radami mającymi na celu zmniejszenie prawdopodobieństwa popełnienia błędów wykonawczych.

W opisie *piły wodnej trybowej* Soliski przytacza obliczenia kinematyczne napędu, wydajności maszyny oraz szczegółowo opisuje ewentualne błędy w wykonaniu i sposoby zaradzenia im. Błędy są opisywane na podstawie obserwacji innych działających urządzeń tego typu. W *Zabawie II: O machinach prędkich, które prędkością przyczyniają ciężkości, jakie są: młyny wodne, bydłce, wietrzne, piły wodne, kołowroty kuchenne, zegary itp.* Soliski sporo miejsca poświęcił pilarkom ramowym do przecierania drewna.

Przedstawił szczegółowo konstrukcję pilarki napędzanej kołem wodnym oraz pilarki napędzanej kieratem wykorzystującym siłę pociągową zwierząt. Rozróżnił dwie odmiany konstrukcyjne pilarek: prostą i trybową. W opisie pilarki napędzanej wodą wyjaśnia: *prostą zowią, która tyle rzażów czyni, ilekroć koło skrzynczaste woda obróci, [...] trybową się zowie, która kiedy koło skrzynczaste woda raz obróci, piła kilka rzażów uczyni: 2, 3, 4 albo 5.* Szczególnie interesują autora piły *trybowe*. W celu lepszej prezentacji tego typu obrabiarki wyjaśnia zasadę jej działania, posiłkując się sześcioma rysunkami fragmentów napędu oraz ramy pilowej, następnie przedstawia rysunek zespołu napędowego wraz z jego szczegółowym opisem (rys. 3-95).

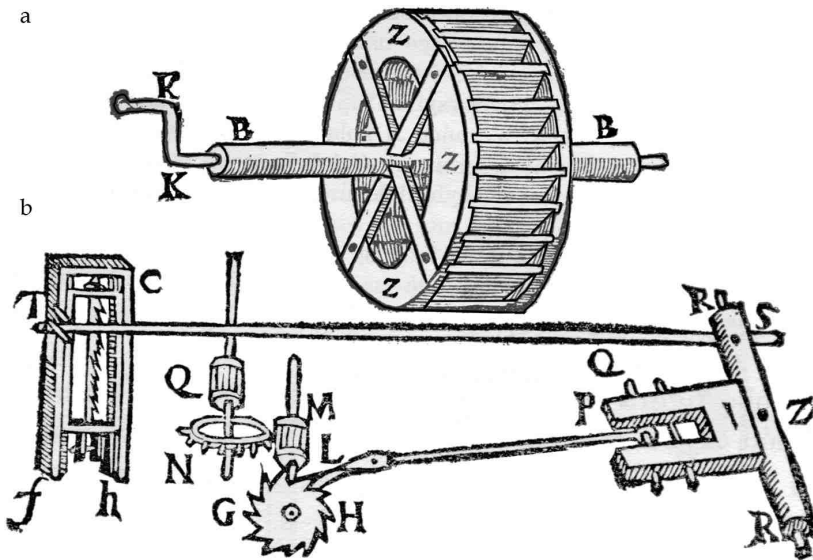


Rys. 3-95. Piła trybowa wodna (SOLSKI 1690)

Po wyjaśnieniu zasady działania napędu oraz budowy ramy piłowej przedstawia rysunek całej maszyny. Na obu rysunkach (napędu oraz całej maszyny) zachowano jednolite oznaczenia literowe.

Napęd opisywanej przez Solskiego pilarki stanowiło nasiębierne koło wodne (tzw. *skrzynczaste*) umieszczone na wspólnym wale B wraz z *palczastym* kołem zębatym C o 60 palcach. Koło C przekazywało napęd na cewy E o 12 pałeczkach (przekładnia przyspieszająca 4:1). Na rysunku napędu pilarki (rys. 3-96) koło C jest wyposażone w dwa rzędy pałców (co zwiększa wytrzymałość), natomiast na rysunku całej maszyny (rys. 3-95) – w jeden rząd.

Dzięki zastosowaniu przekładni wał napędowy pilarki ramowej osiągał roboczą prędkość obrotową nie mniejszą niż 80-90 obr/min, wymuszając szybszy ruch posuwisto-zwrotny ramy trakowej, która miała też bardziej równomierny chód. Przy bezpośrednim napędzie, bez przekładni przyspieszającej, prędkość ta nie przekraczała 10 obr/min (KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2007 c). Cewy E zostały umieszczone na wspólnym wale z kołem *szalonym* O pełniącym rolę koła zamachowego. Korba K (umieszczona na wale B) przekazuje napęd na *ramę piłową*. Mechanizm posuwu napędzany ramą piłową został przedstawiony na rysunku 3-95.



Rys. 3-96. Napędy *piły trybowej* (Solski 1690): a – główny, b – posuwu

Interesująca jest zasada działania mechanizmu posuwu *piły wodnej*, o którym SOLSKI (1690) pisze (rys. 3-96): *Naddawanie drzewa pod piłę na miejscu jednym rznącą tak się prowadzi. Rama T C h f piły zstępującej na dół opuszcza ciężarną T S, ta nadawkę P L rozprostowaną czyni dłuższą. Nadawka długości swojej szukając miejsca popycha zębów grzebieniowych G H oraz z cewami M. Cewy M obracają kółko N z cewami Q. Cewy Q zabierają palce wózkowe i nimi nadają pile drzewo na wózku utwierdzone. Ten jest wszytek sekret piły wodnej.*

Nieco bardziej ogólnie przedstawił Solski *piłę konną* (rys. 3-97). Autor w zapisie jej konstrukcji ograniczył się do jednego rysunku, uznając, że sposób wykonania poszczególnych mechanizmów nie wymaga szczegółowych opisów.

W *Architekcie polskim* Solski zamieścił szereg informacji eksploatacyjnych dotyczących opisywanych maszyn, i tak na przykład o wydajności pilarki pisał: *Na tym miejscu przydavam opis piły prostej konnej o 1 kole i o jednych cewach korbę piłową obracających, która piła na dzień 1 może ze dwójga drzewa mięszszego¹⁹⁹ na ćwierci 3 jednego łokcia [1 i $\frac{3}{4}$ łokcia \approx 1,0 m] zerznąć tarcic 18 i nadto 4 obzałce²⁰⁰.*

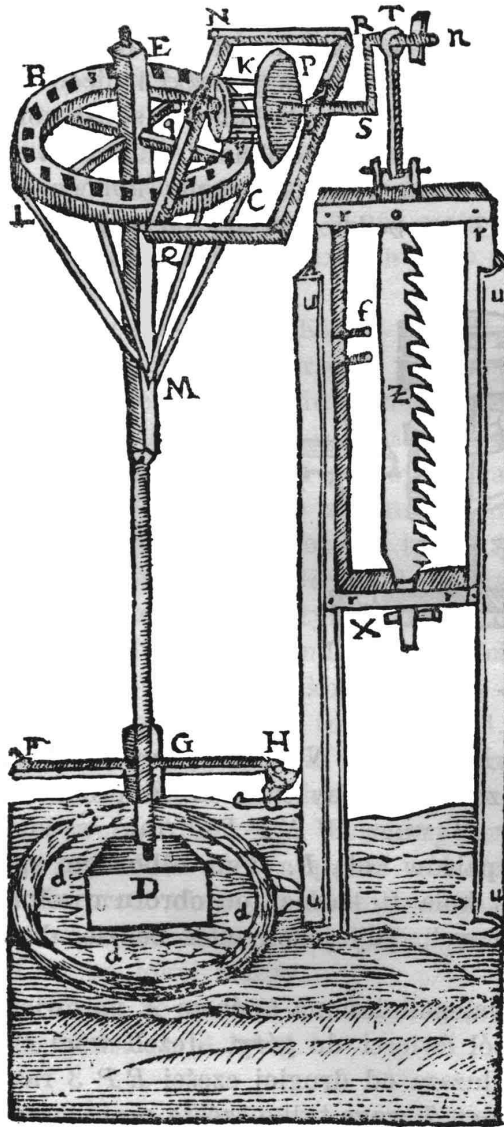
Pilarki z napędem wodnym budowano prawie w całości z drewna, metalowe były piły, okucia połączeń, czopy łożysk oraz korby mechanizmów. Zastosowane w napędach przełożenia powodowały, że ich wały obracały się z prędkościami do 200 obr/min, przeciętna wysokość skoku ramy wynosiła 0,5 m, prędkości skrawania wynosiły około 3,3 m/s, a rama piłowa wykonywała około 100 cykli (ruch w górę i ruch w dół) na minutę. Roczna wydajność pierwszych pilarek wynosiła około 500 m³, na początku XX wieku osiągnęła 20 000 m³ dla drewna iglastego i 15 000 m³ dla drewna liściastego (STIEBER 1922).

Początkowo budowano pilarki ramowe o pionowym, a później także o poziomym skoku pił. W 1777 roku Samuel Miller skonstruował pierwszą pilarkę z piłą obrotową (tarczową), natomiast w 1813 roku Tabitha Babbitt (1784-1854) zastosował wynalazek Millera do przecierania kłód. Trzeci rodzaj maszyny tartacznej, pilarka taśmowa, została skonstruowana w 1864 roku.

Odpowiedzią na potrzebę przenoszenia pilarek z miejsca na miejsce była budowa obrabiarek niestacjonarnych. W wersjach przewoźnych maszyny o konstrukcji drewnianej były zdecydowanie lżejsze od swoich odpowiedniczek metalowych, co spowodowało pewnego rodzaju renesans

¹⁹⁹ Mięszszosc – grubość.

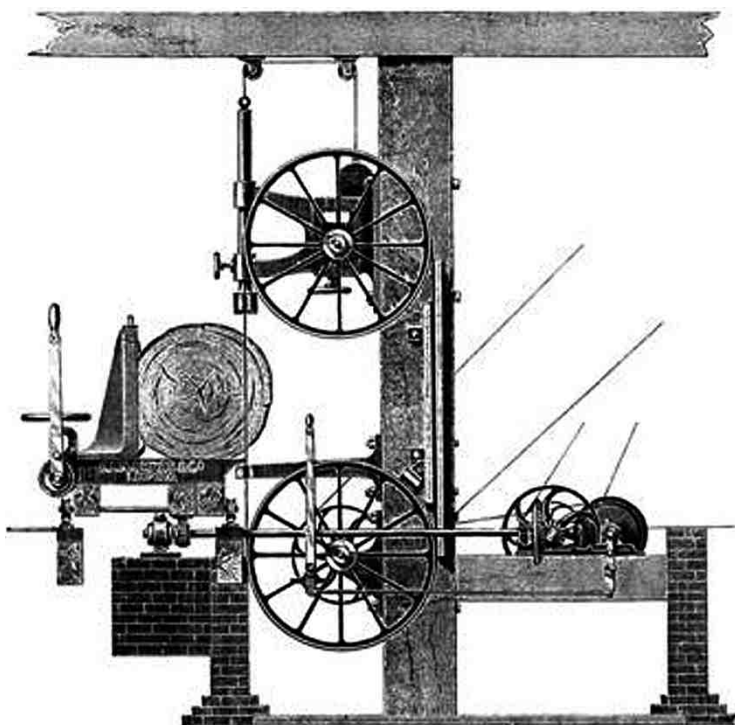
²⁰⁰ Obzałec – obrzyn, odpadek powstały po przetarciu drewna.



Rys. 3-97. *Pila konna prosta* (SOLSKI 1690)

drewna w XIX wieku jako tworzywa konstrukcyjnego pilarek do kłód. Pilarka taśmowa z przełomu XIX i XX wieku firmy Kirchner & Co. Leipzig, o konstrukcji drewnianej, została opisana przez KOZAKIEWICZA i MATEJAKA

(2006 b). Konstrukcję nośną pilarki wykonywał odbiorca we własnym zakresie, a producent maszyny dostarczał napęd, mechanizmy posuwu i ruchu głównego oraz rysunek złożeniowy całości wraz z rysunkami wykonawczymi drewnianych elementów konstrukcyjnych. Maszynę składano w pobliżu miejsca wyrębu, co znakomicie ułatwiało jej transport, szczególnie w trudnym terenie. Koła taśmowe miały średnicę 1200 mm, szerokość pily taśmowej wynosiła 100 mm, a szerokość cięcia – do około 750 mm (określała maksymalną grubość kłody). Wózek podawczy pilarki, na którym mocowano obrabianą kłodę, miał posuw mechaniczny z przyśpieszonym powrotem. Napęd był realizowany przez silnik parowy o mocy około 7,5 kW przez przekładnię pasową. Parę wytwarzano w lokomobili lub w stacjonarnym kotle. Pilarkę taką przedstawiono na rysunku 3-98.



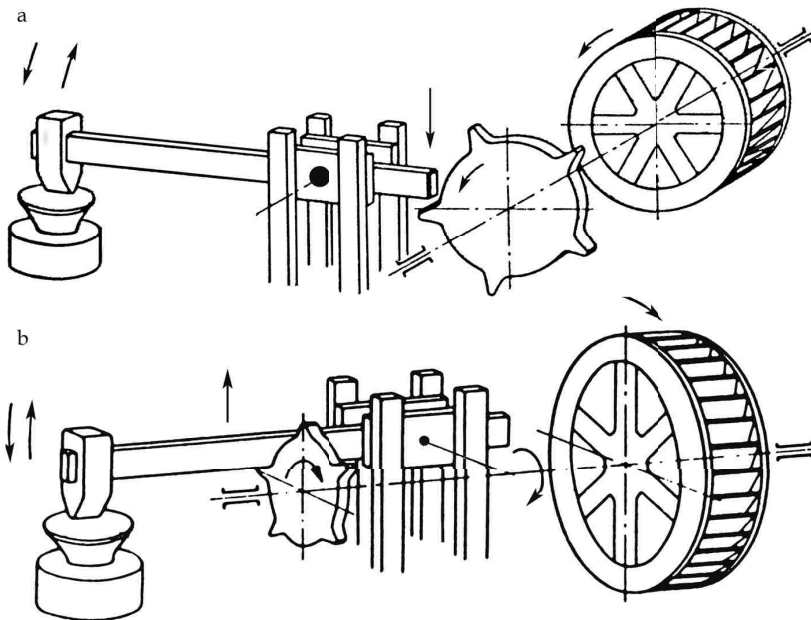
Rys. 3-98. *Pilarka taśmowa* Kirchner & Co. Leipzig (XIX/XX wiek) (Kozakiewicz i Matejak 2006 b)

3.5.3. Młoty mechaniczne

Najstarsza europejska wzmianka o zastosowaniu mechanicznego młota napędzanego drewnianym kołem wodnym, pochodzi z XII wieku. Według dwóch wzmianek, z 1135 i z 1175 roku, maszyna tego typu funkcjonowała na terenie dzisiejszej Austrii i służyła do rozdrabniania rudy.

Młoty mechaniczne stosowane w kuźnictwie były wykonywane w dwóch odmianach konstrukcyjnych: w młocie naciskowym (rys. 3-99 a) wykorzystywano zasadę dźwigni dwuramiennej, której krótsze ramię było naciskane za pomocą krzywki. Rozwiązanie tego typu umożliwiała szybkie kucie (do 250 uderzeń na minutę). Młot podrzutowy, zbudowany na zasadzie dźwigni jednoramiennej (rys. 3-99 b), osiągał zdecydowanie mniejszą liczbę uderzeń na minutę, ale za to znacznie cięższa mogła być tzw. *baba* młota. Konstrukcja młota podrzutowego wyszła, co ciekawe, z Polski. W Europie nazywano go w skrócie *polakiem*, a stosowany był niemal na całym kontynencie aż do XIX wieku.

Zrekonstruowany młot opadowy, napędzany kołem wodnym, można oglądać w Gdańsku Oliwie. Potok Oliwski od czasów średniowiecznych



Rys. 3-99. Młoty mechaniczne: a - naciskowy, b - opadowy, tzw. *polak*

do XX wieku był wykorzystywany gospodarczo przez różnorakie zakłady – młyny, folusze, kuźnice itp. Od 1597 roku (lub wcześniej) aż do początków XX wieku funkcjonowała tam kuźnia wyposażona w koła wodne. Obecnie trójbryłowy budynek stanowi skansen, a w jego wnętrzach mieści się niewielkie muzeum techniki. Znajdują się tam m.in. dwa duże koła wodne²⁰¹ (jedno napędzające miechy, drugie – młot²⁰²) oraz jedno mniejsze²⁰³ napędzające nożyce do cięcia blachy²⁰⁴.

Młot opadowy z nieistniejącej już kuźni wodnej w Drutarni (woj. świętokrzyskie) przedstawia rysunek 3-100.



Rys. 3-100. Młot opadowy, eksponat w Muzeum Zagłębia Staropolskiego w Sielpi Wielkiej

Wyjątkowe miejsce w polskiej literaturze technicznej zajmuje metalurg praktyk Walenty Rozdzieński (ok. 1560-ok. 1622). W wierszowanym podręczniku, zatytułowanym *Officina ferraria, abo huta y warstat z kuźniami szlachetnego dzieła żelaznego* (wydanym w 1612 roku), opisał XVII-wieczne urządzenia kuźnicze, w tym m.in. młoty mechaniczne. Hutniczy poemat Rozdzieńskiego został odkryty dopiero w latach dwudziestych XX wieku, do tego czasu był nieznan, nierejestrowany w żadnej bibliografii, znajdował się tylko w jednym księgozborze – Kapituły Gnieźnieńskiej

²⁰¹ Nasiębierne, o średnicy około 4 m każde; mają na obwodzie po 44 łopatki. Napędzają dębowe wały o przekroju kwadratowym (0,7 × 0,7 m) i długości 8 m.

²⁰² Młot opadowy o skoku 0,4 m i wadze 250 kg.

²⁰³ O średnicy 3,1 m, napędzające drewniany wał o średnicy 0,5 m i długości 4,7 m.

²⁰⁴ Nożyce mimośrodowe pozwalają na cięcie rozgrzanego żelaza o grubości do 40 mm.

we współoprawnym zespole kilkunastu druków staropolskich z lat 1583-1628 (JASIUK 2002). Warto zacytować fragment:

*Trzeba naprzód kuźnicę mieć na pewnej wodzie,
W której skok²⁰⁵ niech wysoki, a nie niski będzie,
By koła nie brodziły; ma też być głęboka
Rzeka ocembrowana z boków i szeroka.
Huta ma być przestronna, dla deszczu przykryta,
A ze wszystkich stron prawie porządnie zawarta.
Wszystko dziło²⁰⁶ porządne ma być i pogródki²⁰⁷
Pale, łątki²⁰⁸, koryta, tram²⁰⁹ i słupy wszystkie.
[...]
Późmyż też i do młota, gdzie żelazo kują.
Trzeba jako tam kunszty, i to wiedzieć stoją²¹⁰,
[...]
Młot też ma być niematy, kształtnie urobiony,
Nie nazbyt też wysoki, równy z każdej strony,
U którego trzeba mieć równą kształtną banę²¹¹,
Tak iżby nią mógł zawsze gładko kować szynę²¹².
I tego trzeba też strzec, by młot równo chodził,
Tak aby w jedno miejsce każdy raz ugodził.
Więc i koło niech będzie bierne²¹³ a mięszszy²¹⁴ wał,
Któryby wielki pochod i zawód²¹⁵ wielki miał
Helza²¹⁶ mięszsza i mocna i buksze²¹⁷ stalone²¹⁸
Mają też być a w słupy zarówno wsadzone.*

²⁰⁵ Skok – spadek, różnica poziomów przed i za kołem wodnym.

²⁰⁶ Dziło – urządzenie.

²⁰⁷ Pogródki – rynny doprowadzające wodę do koła wodnego.

²⁰⁸ Łątki – słupy z wyżłobionymi rowkami.

²⁰⁹ Tram – belka główna (LINDE 1811).

²¹⁰ Kunszty stoją – są części maszyny.

²¹¹ Bana (baba) – obuch młota.

²¹² Szyna – sztaba.

²¹³ Koło bierne – koło zdolne do nabierania dużej ilości wody.

²¹⁴ Mięszszy – gruby, o dużej średnicy.

²¹⁵ Pochod i zawód – tu: chód i skok (zawód – możliwości, osiągi).

²¹⁶ Helza – obręcz, tu: piasta.

²¹⁷ Buksza – rura żelazna albo śpiżowa wewnątrz piasty (LINDE 1811, t. 1, s. 192), tu: czop.

²¹⁸ Stalona – ustalona, tu: dobrze osadzona.

Więc i ryttel²¹⁹ niech będzie miększy i niematy,
 I ramiona²²⁰ zarówno aby młot dźwigały.
 Nakowalno²²¹ też, w które ciężko z góry bije
 Młot, a na nim żelazo ustawicznie kuje
 Trzeba mieć gładkie, całe, dobrze usadzone.
 [...] Walenty Rozdzieński (1612), fragment zacytowany za BURDECKIM (1938, s. 113-116).

Innym rodzajem młota jest kafar służący do wbijania pali (tzw. *pilotów*) w dno. O maszynie tego typu wzmiankuje Witruwiusz w I wieku p.n.e.:

*Jeśli zaś nie znajdzie się gruntu stałego, lecz niespoisty i bagnisty, wtedy trzeba to miejsce osuszyć i uprzątnąć, a w grunt powbijać, za pomocą machin, jak najgęściej osmolone pale olchowe, oliwkowe albo dębowe*²²².

Witruwiusz nie podaje jednak szczegółów konstrukcyjnych „machin do wbijania pali”. Pierwsze w pełni udokumentowane konstrukcje kafarów pochodzą z czasów średniowiecza. FELDHAUS (1958) podaje, że tego typu maszyna była użyta w 1230 roku do budowy klasztoru Bloomkampf. Autorem najstarszego znanego rysunku konstrukcyjnego kafara jest Francesco di Giorgio Martini (DI GIORGIO MARTINI 1484 ±2). W XV wieku poprawiono prowadzenie bijaka, stosując prowadnice oraz mechanizm zwalniania. Najprawdopodobniej autorem takiego rozwiązania był Pseudo-Juanelo Turriano około 1596 roku (ARS MECHANICAE... 2008).

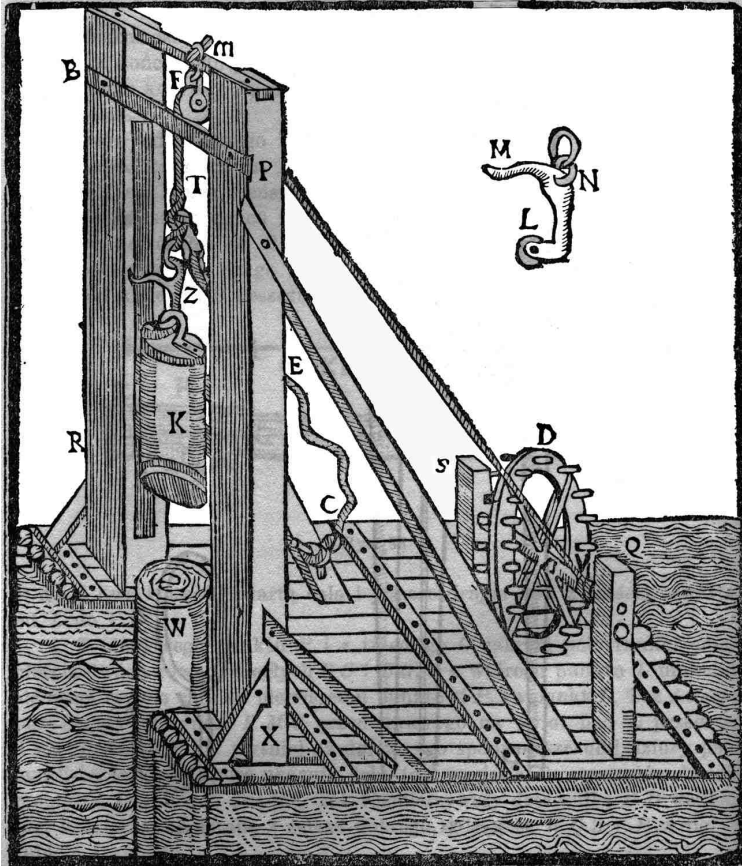
Drewnianą maszynę tego typu według SOLSKIEGO (1690) przedstawia rysunek 3-101. Autor nazwał urządzenie *windą do bicia palów w wodzie*; składa się ono z U-kształtnej tratwy umożliwiającej ustawienie bijaka K nad palem; na tratwie jest osadzona rama z prowadnicami. Mechanizm linowy napędzany kabestanem D służy do podniesienia bijaka na odpowiednią wysokość. Jego automatyczne zwolnienie umożliwia specjalny hak Z przedstawiony szczegółowo na rysunku dodatkowym i oznaczony MNL.

²¹⁹ *Ryttel* (*ryfka, ryffa, rykla, rytla*) – tu: żelazna obręcz wzmacniająca ramię młota.

²²⁰ *Ramiona* – tu: krzywka.

²²¹ *Nakowalno* – kowadło.

²²² Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *sin autem solidum non invenietur, sed locus erit congesticius ad inum aut paluster, tunc is locus fodiatu exianiatuque et palis alneis aut oleagineis aut robusteis ustilatis configatur, sublicaeque machinis adigantur quam creberrimae, carbonibusque expleantur intervalla palorum et tunc structuris solidissimis fundamenta impleantur. Extractis autem fundamentis ad libramentum stylobatae sunt conlocandi* (WITRUWIUSZ 27-13 p.n.e., Liber IV, Capitulum 4).



Rys. 3-101. Winda do bicia palów w wodzie (SOLSKI 1690)

Instrukcja budowy kafara składa się z dziewięciu zwięzłych punktów; warto przytoczyć ją w całości:

1. Zbij na wodzie do kupy drzewa dziesięcioro mięszszego [grubszego] na kształt tratfy [tratfy]. Od cieńszego końca niech będą końce albo wierzchowiska drzewa²²³ wszystkie równe; od mięszszego końca 2 drzewa średnie krótsze, aby zostawiły miejsce na pal.

²²³ Wierzchowisko – [...] sama najwyższa część drzewa [...] (LINDE 1810, t. 6, s. 221).

2. *We 3 łokcie [ok. 1,8 m] od końca mniejszego [grubszego] trafty postaw dwa słupy RB i XP, wygarowane [gar – otwór, w tym przypadku w znaczeniu: prowadnica] na wylot, buntami i zastrzałami utwierdzone po trzech bokach i na górze wespół związane. Wysokie według długości palów na 10, na przykład, łokci [ok. 6,0 m], jeżeli pale chcesz bić w ziemię na łokci 6 [ok. 3,6 m].*
3. *W łokcie pod wierzchem na PB przyprawisz poprzeczną sztukę drzewa PB.*
4. *Przy końcu cieńszym trafty postawisz koło D z tarcic z kołkami na słupkach QS na kształt kafarku [...].*
5. *Kloc dębowy K (babą zowią cieśle), gruby i długi na półtora łokcia [ok. 0,9 m] opaszysz u dołu ryfą żelazną²²⁴. Po bokach dasz po 2 pióra drewniane [prowadniki], które by wolno [swobodnie] mogły chodzić w garach [prowadnicach] słupów XP, RB. Na wierzchu przybijesz szynę z uchem mocnym i sporym i wprawisz ten kloc K między słupy XP, RB.*
6. *Na przewiązaniu m wierzchu słupów XP, RB przywiążesz klubę o 1 kółku F.*
7. *Dasz zrobić hak żelazny, jaki wizerunek pokazuje LNM, którego koniec L ma wchodzić w ucho kłoca K i on podnosić, a końcem M zawadzać się o drzewo PB, gdy pod nie hak trzymający kloc K liną kafarkową będzie pociągniony.*
8. *Przeprowadziwszy linę przez klubę F u jednego końca T uwiążesz hak LMN, a drugi V obwieszysz około walca kafarku V n.*
9. *Do kolca haku LNM przywiążesz sznur drugi CEZ w łokci 8 [4,8 m] i tak wystawisz windę do bicia palów (SOLSKI 1690, Księga I, Zabawa I, Nauka 3).*

W instrukcji użytkowania kafara autor zaleca zakotwiczenie tratwy kilkoma kotwicami lub kamieniami przywiązanymi do sznurów oraz zamocowanie za pomocą kilku lin pała W przed rozpoczęciem jego wbijania.

3.5.4. Maszyny portowe

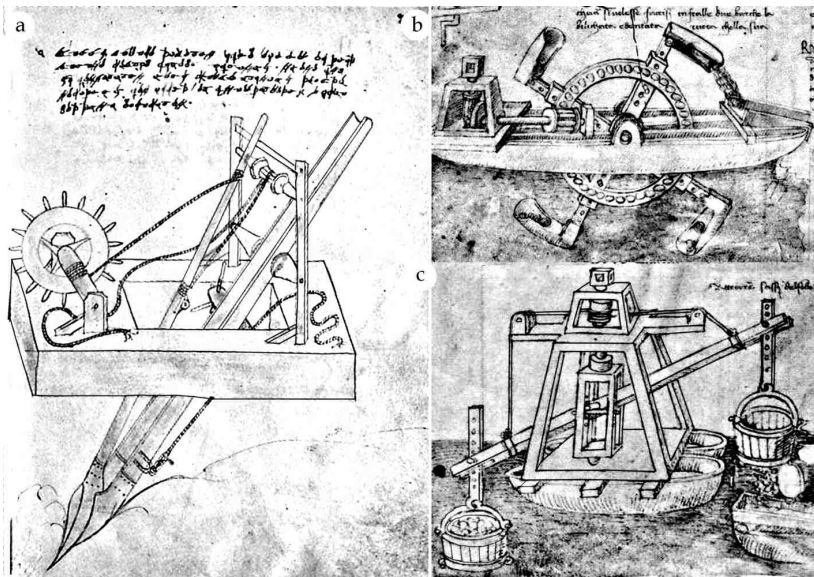
W początkach odrodzenia w wyniku dużej liczby odkryć geograficznych rozwinął się handel morski. Zwiększenie tonażu okrętów wymusiło

²²⁴ W celu zabezpieczenia części roboczej „kłoca dębowego” przed rozwarstwieniem w trakcie pracy.

rozbudowę i pogłębienie portów oraz rzek. W tym celu skonstruowano pogłębiarki – niezwykle interesujące drewniane maszyny, w których budowie połączono wiedzę szkutniczą oraz z dziedziny budowy skomplikowanych napędów mechanicznych.

Najstarszy znany rysunek i opis konstrukcyjny pływającej pogłębiarki wykonał Wenecjanin Giovanni Fontana (1393-1455); zamieścił go w dziele *Bellicorum instrumentorum liber*²²⁵ ukończonym w 1420 ±10 roku (rys. 3-102 a). W górnej części rysunku autor dodał lakoniczny opis:

*To nowe dzieło wykonuje kanały, aby taki [kanał] móc wydrążyć stosuje się je. Najpierw opada rynna, a następnie czerpak. W ten sposób urabia się nie tylko miękki, lecz także twardy grunt*²²⁶.



Rys. 3-102. Pogłębiarki: a – przedsiębierna Giovanniego Fontany (1420 ±10) (BATTISTI i BATTISTI 1984), b – kołowo-czerpakowa (DI GIORGIO MARTINI 1484 ±2), c – dźwigniowa (DI GIORGIO MARTINI 1484 ±2)

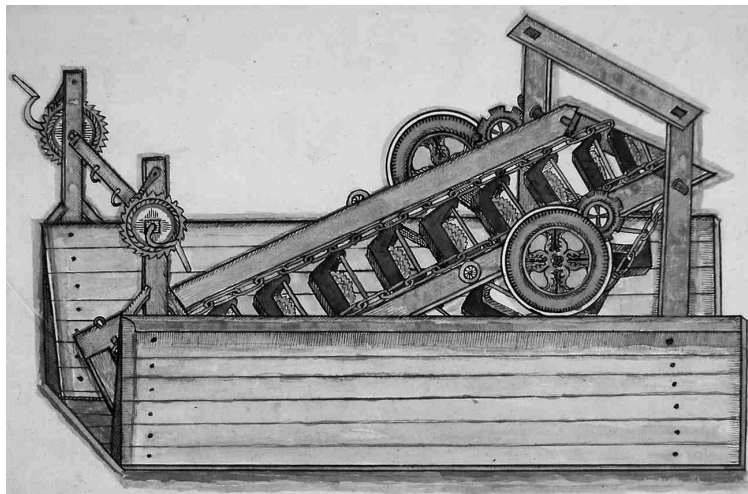
²²⁵ Przechowywanym w Monachium w Bayerische Staatsbibliothek (Cod. Icon. 242).

²²⁶ Tłumaczenie M.S. Tekst transkrybowany z oryginału w 1984 roku brzmi: *Cavum canale dicitur opus novum, eo quod cavare lectos potest aquarum. Ruere primo permititur unum lanceatorium, deinde reliquum per illud. Et frangit nedum molia sed dura similiter* (BATTISTI i BATTISTI 1984).

Pogłębiarka Fontany, przedstawiona bardzo schematycznie przez autora, była maszyną jedynie zgarniającą grunt z dna za pomocą metalowych części roboczych – nie można było wydobywać nią urobku na powierzchnię; napędzał ją kołowrót, operowanie rynną i czerpakiem odbywało się przez skomplikowany system lin.

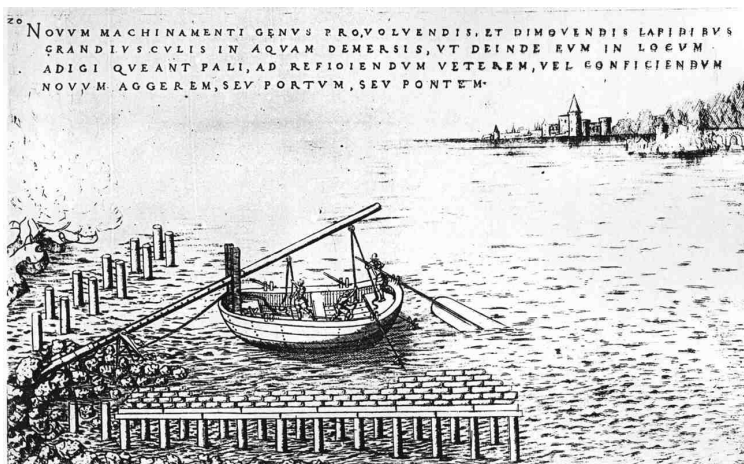
Interesujące konstrukcje pogłębiarek znajdują się w *Trattati di architettura ingegneria e arte militare* Francesco Giorgio Martiniego (DI GIORGIO MARTINI 1484 ±2). Na rysunku 3-102 b przedstawiono pogłębiarkę czerpakową napędzaną kieratem przez przekładnię zębatą, a na rysunku 3-102 c pogłębiarkę dźwigniową, której głównym elementem jest dźwignia dwuramienna napędzana przez przekładnię linową. Pogłębiarka czerpakowa jest napędzana przez kabestan, jej konstrukcja umożliwia załadunek urobku na pokład. Autor pominął sposób zakotwiczenia maszyny oraz jej napędu. Uwagę zwraca możliwość regulacji wysunięcia każdego z czterech ramion zakończonych czerpakami. Pewną wadą pogłębiarki jest konieczność przerywania pracy, co wynika z potrzeby odsuwania pojemnika na urobek, tak aby ramię po wysypaniu urobku mogło się ponownie zanurzyć w wodzie bez kolizji z pojemnikiem. W przypadku pogłębiarki dźwigniowej Martini zastosował bardzo pomysłowy napęd linowy dźwigni, zasięg pojemników na urobek można regulować w zależności od głębokości wody. Niestety, utrudniony był załadunek oraz wyładunek pojemników.

W anonimowym dziele z 1573 ±3 roku *Instrumentenbuch des Herzog Julius von Braunschweig-Wolfenbüttel* (INSTRUMENTENBUCH... 1573 ±3), przechowywanym w Landeshauptarchiv w Magdeburgu, zamieszczono rysunek mechanizmu pogłębiarki czerpakowej liniowej (rys. 3-103). Urządzenie po zamontowaniu na statku mogło wysunąć prowadnicę. Urobek był wydobywany za pomocą zestawu metalowych czerpaków przemieszczających się na opuszczonej prowadnicy. W maszynie zastosowano łańcuchy metalowe, niestety nie można ustalić, jak rozwiązano sposób ich napędu. Najprawdopodobniej dwa duże koła, przedstawione w prawej części rysunku, służyły do wysunięcia taśmociągu wyposażonego w czerpaki rozmieszczone wzdłuż dwóch łańcuchów. Dwa mniejsze koła (obok większych) były najprawdopodobniej kołami prowadzącymi łańcuchy, do których zamocowano czerpaki. Napęd zespołu czerpaków mógł się odbywać (oczywiście po wysunięciu taśmociągu) przez wyposażony w zapadki, jednokierunkowy kołowrót.



Rys. 3-103. Mechanizm pogłębiarki czerpakowo-liniowej (INSTRUMENTENBUCH... 1573 ±3)

Dwa typy pogłębiarek opisał w 1578 roku Jacques Besson, w dziele *Theatrum instrumentorum et machinarum* (BESSON 1578). Rysunek 3-104 przedstawia pogłębiarkę według Bessona. W nagłówku rysunku autor napisał:



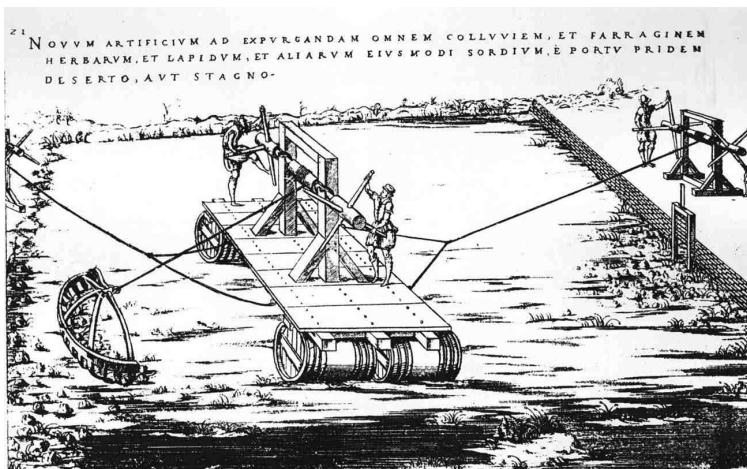
Rys. 3-104. Pogłębiarka dźwigniowa (BESSON 1578)

*Nowa maszyna do usuwania i odtaczania kamieni zatopionych w wodach, które później mogą być zastosowane do przebudowy przystani, albo do budowy nowej*²²⁷.

Maszyna Bessona służyła do umacniania brzegów basenów portowych oraz do ich powiększania. W urządzeniu wykorzystywano zasadę dźwigni, pogłębiarka była wyposażona w duże wiosło do napędu i sterowania oraz dodatkowo zacumowana do brzegu i zakotwiczona dwiema kotwicami (BESSON 1578).

Do nieco innego celu służyła pogłębiarka linowa, przedstawiona na rysunku 3-105. Napis w nagłówku rysunku głosił:

*Nowa sztuczka do chwytania i usuwania nieczystości, roślin i kamieni i każdych innych podobnych zanieczyszczeń z przystani i stawów, które nie są używane i zostały opuszczone dawno temu*²²⁸.

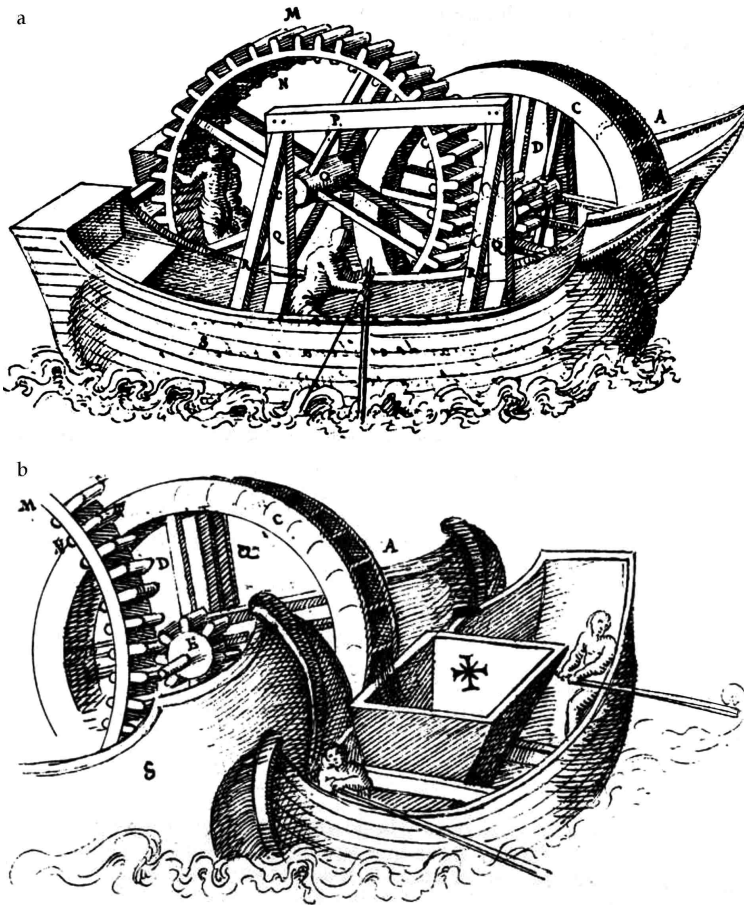


Rys. 3-105. Koparka linowa (BESSON 1578)

²²⁷ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *Novum machinamenti genus provolvendis, et dimovendis lapidibus grandiusculis in aquam demersis, ut deinde eum in locum adigi queant pali, ad reficiendum veterem, vel conficiendum novum aggerem, seu portum, seu pontem* (BESSON 1578).

²²⁸ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst brzmi: *Novum artificium ad expurgandam omnem colluviem, et farraginem herbarum, et lapidum, et aliarum eiusmodo sordium, e portu pridem deserto, aut stagno* (BESSON 1578).

Za pomocą maszyny można było oczyszczać zamulone oraz kopać nowe baseny portowe, zgarniając muł, kamienie i ziemię warstwa po warstwie. Przed pogrążeniem się w bagiennym gruncie zabezpieczały pływaki w postaci czterech pustych w środku beczek. Urządzenie było przemieszczane za pomocą dwóch stacjonarnych kołowrotów znajdujących się na przeciwległych brzegach i utwierdzonych w podłożu (na rysunku widać kołowrót z prawej strony i fragment kołowrotu z lewej strony). Napęd łyżki zgarniającej odbywał się przez trzeci kołowrót



Rys. 3-106. Pogłębiarka kołowa z napędem deptakowym według Pseudo-Juanelo Turriana (1595 ±10) (NORDON 1986): a - widok ogólny, b - odbiór urobku

znajdujący się na pokładzie pogłębiarki. Użytkowanie maszyny wymagało synchronizacji trzech dwuosobowych zespołów robotników (dwóch przy kołowrotach na przeciwnych brzegach i jednego na pogłębiarce).

Pseudo-Juanelo Turriano w dziele *Los veinte y un libros de los ingenios, y máquinas [...]*²²⁹ z 1595 ±10 roku zamieścił sześć rysunków przedstawiających pogłębiarki i ich napędy (ARS MECHANICAE... 2008). Do ciekawszych rozwiązań należy pogłębiarka przedstawiona na rysunku 3-106. Zasadę jej napędu przedstawiono na rysunku 3-106 a. Pogłębiarka miała budowę dwukadłubową, obydwa kadłuby były połączone poprzeczkami (widocznymi w lewej części rysunku 3-106 a). Koło czerpakowe, służące do wydobywania urobku, napędzane dwuosobowym kołem deptakowym przez przekładnię było umieszczone pomiędzy kadłubami. Nowoczesna przekładnia walcowa łącząca oba koła miała stosunkowo duże przełożenie (42:8). Obydwa koła były osadzone na wałach; każdy z końców wałów (koła czerpakowego i deptakowego) opierał się na solidnej drewnianej ramie, w którą był wyposażony każdy z kadłubów.

Sposób odbioru urobku przedstawiono na rysunku 3-106 b. Do tego celu służyła przymocowana do pogłębiarki dodatkowa łódź z dwuosobową załogą. Urobek był odbierany do pojemnika umieszczonego w łodzi.

Na rysunku 3-106 a widoczny jest operator sondujący głębokość wody. Pogłębiarka przemieszczała się samoczynnie, napędzana kołem czerpakowym, rolę załogi łodzi do odbioru urobku było jej sterowanie.

3.6. Wybrane maszyny energetyczne z drewna

Realista zwykł zaczynać nie od poszukiwania tego, co by tu zrobić, aby było doskonałe, lecz od tego, jak i o ile zmienić to, co jest, aby zastaną rzeczywistość przystosować do nabrzmiałej potrzeby
(Tadeusz Kotarbiński, 1886-1981)²³⁰

Maszyny energetyczne to urządzenia służące do zmiany wartości tzw. *termodynamicznych funkcji stanu*. Zmieniają one takie parametry obiektów,

²²⁹ *Dwadzieścia jeden ksiąg o urządzeniach i maszynach*. Pełny tytuł dzieła zamieszczono w przypisie 279 na s. 348.

²³⁰ KOTARBIŃSKI (1991).

jak: liczność materii, temperatura, ciśnienie, objętość. Do grupy maszyn energetycznych zaliczają się m.in. pompy wodne, piece hutnicze i aparatura chemiczna. Zastosowanie drewna do budowy maszyn energetycznych postanowiono przybliżyć na przykładzie „mechanicznej” aparatury chemicznej.

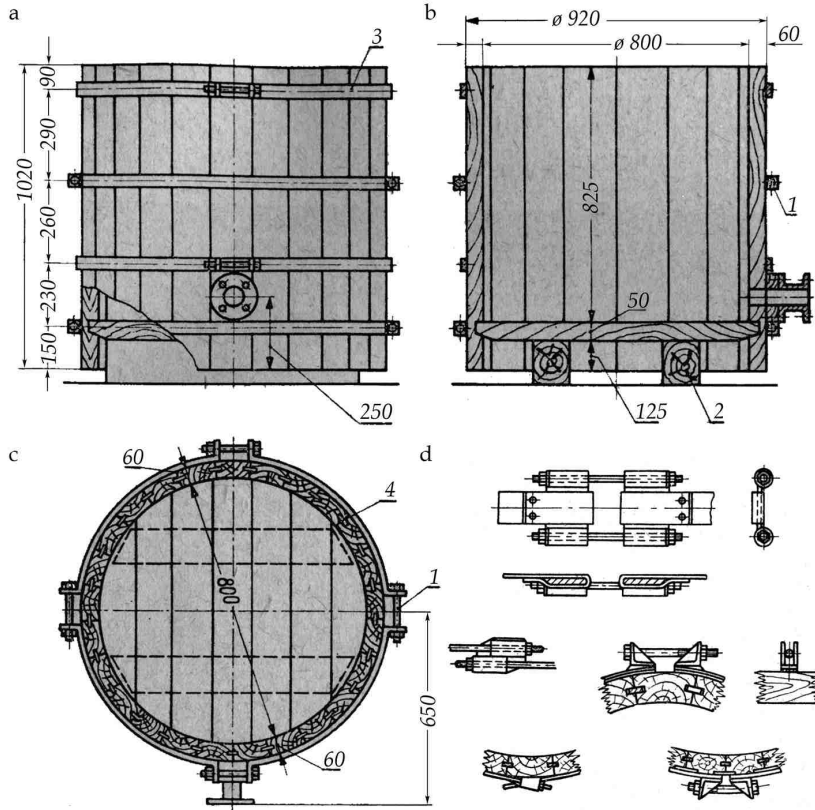
Od początków nowoczesnej chemii drewno było jednym z podstawowych tworzyw do budowy aparatury chemicznej. W miarę opracowywania nowych materiałów zeszło na dalszy plan, utrzymując jednak długo swoją pozycję w przemyśle spożywczym, w pralniach przemysłowych oraz w produkcji barwników, gdzie odporność tego materiału na substancje chemiczne, łatwość kształtowania i dostępność stanowiły największe jego zalety. W latach dwudziestych XX wieku podjęto szereg prac, których celem było rozszerzenie zakresu stosowania drewna poprzez jego uszlachetnienie tworzywami sztucznymi. Szczególną uwagę zwrócono na bakelizowanie²³¹ (zastosowanie drewna bakelizowanego w lotnictwie opisano na s. 183). W latach czterdziestych XX wieku, z uwagi na pojawienie się trudności surowcowych, zwiększyło się zainteresowanie drewnem jako tworzywem mogącym w pewnych zastosowaniach zastąpić kwasoodporne stale w przemyśle chemicznym, szczególnie w środowiskach niekorzystnie oddziałujących na metale.

W Polsce do budowy aparatury chemicznej używano głównie drewna drzew gatunków rodzimych. Najbardziej cenione, z racji swojej odporności, było drewno modrzewiowe²³². Wykorzystywano też drewno dębu i sosny, a poza tym buku, grochodrzewu, jesionu, klonu, świerka i jodły. Zakres zastosowania drewna był bardzo szeroki, było to tworzywo najbardziej uniwersalne ze wszystkich używanych w tej dziedzinie. Najważniejszymi czynnikami ograniczającymi użycie drewna były temperatura i ciśnienie. Szkodliwym wpływom środowiska chemicznego zapobiegano przez uszlachetnianie drewna. W silnie korozyjnych środowiskach zakres zastosowania drewna ograniczano do materiału na szkielet konstrukcyjny, a elementy stykające się z substancjami chemicznymi wykonywano w formie okładzin stalowych, ołowianych, winidurowych, opanolowych itp.

²³¹ Metoda bakelizowania drewna jest znana od początku XX wieku: *W roku 1900 P. Bevier opracował metodę nasycania drewna mieszkanką kreozytu, formaldehydu i żywicy formaldehydowo-fenolowej. Nasycanie prowadził w temp. 150°C i ciśnieniu 0,9-1,0 MPa, utwardzanie żywicy przeprowadzano w drewnie* (KSIĄŻKIEWICZ 1954).

²³² Drewno modrzewiowe w odpowiednio niskiej temperaturze (2°C) wytrzymuje nawet działanie 15-procentowego kwasu solnego.

Na rysunku 3-107 pokazano przykład kadzi drewnianej z klepek oraz sposoby łączenia bandaży opasujących.

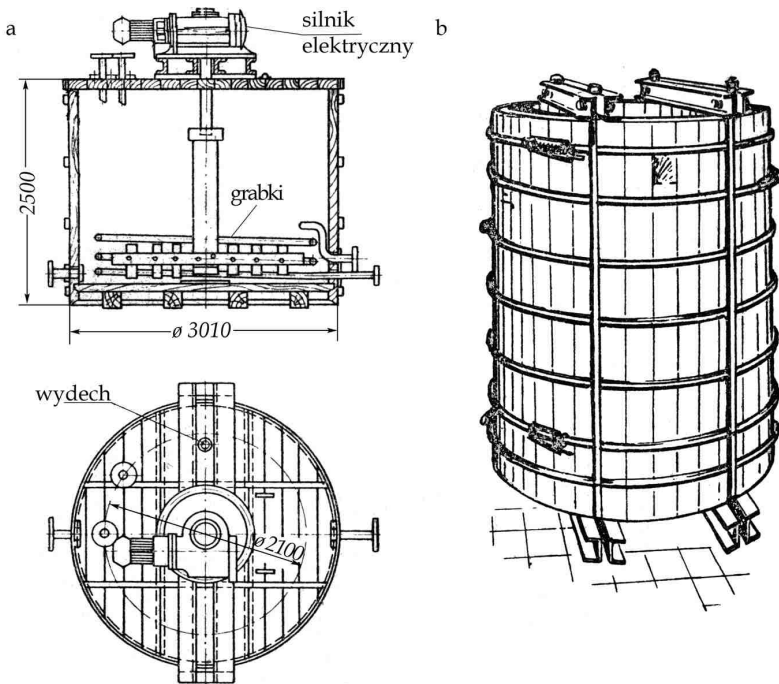


Rys. 3-107. Kadź cylindryczna z drewna dębowego: a-c - rzuty (1 - połączenie bandaża, 2 - legar, 3 - bandaż, 4 - korpus z klepek), d - sposoby łączenia bandaży

Ze względu na konieczność operowania podczas budowy aparatury chemicznej wieloma drobnymi częściami drewnianymi łączono je, stosując typowe połączenia stolarskie (np. kołkowe na styk, na wpust, palisadowe, na obce pióro, klejone itp.) oraz metalowe wzmocnienia. Z uwagi na występujące pod wpływem zmian wilgotności na przemian okresy pęcznienia i kurczenia się drewna, połączenia uszczelniano trzcina, mackuchami oraz innymi szczeliwami (stosowano różnego rodzaju kity: paki

i asfalty – pochodne ropy naftowej, szczeliwo bakelitowe z żywicy rezolowej, ozokeryt, tłuszcze wulkanizowane, faktys, żywicę rezolową z różnego rodzaju wypełniaczami itp.).

W kadziach drewnianych często instalowano drewniane mieszadła grabkowe przeznaczone do mieszania ciężkich i gęstych osadów. Przykład takiej kadzi z mieszadłem przedstawiono na rysunku 3-108 a. Część roboczą mieszadła stanowiły łopatkki umocowane kołkami prostopadle do dna kadzi.



Rys. 3-108. Kadzie ciśnieniowe: a – kadź z mieszadłem grabkowym, b – montaż pracujący z nadciśnieniem 0,25 MPa (2,5 atm)

Do mieszania gęstych zawiesin, z dość łatwo opadającym osadem, stosowano drewniane mieszadła ramowe, a do mieszania cieczy lekkich – mieszadła łopatkowe. Wytwarzano je z drewna sosnowego i świerkowego. Problem stanowiło zawieszenie mieszadła. Z reguły opierano je na łożysku oporowym umieszczonym na dnie kadzi lub zawieszano na górnym łożysku przymocowanym do górnej części kadzi. Obciążenie

kadzi ciężarem statycznym i reakcjami dynamicznymi pochodzącymi od mieszańca prowadziło do przyspieszonego jej niszczenia na skutek drgań i znacznych obciążeń mechanicznych, źle wpływających na szczelność klepek, dlatego czasem zawieszenie mieszańca i jego napędu wykonywano w sposób niezależny od kadzi (bez obciążania jej konstrukcji).

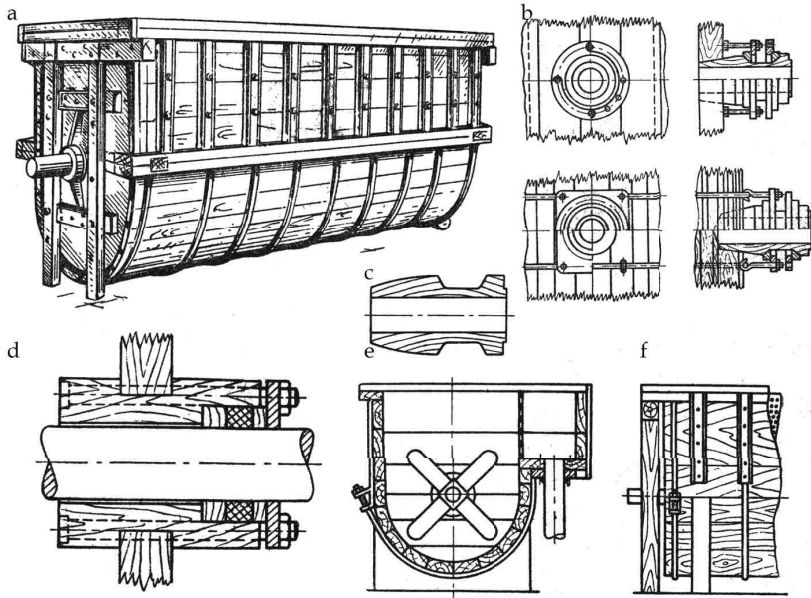
Na ogół urządzenia drewniane bardzo rzadko pracują z nadciśnieniem, jednak nawet w takich zastosowaniach dla pewnych substancji chemicznych drewno okazywało się właściwym tworzywem. Na rysunku 3-108 b przedstawiono monteżus o ciśnieniu roboczym 0,25 MPa. Naczynie było wykonane jako niewielka kadź cylindryczna zamknięta z obu stron dennicami, którym odpowiednią wytrzymałość zapewniały stalowe jarzma w formie dwuteowników ściągniętych nakrętkami nakręconymi na nagwintowane pręty.

Koryta drewniane z mieszańcami (tzw. *mieszalniki korytowe*) stosuje się w przemyśle spożywczym, chemicznym czy rolnictwie. Wykonywano je w formie odkrytych zbiorników o kształcie półwalca (rys. 3-109 a). Posadowione były na profilowanych drewnianych legarach wyciętych w kształcie dna koryta. Drewniany korpus koryta był stężony metalowymi ściągnaczami. Łożyskowanie mieszańca było umieszczone na zewnątrz w konstrukcji nośnej przymocowanej do boków koryta, elementem uszczelniającym była drewniana dławica (rys. 3-109 d). Tarcza dławicy umieszczona na wale od strony koryta zabezpieczała przed nadmiernym naporem masy znajdującej się w mieszalniku. Mieszalniki korytowe mogły być wykonywane z drewna bakelizowanego lub naturalnego. Krawędzie klepek były uszczelniane szczeliwami²³³.

Umocowanie króćców (rys. 3-109 b) w urządzeniach drewnianych stanowiło pewien problem konstrukcyjny. Początkowo stosowano króćce drewniane (rys. 3-109 c), w późniejszym okresie bakelizowane.

Typowy króciec dzielił się na dwie części: (1) stożkową, umożliwiającą zaklinowanie go w drewnianej ścianie i uszczelnienie, oraz (2) cylindryczną, zakończoną kołnierzem, na który zazwyczaj zakładano dzielone metalowe pierścienie mocujące. Jeżeli średnica króćca nie przekraczała 120 mm, wykonywano go z jednego kawałka drewna na tokarce. Króćce

²³³ Przedstawiony na rysunku 3-109 mieszalnik był przeznaczony do pracy w trybie ciągłym, istniały jeszcze odmiany do mieszania „szarży”, np. przeznaczone do rozprowadzania mokrego osadu z wodą, który był następnie wydalany na zewnątrz.

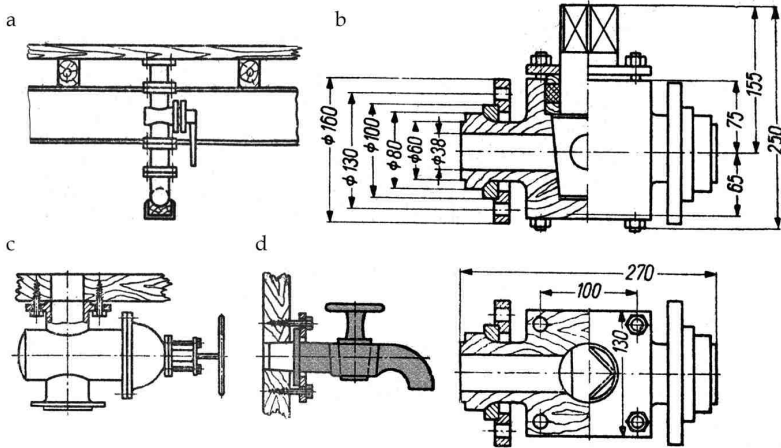


Rys. 3-109. Koryta drewniane: a - z mieszadłem, b - sposób zamocowania króćców, c - króciec drewniany, d - dławica uszczelniająca, e-f - koryto z mieszadłem i przelewem (dwa rzuty)

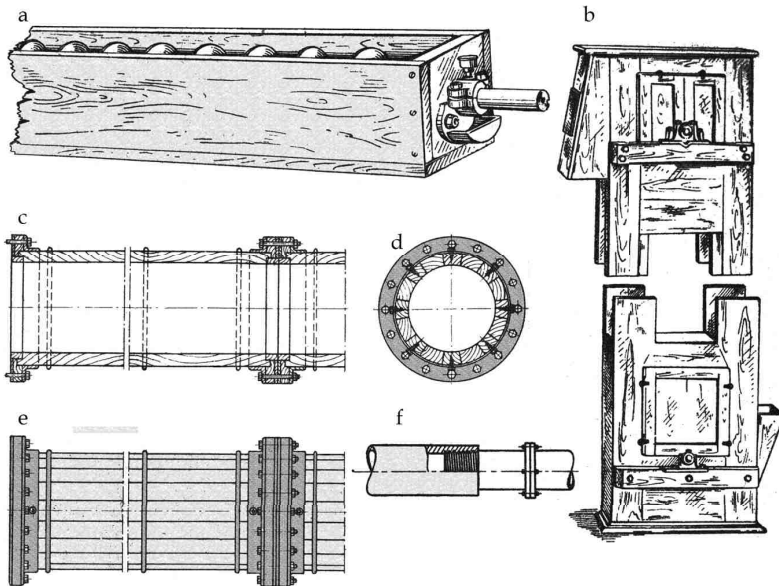
o większych średnicach wykonywano z klepek, ściągając je pierścieniami lub obręczkami z drutu.

Zawory i kurki montowano w sposób identyczny jak króćce. Na rysunku 3-110 d przedstawiono sposób mocowania kurka kamionkowego oraz zasuwę na drewnianych ścianach urządzeń. Pokazane tam sposoby łączenia za pomocą wkrętów zastępowano często łączeniem na śruby przelotowe. Na rysunku 3-110 a przedstawiono sposób mocowania metalowego zaworu w drewnianej ścianie.

Podobnie jak króćce, również kurki mogły być wykonywane w całości z drewna bakelizowanego. Na rysunku 3-110 b przedstawiono kurek tego rodzaju. Zarówno korpus, jak i czop kurka wykonane były w całości z drewna. Kołnierze oraz kryza dławikowa były wykonane z metalu lub z tworzyw sztucznych. Kurki z drewna są o tyle niezwykle, że materiał ten stawia w takim zastosowaniu spore wyzwanie konstruktorowi. Podczas zmian objętości drewna pod wpływem wilgoci, kurek może przeciekać lub zacinać się.



Rys. 3-110. Kurki: a – sposób mocowania ścianki drewnianej metalowego zaworu, b – całkowicie drewniany zawór (dwa rzuty), c – sposób mocowania zasuwki, d – sposób mocowania kurka kamionkowego



Rys. 3-111. Urządzenia do transportu bliskiego: a – obudowa przenośnika ślimakowego, b – obudowa przenośnika kubelkowego, c-e – rury drewniane samouszczelniające się (trzy rzuty), f – sposób łączenia rury drewnianej z rurą metalową

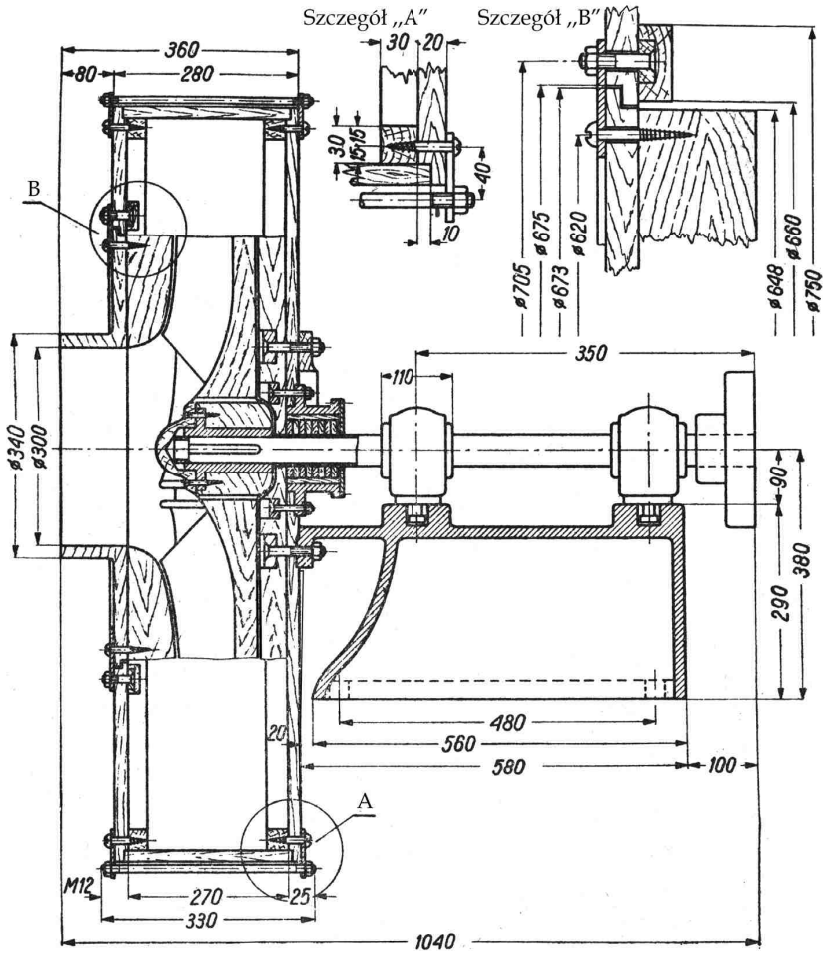
Tworzywa drzewne wykorzystywano nie tylko na elementy wykonawcze mechanizmów, powszechnie stosowano je także na różnego rodzaju obudowy urządzeń mechanicznych. Można tu wymienić obudowy młynów, sortowników, podnośników, zestawów sit i przenośników. Na rysunkach 3-111 a i b przedstawiono przykłady urządzeń do transportu bliskiego z obudowami drewnianymi. Obudowy drewniane stosowano często z uwagi na małe przewodnictwo ciepła przez drewno (np. do obudowy wyparek stosowanych w cukrownictwie).

Specyficzne zagadnienie w konstrukcjach urządzeń przemysłowych drewnianych stanowią rury drewniane. Zastosowanie tego typu rur to najprawdopodobniej najstarszy sposób transportu cieczy za pomocą rurociągów. Historia wykazała wprost niewiarygodną trwałość rur drewnianych w odpowiednich warunkach. Najprostszą rurą był wydrążony pień drzewa. Grubość ścianek w takiej rurze musiała być dość duża, a wewnętrzna średnica takich rur rzadko przekraczała 30 cm. Odcinki rur drążonych były stosunkowo krótkie (zwykle 1,5-2 m), zarówno ze względu na trudności w wierceniu, jak i z powodu naturalnej zbieżystości pni; łączono je za pomocą kryz metalowych²³⁴. Większe średnice wewnętrzne zapewniały rury z klepek. W tym przypadku pojawiały się jednak trudności w uszczelnianiu. Przekrój rury drewnianej z klepek opasanej metalowymi kłami pokazano na rysunkach 3-111 c, d, e.

Ekshaustory drewniane (rys. 3-112) były stosowane do usuwania wyziewów chemicznych. Części wewnętrzne, takie jak: wlot gazów, prowadnica i tarcza wirnika wykonywano w całości lub sklejało z kawałków litego drewna bakelizowanego. Odpowiednio ukształtowane łopatki wirnika są zamocowane za pomocą wpustów na jego tarczy. Wirnik był osadzony na stalowym wale łożyskowanym zewnętrznymi łożyskami kulkowymi.

Pokazany na rysunku 3-112 przykład drewnianej konstrukcji ekshaustora świadczy o dużych możliwościach zastosowania drewna do budowy nawet złożonych urządzeń mechanicznych. Ekshaustor składa się z kilkudziesięciu dopasowanych do siebie części. Wszystkie mocno mechanicznie obciążone podzespoły są wykonane z metalu, jednak obudowa i wirnik są drewniane.

²³⁴ Jak podaje KRÜNITZ (1773-1795) w swojej słynnej encyklopedii: *stosowanie rur metalowych do wody jest niemożliwe, bo je ukradną*.



Rys. 3-112. Ekshaustor drewniany

3.7. Niektóre drewniane instrumenty muzyczne

Harmonia jest niejasnym i trudnym obszarem muzyki
(Witruwiusz, ok. 70/80-ok. 25 p.n.e.)²³⁵

3.7.1. Wykorzystanie akustycznych właściwości drewna

Instrument muzyczny jest rodzajem maszyny przekształcającej energię elektryczną, pneumatyczną lub mechaniczną w energię fal dźwiękowych. Aby urządzenie można było zakwalifikować jako instrument muzyczny, musi on mieć zdolność kontrolowanej emisji dźwięku o odpowiedniej sile, a jego poszczególne dźwięki powinny się zawierać w pewnych ściśle zdefiniowanych zamkniętych przedziałach częstotliwości. Elementem wykonawczym każdego instrumentu jest co najmniej jedna drgająca część sprężysta, tzw. *wibrator*. Wibratorem może być ciało stałe lub słup powietrza. W zależności od rodzaju konstrukcji instrumenty muzyczne zwykle dzieli się na pięć grup:

- instrumenty strunowe - chordofony,
- instrumenty dęte - aerofony,
- instrumenty membranowe - membranofony,
- instrumenty samobrzmiące - idiofony,
- instrumenty elektroniczne - elektrofony.

We wszystkich pięciu grupach wykorzystywane jest drewno: w instrumentach strunowych - na elementy wykonawcze (wibratory), w pozostałych grupach - głównie na obudowy. Najliczniejsza jest grupa instrumentów strunowych, należą do niej instrumenty smyczkowe, szarpane i uderzane (w tym klawiszowe - SIKORSKI 1932). We wszystkich grupach wykorzystywane są unikalne akustyczne właściwości drewna (opisane na s. 45 i kilku dalszych).

Wibratorem odpowiadającym za wzmacnianie i emisję dźwięku instrumentów strunowych jest płyta rezonansowa. Płyta rezonansowa gitar akustycznych, mandolin, skrzypiec, wiolonczel, kontrabasów, pianin i fortepianów prawie zawsze jest zbudowana z drewna świerkowego. Ma ona formę sprężystej, podatnej membrany, tym lepiej spełniającej swoją funkcję, im większa część energii strun zostaje wypromieniowana

²³⁵ Tłumaczenie M.S. Oryginalny tekst łaciński brzmi: *Harmonia autem est musica litteratura obscura et difficilis* (WITRUWIUSZ 27-13 p.n.e., Liber V, Capitulum 4).

w postaci dźwięku. Materiał płyty powinien mieć silne tłumienie przez promieniowanie i słabe tłumienie wewnętrzne, czyli powinien mieć dużą sprężystość i małą gęstość. Metale, pomimo jednorodności budowy i dużej wartości modułów sprężystości (liniowego i objętościowego), nie nadają się na tworzywo płyt rezonansowych z powodu zbyt dużego ciężaru właściwego. Doświadczenia dowiodły, że płyty metalowe mają tak dużą bezwładność spowodowaną swoją znaczną masą, że do wzbudzenia drgań przekładających się na odpowiednio donośny dźwięk potrzebują większej energii niż jest w stanie dostarczyć drgająca struna, wskutek czego płyta metalowa (stalowa, miedziana bądź aluminiowa) wytwarza szybko gasnący dźwięk. Oprócz tego membrany metalowe zachowują widmo charakterystyczne dla metali o tępym, nieprzyjemnym dla ucha brzmieniu. Tylko drewno daje zadowalające rezultaty jako materiał rezonansowy. Drewno ma jeszcze jedną przewagę nad innymi materiałami, wynikającą z jego budowy wewnętrznej – naturalną zdolność pochłaniania ostrych, nieharmonicznych, drażniących ucho alikwotów²³⁶, a wzmacniania harmonicznych, przyjemnych dla ucha dźwięków (FADIEJEW i AŁŁON 1990).

Najbardziej cenionym materiałem rezonansowym jest wąskosłoiste, pozbawione anatomicznych i technologicznych wad²³⁷ drewno świerków rosnących w górach (np. świerk sitkajski). Z powodu surowych warunków klimatycznych i ubogiej gleby takie drewno ma niewielkie i równomierne (równe na całym obwodzie) przyrosty roczne. Szczególnie cenione jest drewno tzw. *świerka falistosłoiściego* (KRZYSIK 1975). Ten ekotyp świerka pospolitego jest spotykany w drzewostanach górskich w określonym zakresie wysokości (800-1200 m n.p.m. – czyli w górnej części regla dolnego i w reglu górnym), ma on słoje tworzące charakterystyczne wgłębienia wzdłuż promieni rdzeniowych, co powoduje ich wybitnie falisty zarys. Jak podaje KRZYSIK (1975), w świerkowym drewnie rezonansowym (o dużej sprężystości) udział drewna późnego powinien mieścić się w granicach 20-25% (zwykle jest mniejszy), a średnia gęstość drewna powinna wynosić 0,40-0,45 g/cm³ (świerk „zwykły”: 0,30-0,64 g/cm³). Głównym wskaźnikiem jakości drewna rezonansowego jest równomierna szerokość i regularność układu słoje rocznych. Duża zmienność szerokości słoje zmniejsza zdolność drgań sprężystych, a więc wpływa na zmniejszenie tłumienia przez promieniowanie. W drewnie rezonansowym dopuszcza się różnice w szerokości słoje do 2 mm na dwóch sąsiednich centymetrach,

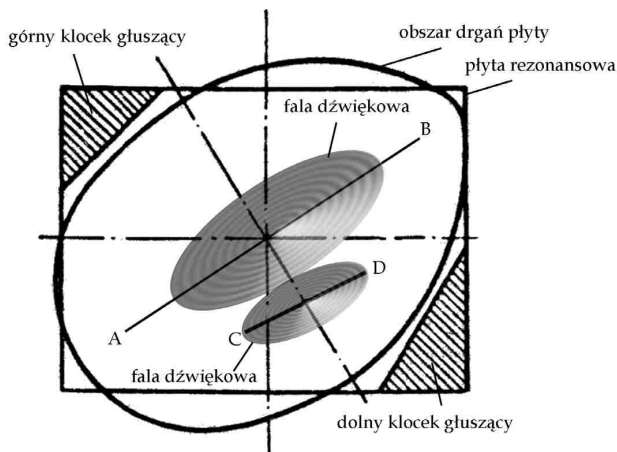
²³⁶ Alikwot – ton składowy dźwięku decydujący o jego barwie.

²³⁷ Vide opis typowych wad drewna na s. 94 i dalszych.

a do 3 mm na całej szerokości deski. Drewno wąskosłoiste lepiej „oddaje” tony wyższe i jest szczególnie cenione w budowie instrumentów z rodziny skrzypiec.

Najważniejszymi wadami pogarszającymi właściwości akustyczne drewna rezonansowego są: duża żywiczność, twardzica i skręt włókien. W zastosowaniach rezonansowych drewno drzew starszych uchodzi za lepsze od drewna drzew młodych – najbardziej poszukiwane jest drewno z drzew o zamierającym stożku wzrostu. Drewno przeznaczone na płyty rezonansowe po wysezonowaniu poddaje się próbie akustycznej, określając jakość dźwięku i czas trwania wibracji. Główny ton deski decyduje w zasadzie o przyszłym brzmieniu instrumentu. Deska o dźwięku jasnym, silnym i długotrwałym (małe wewnętrzne tarcie) szczególnie nadaje się na płyty rezonansowe (KRZYSIK 1975).

Najprostszą formą płyty rezonansowej jest prostokąt, w którym deseczki są ułożone wzdłuż przebiegu strun. Z punktu widzenia zastosowania drewna na elementy emitujące dźwięk główną jego wadą jest anizotropia właściwości akustycznych. Wzdłuż włókien gatunków iglastych drgania dźwiękowe rozchodzą się z prędkością do 5500 m/s, natomiast w poprzek prędkość ta jest trzykrotnie mniejsza. Oznacza to, że przy pobudzeniu przez struny płyty rezonansowej czoło przebiegającej w niej fali przyjmuje kształt elipsy (rys. 3-113).



Rys. 3-113. Kształt roboczej części płyty rezonansowej (na przykładzie fortepianu): AB – oś mostka wiolinowego, CD – oś mostka basowego

Grubość płyt rezonansowych współczesnych instrumentów smyczkowych i gitar wynosi 2,5-9,0 mm. Płyta rezonansowa fortepianów osiąga największe wymiary: grubość – do 16 mm, długość – 500-2200 mm z włóknami ułożonymi wzdłuż strun. Z uwagi na wspomnianą anizotropię drewna i duże różnice w prędkości rozchodzenia się fal w różnych kierunkach konstrukcja płyty rezonansowej jest taka, aby umożliwić szybkie i równomierne rozłożenie energii drgań na całej płycie i w następstwie równomierne promieniowanie jej całej powierzchni (BIEŃ 2008). W płytach rezonansowych wszystkich instrumentów strunowych na odwrocie płyt nakleja się prostopadłe do włókien szereg giętkich, prostosłojowych klocków – tzw. *zeber*, których końce dochodzą do skrajów płyty. Żebra przyspieszają propagację drgań ze środka do obrzeża płyty. Działanie żeber znacznie zmienia charakter rozchodzenia się fal dźwiękowych w płycie rezonansowej, rozszerzając elipsę do formy zbliżonej do okręgu²³⁸ (FADIEJEW i AŁŁON 1990). Dwa przeciwległe narożniki fortepianowej płyty rezonansowej (rys. 3-113), wychodząc poza kontur zaznaczonej na rysunku „elipsy drgań”, mają niekorzystne działanie akustyczne. Celem likwidacji szkodliwego wpływu naroży na jej odwrocie są przyklejone klocki głuszące, górny i dolny. Wyłączone przez nie z pracy powierzchnie płyty nie powodują strat energii drgań strun.

Jak wspomniano, dla konstruktorów instrumentów strunowych najważniejszym problemem do rozwiązania jest uzyskanie takiej formy płyty, która umożliwi szybkie i równomierne rozłożenie energii drgań na całej płycie i w następstwie równomierne promieniowanie całej powierzchni płyty z odpowiednimi udziałami poszczególnych, pożądanых częstotliwości. W fortepianach eksperymentowano z różnymi układami konstrukcyjnymi płyt rezonansowych. Zasadą jest, że deski na płyty rezonansowe przeciera się w płaszczyźnie podłużnej promieniowej (w taki sposób, aby linie słoï rocznych widoczne na powierzchniach desek tworzyły linie równoległe – płaszczyzna cięcia przechodzi przez rdzeń). FADIEJEW i AŁŁON (1990) wyróżniają cztery różne układy fortepianowych płyt rezonansowych:

- według szerokości słoï,
- symetryczny,
- jednorodny ze środkowym łączeniem,
- jednorodny ze stałą akustyczną.

²³⁸ Podobne rozwiązania stosuje się w gitarach akustycznych. Układy konstrukcyjne płyt współczesnych gitar przedstawiono na rysunku 4-3 na s. 312.

Układ według szerokości słoï

Z uwagi na to, że: (1) drewno wąskosłoïste wykazuje się lepszym rezonansem przy wysokich częstotliwościach, a (2) drewno szerokosłoïste lepiej rezonuje przy niższych częstotliwościach, podczas budowy płyty deseczki układa się w taki sposób, aby te z najszerszymi słoïjami (4-5 mm) znalazły się na skraju, za mostkiem basowym. Następnie stopniowo doбира się deski o coraz mniejszej szerokości słoï, tak aby w pobliżu mostka wiolinowego ich szerokość wynosiła 0,8-1,0 mm.

Układ symetryczny

W środku płyty rezonansowej (pod mostkiem wiolinowym) umieszcza się najszerszą i najbardziej szerokosłoïstą deskę, a po obu jej stronach – deski ze stopniowo zmniejszającą się szerokością słoï. W ten sposób uzyskuje się symetryczny rozkład zmienności szerokości słoï na całej płycie.

Układ jednorodny ze środkowym łączeniem

Przy przecieraniu drewna deski pochodzące z jednej kłody kompletuje się, nie dopuszczając do ich przemieszania z deskami z innych kłód. Deski przeciera się na podwójną grubość przyszłej płyty rezonansowej z uwzględnieniem koniecznych naddatków na rzaży i obróbkę wykańczającą (35 mm). Sklejona z takiego kompletu płyta o szerokości połowy przyszłej płyty rezonansowej jest następnie rozcinana poprzecznie na dwie części, które są sklejane brzegami. W takim przypadku uzyskuje się płytę złożoną z dwóch identycznych „półpłyt”.

Układ jednorodny ze stałą akustyczną

Do płyty doбира się deski z jednakowym współczynnikiem jakości akustycznej Andriejewa K (FADIEJEW i AŁŁON 1990).

$$K = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}$$

gdzie:

E - moduł sprężystości liniowej przy zginaniu statycznym, [10³ kG/cm²],

ρ - ciężar właściwy [g/cm³].

Za optymalną wartość współczynnika przyjęto stałą na poziomie 1200 i więcej. Płyty zbudowane tą metodą mają najlepsze charakterystyki akustyczne, jednak przeszkodą w jej powszechnym stosowaniu są czasochłonność i trudność wykonania szeregu pomiarów właściwości materiałowych wszystkich desek.

3.7.2. Skrzypce

Najbardziej znanym rodzajem instrumentu smyczkowego są skrzypce. Ich konstrukcja wywodzi się od wielu instrumentów istniejących wcześniej (fidel, rebek, gęśliki podhalańskie, tzw. *polskie skrzypce*, renesansowa rodzina viol da braccio i in.). Z powodu powolnej ewolucji konstrukcji nie jest możliwe wskazanie ścisłej daty powstania nowoczesnych skrzypiec. Swój klasyczny kształt i walory dźwiękowe zawdzięczają one skrzypcowym szkołom lutniczym, których rozkwit przypadł na XVI i XVII wiek. Według FADIEJEWY i AŁŁONA (1990) antenatem wszystkich instrumentów strunowych był łuk myśliwski, do którego – celem wzmocnienia dźwięku – dodano pudło rezonansowe w formie naczynia. W późniejszych wiekach powstał instrument muzyczny, na którym można było wykonać melodię. Był nim antyczny, jednostrunowy monochord, którego skonstruowanie przypisuje się Archimedesowi. Podstawę monochordu tworzyła podłużna, drewniana skrzynka (pudło rezonansowe), na wierzchu której mocowano strunę. Za pomocą dwóch progów, osadzonych przy końcach korpusu, dzielono ją na część drgającą i bezdźwięczne końce. Część drgająca wydawała dźwięk o wysokości zależnej od masy struny i siły jej napięcia. Jeżeli trzeba było uzyskać wyższe tony, to pod struną stosowano dodatkowy przesuwany próg, który dzielił drgającą część na dwa odcinki. Przy szarpaniu struny z obu stron progu uzyskiwano wiele dodatkowych dźwięków. Jednak instrument z jedną struną miał niewielkie możliwości brzmieniowe. W prostej linii od monochordu pochodzi średniowieczna tubmaryna (XI-XII wiek), instrument smyczkowy mający również jedną strunę.

Najstarsze skrzypce powstały w latach 1520-1555, miały one trzy struny. Za twórcę czterostrunowych skrzypiec uznaje się Andreego Amatiego (ok. 1501-1577) z Cremony, który pierwsze egzemplarze zbudował w latach pięćdziesiątych XVI wieku. Najstarsze zachowane skrzypce pochodzą z lat sześćdziesiątych XVI wieku. Jedne z nich są przechowywane w National Music Museum w Vermilion, a drugie w Ashmolean Museum w Oksfordzie.

Korpus rezonansowy skrzypiec tworzą dwie drewniane płyty połączone boczками. Znajdująca się wewnątrz korpusu tzw. *dusza* łączy płyty rezonansowe górną (wierzchnią) i dolną. W płycie górnej znajdują się otwory rezonansowe (tzw. *efy*). Cztery struny naciągnięte są na strunociąg, podstawku, gryfie i kołkach. Powstawanie i emisja dźwięku skrzypiec następują w takiej kolejności:

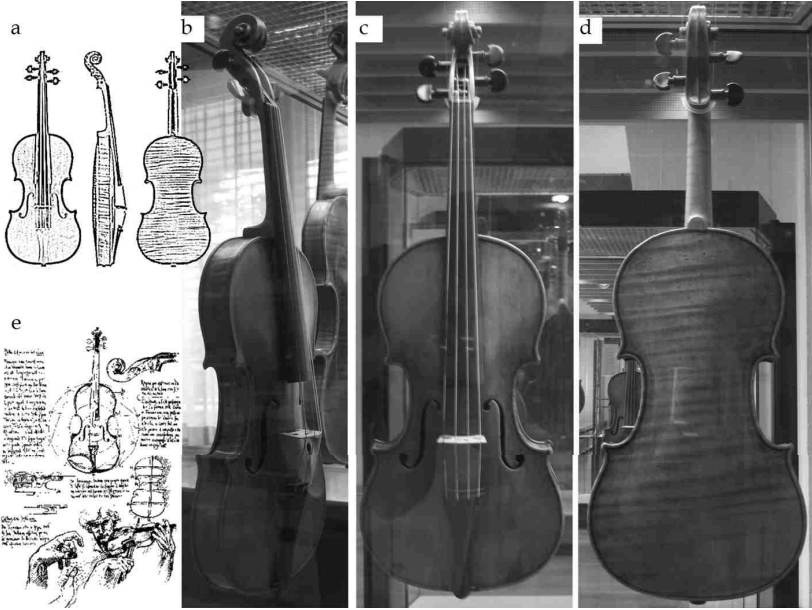
- drgania struny wzbudzone za pomocą smyczka przenoszą się na podstawek,
- z podstawka są przenoszone na wierzchnią płytę rezonansową (zamykającą pudło rezonansowe od góry),
- za pośrednictwem boczków i duszy drgania przedostają się na spodnią płytę,
- otwory w górnej płycie emitują dźwięk.

Okres baroku (XVII i XVIII wiek) jest czasem wzrastającej popularności instrumentu. Muzykę na skrzypce skomponowali tacy artyści tej epoki, jak: Giovanni Battista Somis, Francesco Geminiani, Carlo Ambrogio Lonati, Pietro Antonio Locatelli, Giovanni Fornari, Michele Mascitti, Pietro Castrucci i inni. Powstał szereg ośrodków lutniczych, największe z nich to:

- we Włoszech w Brescii i w Cremonie: szkoła bresciańska, XVI-XVII wiek (G. Bertolotti, G.P. Maggini), szkoła kremonońska, XVI-XVIII wiek (rodzina Amatic, rodzina Guarnerich, F. Ruggieri, G. Guadagnini, A. Stradivarius, C. Bergonzi, L. Storioni),
- w Wenecji: szkoła wenecka, XVI-XVIII wiek (S. Seraphin, F. Gobetti, D. Montagnana, rodzina Gaglianów, T. Eberle),
- w Niemczech: szkoła tyrolska z ośrodkiem w Mittenwald, XVII-XVIII wiek (J. Steiner, A. Alban, rodzina Klotzów),
- w Polsce w Krakowie i w Wilnie (XVI-XVII wiek): szkoła krakowska (rodzina Grobliczów, M. Dobrucki), szkoła wileńska (B. i J. Dankwartowie),
- we Francji znacznie większe warsztaty lutnicze powstały dopiero w drugiej połowie XVIII wieku, w Paryżu (C. Pierray, L. Guersan, J. Boquay, N.A. Chappuy, N. Lupot, J.B. Vuillaume, rodzina Gandów).

Najstarsze wzmianki o lutnikach polskich budujących skrzypce pochodzą z XV wieku (VOGEL 2007). Dotychczasowe teorie instrumentologiczne wskazywały na Włochy jako ojczyznę skrzypiec, natomiast badania SZULCA (1953) sugerują, że skrzypce powstały właśnie w Polsce i wywodzą się z polskiego instrumentarium ludowego. Teoria Szulca opiera się głównie na świadectwach teoretyków niemieckich z XVI i XVII wieku (M. Agricola, M. Praetorius) i dokumentach archiwalnych (wymieniających skrzypce polskie).

Skrzypce Stradivariusa (1644?-1737) to najprawdopodobniej najbardziej znane instrumenty muzyczne na świecie (rys. 3-114). Dzięki swojemu wyjątkowemu dźwiękowi zyskują na rynku olbrzymie ceny, dochodzące do kilku milionów dolarów za egzemplarz. Stradivarius wykonał ponad



Rys. 3-114. Skrzypce Stradivariusa: a - szkic ukazujący wypukłość pudła rezonansowego, b-d - egzemplarz z 1703 roku (berlińskie Musikinstrumenten-Museum), e - kartka z notatnika Stradivariusa

1000 instrumentów, do naszych czasów przetrwało kilkaset. Pochodzą one z lat 1666-1737, w tym zdecydowana większość to skrzypce, ale jest też kilka altówek i kilkadziesiąt wiolonczel oraz dwie gitary i dwie mandoliny. W ostatnim dwudziestoleciu na publicznych aukcjach sprzedano kilkanaście instrumentów pochodzących z pracowni Stradivariiego. Osiągnęły one ceny od 200 000 do 3 500 000 dolarów, to (rekordową cenę zapłacono na aukcji w maju 2006 roku za skrzypce z 1707 roku²³⁹).

Płyty rezonansowe skrzypiec Stradivariusa były wykonywane ze świerku, boczne części pudła i gryf - z klonu, natomiast wewnętrzne części - z drewna wierzbowego²⁴⁰. Płyty rezonansowe jego instrumentów miały około 2,4 mm grubości (dla porównania: płyty współczesnych instrumentów mają 3 i więcej mm grubości). Już nawet pobieżne porów-

²³⁹ Źródło: BBC News z 17.05.2006 (news.bbc.co.uk).

²⁴⁰ Płyty rezonansowe współczesnych skrzypiec wykonuje się ze świerku (rzadziej z jodły), boczne części pudła - z klonu.

nianie skrzypiec Stradivariusa ze współczesnymi instrumentami pozwala stwierdzić, że płyta rezonansowa tych pierwszych ma większą wypukłość w środkowej części pudła. Bardziej szczegółowe badania wykazały, że płyty skrzypiec mają zmienną grubość. Nie wyjaśniono dotychczas w pełni sekretu brzmienia tego instrumentu. W trakcie badań jego akustyki stwierdzono, że drewno, z którego jest zbudowane pudło rezonansowe, charakteryzuje się większą zdolnością tłumienia niż drewno stosowane współcześnie. W porównaniu z innymi instrumentami formanty (obszary silnych wzmocnień) w instrumentach Stradivariiego są położone stosunkowo wysoko, w okolicach 3-4 kHz. Im gorszy instrument, tym niżej znajduje się jego główny formant. Charakterystyka odbioru dźwięku przez ludzkie ucho jest nieliniowa, człowiek najlepiej słyszy dźwięki o częstotliwości większej niż 3 kHz. Położenie formantów w najlepszych skrzypcach zgadza się więc z najlepszą słyszalnością u człowieka. W instrumentach Stradivariusa występuje zatem podwójne wzmocnienie dźwięku: rzeczywiste, wynikające z drgań płyty rezonansowej, oraz pozorne, wynikające z właściwości fizjologicznych ucha ludzkiego. Stwierdzono, że materiał skrzypiec zabytkowych wykazuje większy stopień tłumienia dźwięku niż materiały stosowane współcześnie, mimo to ich efekt akustyczny jest mniej więcej 30% większy niż efekt akustyczny przeciętnych skrzypiec, a ich dźwięki słychać nawet z odległości około 1 km (KRZYSIK 1975).

Według NAGYVÁRY'EGO (1996) skrzypce Stradivariusa swoje brzmienie mogą zawdzięczać „małej epoce lodowcowej”, którą Europa przeżywała od połowy XV do połowy XIX wieku. Spowodowała ona spowolnienie wzrostu drzew, w wyniku czego drewno mogło uzyskać unikatowe właściwości. Jednak w świetle najnowszych badań nie ma wystarczającego uzasadnienia tej hipotezy. Według GEISLERA i IN. (1998) tajemnica brzmienia skrzypiec Stradivariiego polega na wprowadzaniu w płycie rezonansowej wstępnego stanu naprężeń poprzez odpowiednie kierunki i wartości sił pochodzących od boczaków płyty. Na przestrzeni kilkuset lat podjęto wiele prób zbudowania skrzypiec grających tak jak słynne stradivariusy, kopiując dokładnie materiały, kształty i wymiary instrumentów zbudowanych przez słynnego Włocha, jednak nie uzyskiwano zadowalających efektów. Wymienieni autorzy uważają, że stosowana współcześnie technologia produkcji skrzypiec jest zła: od kilkuset lat boczki skrzypiec wyginane są na gorąco, co sprawia, że w pudle rezonansowym nie ma żadnych naprężeń poza naprężeniami od strun, a płyta rezonansowa jest swobodnie przyklejona do boczaków instrumentu. Tymczasem należałoby boczki skrzypiec wyginać na zimno. Wówczas po doklejeniu płyty

byłaby ona przez sprężyste boczki rozciągana, a to w pewnym stopniu skompensowałoby siłę ściskającą, z jaką na płytę oddziałują naprężone struny. GEISLER i IN. (1998) uważają, że w czasach Stradivariiego tak właśnie robiono. Zachowały się informacje, że Stradivari po kilka razy rozklejał i kleił na nowo swoje instrumenty, jeśli, jego zdaniem, nie brzmiały prawidłowo. W wyniku sztucznie wywołanych naprężeń montażowych zwiększa się stopień tłumienia wewnętrznego (logarytmiczny dekrement tłumienia), jednak takie naprężenia można wprowadzić tylko pod warunkiem zastosowania drewna o małym lub sztucznie zmniejszonym tarcu wewnętrznym; w przeciwnym razie straty na pokonanie tarcia byłyby zbyt duże. Wybrane do budowy skrzypiec drewno poddawano specjalnej obróbce przygotowawczej. Jak podaje KRZYSIK (1975), w drewnie skrzypiec zabytkowych znajduje się od 1,28 do 1,62% popiołu (głównie związków wapnia), natomiast w drewnie skrzypiec współczesnych – 0,18-0,42%. Na tej podstawie można przypuszczać, że jedną z operacji wstępnych przed sklejeniem instrumentu było moczenie drewna w wodzie wapiennej.

Po zbadaniu przez NAGYVARY'EGO (1996) spektrometrem podczerwieni drewna współczesnych skrzypiec i pięciu różnych instrumentów wykonanych w XVIII wieku okazało się, że pomiędzy klonem, z którego zbudował swe skrzypce Stradivari, a drewnem współczesnych skrzypiec istnieją bardzo niewielkie różnice anatomiczne. Wynikają one głównie z obróbki termicznej i chemicznej drewna (np. oksydacji i hydrolizy). Taka czynność miała za zadanie usunięcie z materiału robaków oraz grzybów, które stanowiły poważny problem dla producentów instrumentów. Ponadto gotowane w specjalnym roztworze drewno stawało się lżejsze, bardziej wytrzymałe i zmniejszały się jego właściwości higroskopijne. Każdy z mistrzów współczesnych Stradivariusowi używał własnej mieszaniny środków chemicznych. I to właśnie one spowodowały, że drewno używane przez różnych lutników ma inne właściwości. Antonio Stradivari, najprawdopodobniej metodą prób i błędów, trafił na wyjątkową mieszaninę chemikaliów. Tajemnica konstrukcji jego instrumentów, uznawanych dziś za niedościgniony wzorzec, polegała zatem na optymalnych proporcjach wymiarowych instrumentów oraz odpowiednim doborze i przygotowaniu drewna i lakieru. Skrzypce Stradivariiego stały się pierwszym w pełni koncertowym instrumentem smyczkowym, łączącym w sobie piękno i siłę dźwięku.

3.7.3. Fortepian

Fortepian jest najpopularniejszym instrumentem klawiszowym. Ma dużą skalę dźwięku, którą przewyższa jedynie skala organów, a ponadto wyróżnia się wielką ekspresją muzyczną. Duża dynamika uderzania w klawisze przez pianistów pozwala na uzyskanie różnicy poziomów głośności dźwięku rzędu 30-35 dB. Czas wybrzmiewania dźwięku, w zależności od jego wysokości i zastosowania bądź nie mechanizmu tłumiącego, wynosi od 0,2 do 50 s (odpowiednio dla bardzo wysokich i bardzo niskich dźwięków). Do 1840 roku możliwości dźwiękowe fortepianów wynosiły nieco ponad sześć oktaw (C1-E7), w 1855 roku zwiększono je do siedmiu (A0-A7). Po 1880 roku dodano jeszcze trzy górne klawisze i od tego czasu skala fortepianu przekracza siedem oktaw (A0-C8). Do każdej oktawy przypisano osiem białych klawiszy, które umożliwiają granie skali diatonicznej²⁴¹ i pięć podwyższonych klawiszy czarnych, umożliwiających odegranie skali chromatycznej²⁴². We wszystkich współczesnych fortepianach dźwięki nie są dokładnie dostrojone do skali diatonicznej, lecz do skali równomiernie temperowanej, w której oktawa jest podzielona na 12 równych interwałów.

Fortepian składa się z ponad 10 000 części (FADIEJEW i ALŁON 1990). Głównymi układami, z których zbudowany jest ten instrument, są: mechanizm klawiszowo-młoteczkowy, struny, płyta rezonansowa, konstrukcja nośna i obudowa. Typowy współczesny fortepian ma: klawiaturę liczącą 88 klawiszy (są także z 85 i 97 klawiszami – zależnie od skali instrumentu); mechanizm młoteczkowy; 243 struny o różnych długościach (od około 50 mm do 2 m): osiem pojedynczych strun owiniętych jedną lub dwiema warstwami drutu (zwykle miedzianego), pięć par strun także owiniętych drutem, siedem grup po trzy owinięte struny oraz 68 grup po trzy nieowinięte struny; strojnicę (wykonaną z twardego drewna lub metalu, do której przymocowane są struny); płytę rezonansową (zwykle wykonaną z drewna jodłowego lub świerkowego o grubości około 10 mm – maksymalnie 16 mm); obudowę drewnianą oraz ramę o odpowiedniej wytrzymałości²⁴³ wykonaną z żeliwa.

²⁴¹ W skali diatonicznej jedna oktawa podzielona jest na siedem kwint.

²⁴² Skala dwunastodźwiękowa – zwana też skalą dodekafoniczną lub chromatyczną, powstała na przełomie XIX/XX wieku. Nie posiada dźwięku podstawowego, jest więc atonalna, tzn. nie ma określonej żadnej tonacji.

²⁴³ W celu zapewnienia odpowiedniej głośności dźwięku sumaryczna siła naciągu wszystkich 243 strun wynosi 160-200 kN (1 kN ≈ 100 kg).

Fortepiany budowano w wielu przeróżnych formach: tradycyjnej, w kształcie skrzydła, prostokątnej, stojącej (fortepian lira, żyrafa, piramida), stołowej (były to często klawikordy²⁴⁴ z wmontowanym mechanizmem młoteczkowym), a nawet pośredniej, będącej kombinacją fortepianu z klawesynem²⁴⁵ lub klawikordem czy nawet z organami. Ciągłe starania o uzyskanie jak największej głośności fortepianu doprowadziły do momentu, w którym drewniano-metalowe ramy przestały wytrzymywać rosnące od coraz grubszych strun naprężenie. W 1855 roku amerykański wytwórca fortepianów niemieckiego pochodzenia Henry Steinway (z niem. Steinweg) wyprodukował pierwszy fortepian z całkowicie metalową ramą wykonaną z jednego odlewu (bez elementów drewnianych). Pomimo ciągłych udoskonaleń generalne zasady budowy fortepianów od tego czasu nie zmieniły się.

Potrzeba skonstruowania fortepianu była podyktowana chęcią zbudowania instrumentu pozbawionego ograniczeń klawikordu i klawesynu. Ani jeden, ani drugi nie oferował wykonawcy możliwości szybkich zmian barw dźwięku i wpływu na czas wybrzmiewania dźwięków. Co prawda w klawikordzie można było w bardzo niewielkim stopniu wpłynąć na dynamikę gry, jednak instrument ten nie był w stanie wydawać odpowiednio głośnych dźwięków. Próbowano, co prawda, instalować w klawikordzie grubsze struny, wymagające większej siły naciągu, jednakże próby te kończyły się niepowodzeniem, gdyż ówczesne mechanizmy

²⁴⁴ *Klawikord* – jeden z najbardziej rozpowszechnionych instrumentów klawiszowych epoki baroku, oparty na monochordzie, miał 9-20 strun i cztero-oktawową klawiaturę umożliwiającą grę dwiema rękami. Istotną wadą klawikordu było małe natężenie dźwięku. Instrument z 1543 roku przechowywany w Karl-Marx-Universität w Lipsku to najprawdopodobniej najstarszy zachowany klawikord. Jego pudło ma kształt sześciokąta, klawiatura wystaje z jednej strony instrumentu.

²⁴⁵ *Klawesyn* – największy instrument klawiszowy o strunach szarpanych za pomocą kolca, zrobionego ze stosiny pióra lub skóry. Miał duże pudło rezonansowe o kształcie zbliżonym do trójkąta i struny naciągnięte prostopadłe do klawiatury. Na każdą strunę przypadał osobny klawisz, a zakres dźwięków sięgał pięciu oktaw (FADIEJEW i ALŁON 1990). Pierwsze udane egzemplarze zbudowano we Włoszech w XVI wieku. Dzięki jasnemu, klarownemu dźwiękowi klawesyn stał się ulubionym instrumentem solowym w XVII wieku. Zbudowany w 1521 roku z drewna cyprysowego instrument Jeromego z Bolonii jest jednym z najstarszych zachowanych klawesynów (Victoria and Albert Museum, Londyn). Odmianą klawesynu jest klawicyterium (ang. *clavicytherium*), klawesyn z pionowym układem strun. Klawicyterium z końca XV wieku jest prawdopodobnie najstarszym zachowanym instrumentem klawiszowym ze strunami (Royal College of Music, Londyn).

młoteczkowe nie były dość dobre, a dodatkowo ramy instrumentów nie wytrzymały tak dużych naprężeń.

Fortepian został skonstruowany przez Włocha Bartolomea Cristoforiego di Francesco (1655-1731), który chciał stworzyć instrument głośniejszy od klawesynu i o dynamice podobnej do cymbałów. Cristofori swoją konstrukcję udoskonalił w latach 1698-1711. Około roku 1711 ukazał się szeroko rozpowszechniony entuzjastyczny artykuł autorstwa Francesco Scipione'go opisujący nowy instrument wraz ze schematem konstrukcyjnym. Wszyscy późniejsi konstruktorzy rozpoczynali swoją działalność od przeczytania tego tekstu. Nowatorskim elementem instrumentu Cristoforiego był oryginalny mechanizm młoteczkowy, umożliwiający grę z szeroką dynamiką, tzw. mechanizm *gravicembalo con piano e forte*. Wkrótce podobne mechanizmy powstały we Francji (J. Marius, 1716) i w Niemczech (G. Schroter, 1717). System Mariusa dał początek tzw. mechanice niemieckiej, a system Cristoforiego, ulepszony przez G. Sibermanna i J.Ch. Zumpego – angielskiej, obecnie stosowanej w pianinach.

Według niektórych autorów Cristofori mógł skonstruować swój instrument już w 1698 roku (BIEŃ 2008), a nie, jak się uważa, w 1709 roku (np. FADIEJEW i AŁŁON 1990). Z roku 1698 pochodzi rachunek wystawiony księciu Ferdynandowi Medycejskiemu przez pracującego wówczas we Florencji Cristoforiego. Jednak autentyczność tego dokumentu jest kwestionowana przez niektórych badaczy (np. przez POLLENSA 1995). Najbardziej prawdopodobny czas powstania pierwszego fortepianu to rok 1700, z tego roku pochodzi informacja o fortepianie ze spisu inwentarza znanej kupieckiej rodziny Medici²⁴⁶. Najprawdopodobniej pomysł zastosowania mechanizmu młoteczkowego Cristofori zaczerpnął z dulcimeru, ludowego instrumentu, w którym struny były uderzane młotkami trzymanymi przez grającego. W 1720 roku zaprezentowano fortepian z wieloma usprawnieniami, włącznie z zastosowaniem osobnych tłumików dla każdego dźwięku. Od terminów *piano* (cicho) i *forte* (głośno) instrument otrzymał w językach romańskich nazwy *pianoforte* lub *fortepiano*.

Niewątpliwie najciekawszymi z mechanicznego punktu widzenia elementami fortepianów są wykonane niemal wyłącznie z drewna układy przekazujące ruchy klawiszy na struny. Tak zwane mechanizmy

²⁴⁶ W inwentarzu znalazł się zapis: *Un Arpicembalo di Bartolomeo Cristofori di nuova inventione, ch fa' il piano, e il forte, a' due registri principali unisoni, con fond di cipresso senza rosa [...]*, co można przetłumaczyć jako: *Wielkie „Arpicembalo” wykonane przez Bartolomea Cristoforiego, nowy wynalazek, który gra delikatnie i głośno dwoma zestawami strun w jednym pudle, z płytą rezonansową z drewna cyprysowego* (GOOD 2005).

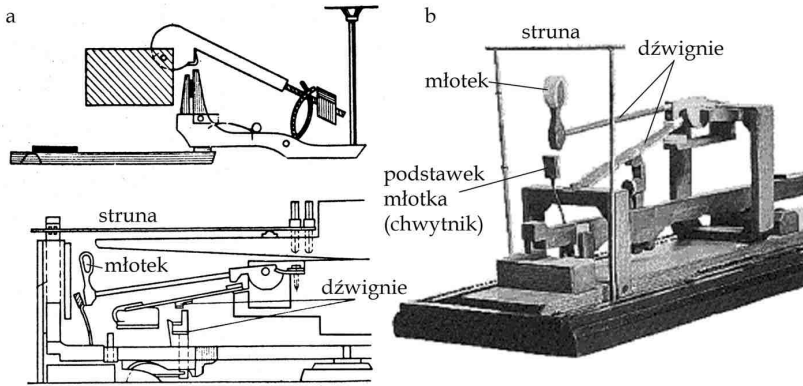
młoteczkowe mogą się składać z kilku tysięcy drewnianych i metalowych, ruchomych części. Liczne wczesne warianty konstrukcyjne mechaniki fortepianowej, takie jak mechanika Cristoforiego (ok. 1700), mechanika wiedeńska (ok. 1760), mechanika angielska (1770), klasyczna mechanika Erarda (1821) oraz inne mniej rozpowszechnione (np. mechaniki Hertza, Blüthnera), przeszły już dziś do historii. Od około 80 lat w fortepianach stosuje się wyłącznie różne odmiany mechaniki Erarda z podwójną repetycją; w zależności od producenta są one różnie nazywane (np. mechanika Rennera, steinwayowska itp.)²⁴⁷.

Ponieważ płyta rezonansowa z naciąganiem strunowym fortepianu jest ułożona w płaszczyźnie poziomej, mechanizm młoteczkowy jest również poziomy (w odróżnieniu od pionowego mechanizmu stosowanego w pianinach). W mechanice fortepianowej wszystkie dźwignie przekaznikowe po ruchu roboczym wracają do położenia wyjściowego głównie pod działaniem własnego ciężaru. Głównymi elementami mechaniki są: drewniana dźwignia klawiszowa (wyważona metalowymi ciężarkami), drewniany młoteczek uderzający w struny filcową główką (grubszą dla tonów niskich, a cieńszą dla wysokich), układ dźwigni pośredniczących pomiędzy klawiszem a młoteczką oraz układ tłumiący.

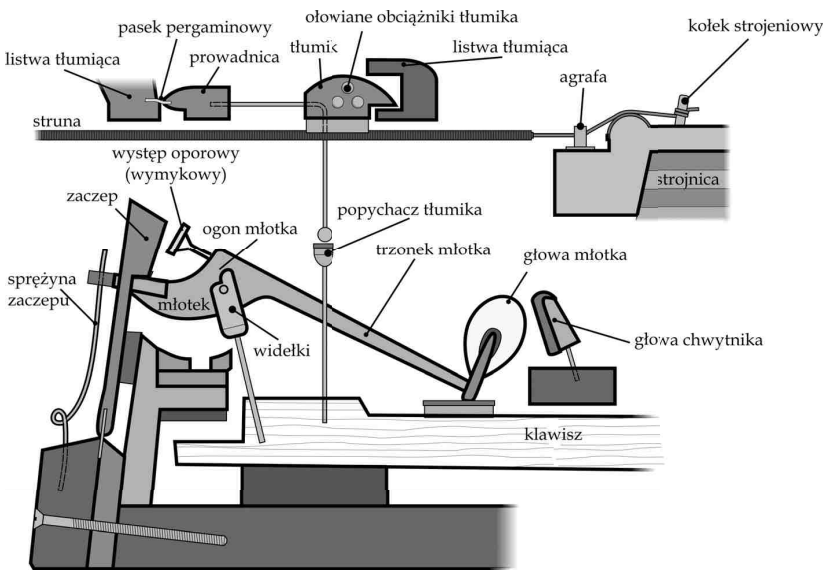
Najstarszy konstrukcyjnie jest mechanizm młoteczkowy Cristoforiego (rys. 3-115). Mechanizm tego typu zawierał podskakującą pionowo dźwignię wymyku, która zaraz po uderzeniu młoteczka w strunę zwalniała go w taki sposób, że opadał i był przygotowany do repetycji (powtórzenia uderzenia), nawet gdy palec jeszcze nie zwolnił klawisza.

Historia budowy fortepianów z mechanizmami typu *gravicembalo col piano e forte* kończy się około roku 1760. W XVIII wieku wynaleziono kilka odmiennych typów mechanizmów, część zupełnie nowych, a część opartych na oryginalne Cristoforiego. Jednym z nowych typów był mechanizm fortepianowy, skonstruowany w szkołach J.A. Steina (Augsburg) i A. Waler (Wiedeń) (rys. 3-116). Zapoczątkował on dwa główne kierunki rozwoju mechaniki niemieckiej, później nazywanej wiedeńską.

²⁴⁷ Najbardziej cenieni współcześnie producenci fortepianów to: Bösendorfer (Wiedeń, od 1828), Steinway (Nowy Jork, od 1853; Hamburg, od 1880), Bechstein (Berlin, od 1853), Blüthner (Lipsk, od 1853), Fazioli (Sacile, Włochy, od 1978), Steingraeber & Sohns (Bayreuth, Niemcy, od 1852), Yamaha (Hamamatsu, Japonia, od 1887), Estonia (Tallin, Estonia, od 1893), Calisia (Fabryka Fortepianów i Pianin Arnold Fibiger w Kaliszu, od 1878 do 1939; Fabryka Fortepianów i Pianin Calisia, od 1949 do 2007). Na stronie internetowej Muzeum Historii Przemysłu w Opatówku można znaleźć informację, że od XIX wieku do 1939 roku w Polsce działało co najmniej 339 producentów fortepianów.



Rys. 3-115. Mechanika fortepianowa Cristoforiego (ok. 1700): a - szkic, b - fotografia

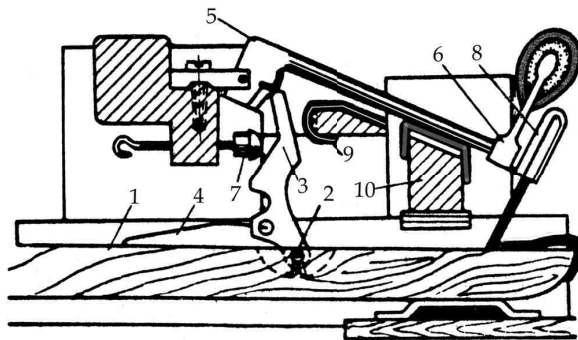


Rys. 3-116. Mechanika fortepianowa wiedeńska (ok. 1760)

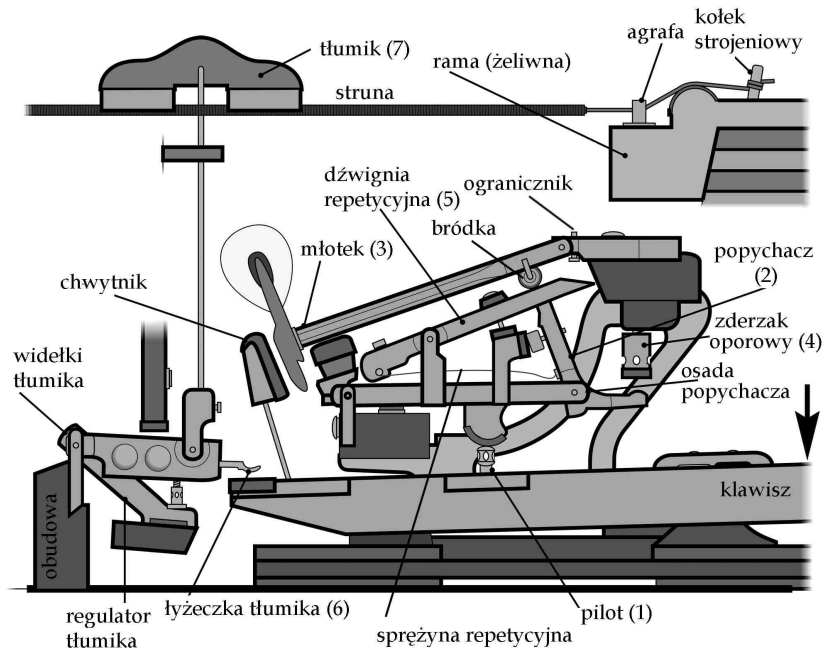
Konstruktorom mechaniki wiedeńskiej przyświecała idea uproszczenia i usprawnienia mechanizmu Cristoforiego. Liczbę ruchomych części sprowadzono do niezbędnego minimum: na dźwigni klawiszowej spoczywał młotek zamocowany obrotowo w mosiężnych widelkach na

dwóch zaokrąglonych szpilek pełniących rolę czopów. W tylnej części młotka znajdował się ruchomy zaczep ogona podparty sprężyną. Młotek obracał się w widelkach i uderzał w strunę. Mechanika wiedeńska miała pewne wady: grający na fortepianie nie odczuwał pod palcami zmiennego oporu – sumaryczny ciężar klawisza i młoteczka był stały, nie było możliwości kontrolowania szybkości i siły uderzenia młoteczka w strunę oraz nie można było powtarzać uderzeń częściej niż sześć razy na sekundę.

Druga połowa XVIII wieku to okres przyspieszonego rozwoju pianistyki. Pojawiły się skomplikowane utwory muzyczne, do których wykonania potrzebna była lepsza mechanika, czulej reagująca na indywidualną technikę wykonawczą. Kilku wybitnych angielskich budowniczych fortepianów (Backers, Broadwood, Stodart) prawie jednocześnie, około 1770 roku, wprowadzili szereg zmian i uzupełnień w mechanizmie uderzeniowym Cristoforiego: zastosowano urządzenie usuwające w odpowiedniej chwili spod młoteczka popychający bijnik, udoskonalono system tłumikowy, zastosowano łożyskowanie wszystkich ruchomych części za pomocą metalowych czopów – i w ten sposób otrzymano solidny i niezawodny mechanizm angielski o lepszych możliwościach repetycyjnych (większa potencjalna częstotliwość powtarzania dźwięku) (rys. 3-117). Mechanika ta zyskała szerokie uznanie i stosowano ją, z niewielkimi zmianami, w fortepianach do lat dwudziestych XX wieku, a w pianinach wykorzystuje się ją do dnia dzisiejszego.



Rys. 3-117. Mechanika fortepianowa angielska (ok. 1760) (FADIEJEW i AŁŁON 1990): 1 - dźwignia klawiszowa, 2 - osada bijnika, 3 - bijnik, 4 - sprężyna bijnika, 5 - nasada młotka, 6 - młotek, 7 - występ oporowy bijnika, 8 - chwytник, 9 - listwa oporowa bijnika, 10 - listwa spoczynkowa młotków

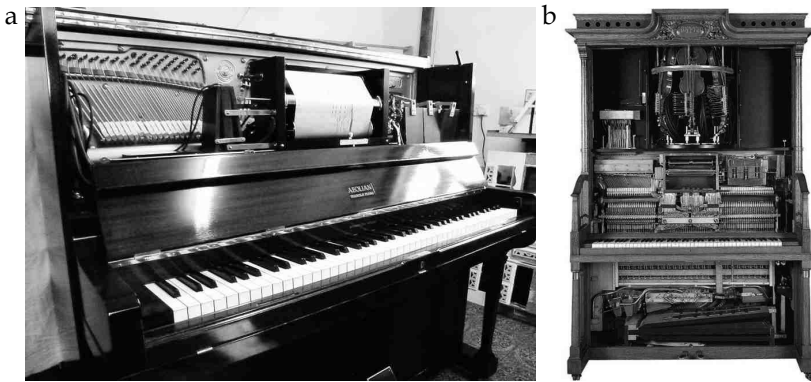


Rys. 3-119. Współczesna mechanika fortepianowa z podwójną repetycją

Po naciśnięciu w klawisz (strzałka na rys. 3-119) pilot (1) podnosi popychacz (2) i podrzuca młotek (3), który uderza w strunę. Zderzak oporowy (4) odłącza popychacz (2) od młotka (3). Młotek, opadając po uderzeniu w strunę, opiera się na dźwigni repetycyjnej (5) i przechyla ją swoim ciężarem. Wraz z naciśnięciem klawisza łyżeczka tłumika (6) za pomocą popychacza podnosi tłumik (7). Jeżeli klawisz pozostaje wciśnięty, to dźwięk struny nie jest tłumiony. W przypadku zwolnienia klawisza tłumik (7) opada na strunę. Niezależnie od tego, czy klawisz pozostaje wciśnięty, czy zwolniony, młotek (3) opada i mechanizm jest gotów do ponownego uderzenia. Możliwość tzw. podwójnej repetycji pozwala prawie nieprzerwanie powtarzać jeden i ten sam dźwięk. Szybkość powtarzania w lepszych mechanizmach osiąga 12-15 uderzeń na sekundę. Kluczowymi elementami są dźwignia repetycyjna i podpierająca ją sprężyna repetycyjna, które utrzymują młotek w zawieszeniu, pozwalając popychaczowi wsuwać się pod bródkę młotka i umożliwiając kolejne jego podrzucenie.

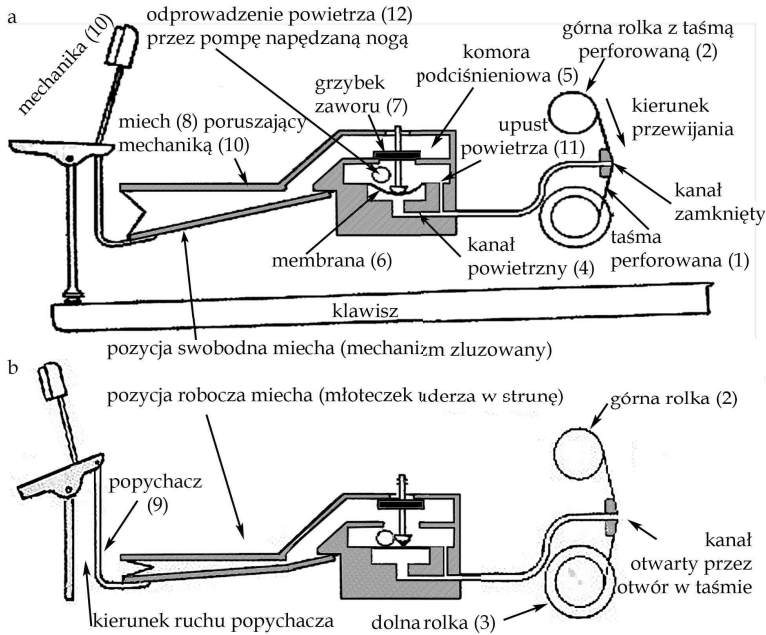
3.7.4. Mechaniczne instrumenty muzyczne

Historia instrumentów z zewnętrznym mechanizmem napędowym jest bardzo długa. Najstarsze historyczne wzmianki pochodzą z I wieku n.e. z Aleksandrii, są to tzw. organy Herona, przedstawione na rysunku 3-51 na s. 202. Pierwsze udane urządzenia mechaniczne samoczynnie wytwarzające muzykę pojawiły się w wiekach XVII i XVIII wraz z rozwojem mechaniki precyzyjnej. To właśnie w tym okresie upowszechniły się katarynki oraz pozytywki. Najstarszym urządzeniem, które było zdolne do odtworzenia ze stosunkowo dużą wiernością i jakością zapisanej wcześniej muzyki, jest pianola skonstruowana w 1897 roku przez Amerykanina E.S. Voteya. Pianola (rys. 3-120 a) była bardzo skomplikowanym pod względem mechanicznym urządzeniem zbudowanym ze znaczącym udziałem drewna. Dźwięk był wydobywany przy użyciu energii sprężonego powietrza, a całym procesem sterowała perforowana taśma.



Rys. 3-120. Mechaniczne instrumenty: a - pianola (ok. 1920), b - violina (mechaniczne skrzypce), Hupfeld Phonoliszt (1908)

Zasadę odtwarzania muzyki w pianoli przedstawia rysunek 3-121. Pokazano tam mechanizm jednego klawisza; w typowym „mechanicznym pianinie” było ich tyle, ile klawiszy, czyli 88. Perforowana taśma (1) jest przewijana z górnej rolki (2) na dolną (3). Kiedy otwór w taśmie (1) pokrywa się z kanałem powietrznym (4), do komory podciśnieniowej (5) dostaje się powietrze atmosferyczne. Wzrost ciśnienia w komorze (5) powoduje przemieszczenie się membrany (6), która przesuwa grzybek



Rys. 3-121. Zasada działania pianoli: a - pozycja swobodna, b - pozycja robocza

zaworu (7) do góry. Na skutek obniżenia ciśnienia w miechu (8), popychacz (9) przemieszcza się do góry, uruchamiając mechanikę (10) pianoli. Upust (11) wyrównuje ciśnienie pod i nad membraną (6). Mechanizm powraca do pozycji swobodnej (rys. 3-121 a). Aby mechanizm mógł działać, średnica upustu (11) musi być mniejsza niż średnica kanału (4). Czas naciśnięcia klawisza jest regulowany przez zmianę stosunku średnicy upustu (11) do średnicy kanału (4) oraz poprzez istnienie w taśmie mniej lub bardziej owalnych otworów. Cały mechanizm jest napędzany pompką nożną. Powietrze z komory podciśnieniowej (5) jest wypompowywane odprowadzeniem (12).

„Złoty wiek” mechanicznych instrumentów muzycznych to przełom XIX i XX wieku. W tym okresie powstały opisywane pianole, ale także inne urządzenia, jak np. mechaniczne skrzypce Hupfeld Phonoliszt składające się z trojga zautomatyzowanych skrzypiec (rys. 3-120 b). O jakości mechanizmów może świadczyć fakt, że nawet melomani mieli problemy z odróżnieniem, czy muzykę wykonuje muzyk, czy odtwarza ją mechanizm.

4.

WSPÓŁCZESNE ZASTOSOWANIA DREWNA W BUDOWIE MASZYN

4.1. Kilka uwag ogólnych

Cała rzeczywistość jest estetyczna
(Herbert Read, 1893-1968)²⁴⁹

Rozdział czwarty jest krótkim, subiektywnym opisem wybranych przypadków współczesnego zastosowania drewna w budowie maszyn.

W XXI wieku drewno i materiały drewnopochodne są stosunkowo rzadko używane w budowie maszyn. Wady tego rodzaju tworzyw – duży rozrzut i anizotropia właściwości wytrzymałościowych, nietrwałość oraz niestabilność wymiarowa – niemal zupełnie je zmarginalizowały jako materiał na elementy konstrukcyjne maszyn. W budowie maszyn drewno jest jednak wciąż stosowane. Wynika to z faktu, że ma wyjątkową pozycję wśród materiałów inżynierskich. Jego zastosowanie w niektórych przypadkach może być podyktowane tradycją (np. przy budowie instrumentów muzycznych, gdzie drewno jest materiałem sprawdzonym i stosowanym od wieków). Nie bez znaczenia są walory estetyczne drewna: każdy podzespół wykonany z tego naturalnego kompozytu jest niepowtarzalny i już sam w sobie dekoracyjny. W nielicznych przypadkach o wyborze drewna lub materiałów drewnopochodnych decydują ich specyficzne cechy fizyczne (np. odporność chemiczna, wytrzymałość

²⁴⁹ READ (1976).

mechaniczna, sprężystość, zdolność pochłaniania dźwięków, mały współczynnik przenikania ciepła, duża rezystywność itp.) oraz cechy technologiczne (np. łatwość obróbki).

Drewno uszlachetnione najnowszymi technikami – szczególnie przez tworzywa sztuczne – jest coraz doskonalsze. Współcześnie można w bardzo dużym stopniu wpływać na parametry fizyczne tworzyw drzewnych i dopasowywać je do konkretnego zastosowania. Nie bez znaczenia jest ekologiczność drewna, łatwość jego recyklingu. Na progu XXI wieku jesteśmy świadkami renesansu tworzyw drzewnych w roli materiału konstrukcyjnego w pewnych dziedzinach budowy maszyn.

4.2. Zastosowania litego drewna

Lepiej chyba pójść choćby kawatek dobrą drogą, niż zajść daleko, lecz źle
(Platon, 427-347 p.n.e.)²⁵⁰

Jak wspomniano, lite drewno znajduje zastosowanie głównie w budowie mechanizmów, których konstrukcja wynika z tradycji (instrumenty muzyczne, sprzęt sportowy, części łodzi i jachtów²⁵¹ itp.). O jego zastosowaniu w budowie maszyn i innych urządzeń (np. części chwytowych narzędzi, zabawek, modeli hobbyistycznych itp.) mogą również decydować jego specyficzne cechy użytkowe. Najlepszym przykładem urządzeń, których postać konstrukcyjna i zastosowane materiały wynikają z tradycji, są instrumenty strunowe, takie jak pianina, fortepiany, instrumenty smyczkowe oraz gitary akustyczne.

Drewniane modele odlewnicze

Drewno lite, z uwagi na łatwość obróbki, jest szeroko stosowane w odlewnictwie. Typowy odlewniczy komplet modelowy, czyli zestaw przyrządów do wielokrotnego wykonywania piaskowej formy odlewniczej, zwykle składa się z modelu odlewniczego z rdzeniami, rdzennic,

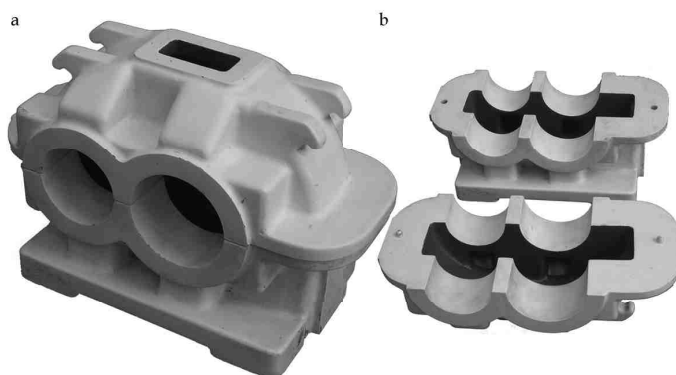
²⁵⁰ VOGT (2004).

²⁵¹ Kadłuby kajaków, łodzi i jachtów wykonuje się wprawdzie ze sklejki, jednak pewne drobne elementy wyposażenia mogą być wykonane z drewna litego.

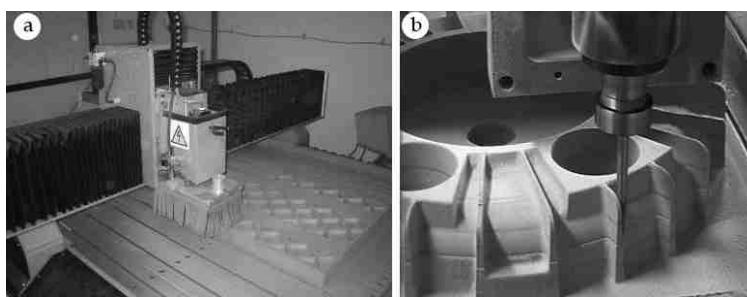
wzorników formierskich, płyt modelowych, modeli układu wlewowego oraz przyrządów do składania i kontroli formy. Z udziałem drewna wykonuje się wszystkie wymienione elementy. Modele odlewnicze odtwarzają zewnętrzne kształty odlewanych przedmiotu²⁵², rdzenie – kształty wewnętrzne. Te ostatnie wykonuje się w skrzynkach rdzeniowych (rdzennicach, również bardzo często drewnianych) ręcznie za pomocą wzorników lub maszynowo.

Drewniany, dzielony model odlewniczy korpusu motoreduktora przedstawiono na rysunku 4-1.

Modele odlewnicze są obrabiane bardzo precyzyjnie (rys. 4-2).



Rys. 4-1. Model korpusu przekładni: a – złożony, b – rozłożony (fot. B. Branowski)



Rys. 4-2. Obróbka modeli na frezarce CNC: a – obróbka zgrubna (materiał – MDF), b – „wierszowanie” (wykańczanie po obróbce zgrubnej)

²⁵² Odciskają kształty przyszłego odlewu części maszyny w masie formierskiej.

Cechy charakterystyczne drewna oraz zastosowanie różnych jego rodzajów w modelarstwie odlewniczym zestawiono w tabeli 30.

Tabela 30

Zastosowanie drewna na modele odlewnicze (na podstawie BARANOWSKIEGO 1986)

Materiał	Cechy charakterystyczne	Zastosowanie
1	2	3
Sosna	Mała chłonność wilgoci, odporność na biodegradację, niewielka skłonność do paczenia się, niejednorodność budowy, dobra obrabialność, zwiększona chropowatość powierzchni.	Średnie oraz duże zespoły modelowe w produkcji jednostkowej i seryjnej.
Świerk, jodła	Znaczna skłonność do paczenia się, niejednorodność budowy (występowanie wad anatomicznych, np. skrętu włókien, niezwiązanych sęków), zła obrabialność.	Proste zespoły modelowe w produkcji jednostkowej i małoseryjnej, mniej znaczące części zespołów modelowych.
Olsza	Odporność na środowisko wilgotne, skłonność do biodegradacji powierzchni, jednorodna budowa, łatwość obróbki, mała chropowatość powierzchni, mała twardość.	Małe i średnie zespoły modelowe (głównie modele i płyty modelowe) o zwiększonej dokładności wymiarowej.
Lipa	Jednorodna budowa, dobra obrabialność, mała chropowatość powierzchni, mała twardość.	Małe modele i rdzennice w produkcji jednostkowej.
Brzoza	Skłonność do gnicia pod wpływem wilgoci, jednorodna budowa, mała skłonność do paczenia się, mała chropowatość powierzchni, dobra obrabialność i dobre właściwości mechaniczne.	Drobne części modeli i rdzennic, licowanie powierzchni roboczych.
Buk	Duża skłonność do paczenia się, zła obrabialność, dobre właściwości wytrzymałościowe.	Małe modele o prostej konfiguracji, drobne części modeli.
Dąb	Skłonność do pękania (łupliwość), zła obrabialność, duża twardość.	Części niestykające się z masą formierską.
Grusza, orzech	Mała wrażliwość na wilgoć, mała skłonność do paczenia się, dobra obrabialność, mała chropowatość powierzchni, dobre właściwości mechaniczne.	Małe modele i rdzennice o skomplikowanej konfiguracji w produkcji seryjnej, o dużej trwałości i dokładności.
Klon	Zwarta i wytrzymała budowa, mała skłonność do paczenia się, zła obrabialność, mała chropowatość powierzchni.	Drobne modele o skomplikowanej konfiguracji w produkcji seryjnej, licowanie średnich i dużych modeli i rdzennic.
Jesion	Skłonność do biodegradacji w warunkach zmiennej wilgotności, zwarta budowa, zła obrabialność.	Licowanie średnich i dużych modeli w produkcji seryjnej.

Tabela 30 – cd.

1	2	3
Grab	Zwarta i wytrzymała budowa, mała skłonność do paczenia się, mała chropowatość, duża odporność na ścieranie.	Sz szczególnie trwałe modele o skomplikowanej konfiguracji, lokalne wzmocnienia modeli.
Sklejka i płyta stolarska	Dobre właściwości wytrzymałościowe, mała skłonność do odkształceń, duża odporność na wilgoć, mała chropowatość powierzchni.	Płaskościennne modele, płyty, szablony i wzorniki, licowanie modeli oraz dużych rdzennic.
Lignofol	Jw.	Modele o zwiększonej trwałości, o gabarytach do 600 mm, licowanie powierzchni roboczych, modeli i rdzennic.

Oprócz materiałów wymienionych w tabeli 30 w modelarstwie odlewniczym stosuje się tworzywa drewnopochodne, takie jak: lignamon, lignomer oraz sklejkę delta (opisywaną na s. 183 i dalej).

Lignamon jest produktem powstałym w wyniku zmiekczenia drewna amoniakiem i następującego po nim prasowania w podwyższonej temperaturze i równoczesnego suszenia, utwardzania oraz obróbki cieplnej. Gabaryty modeli i rdzennic z lignamonu nie przekraczają 500 mm. Trwałość modeli wynosi do 15 000, a rdzennic – do 20 000 zaformowań.

Lignomer jest produktem nasycenia drewna styrenem²⁵³, spolimeryzowanym następnie pod zwiększonym ciśnieniem i w temperaturze do 90°C (BARANOWSKI 1986). Trwałość zespołów modelowych z lignomeru jest ponad dwa razy większa niż z drewna naturalnego. Lignomer nadaje się szczególnie na drobne modele (w kształcie brył obrotowych), na elementy odstające modeli narażone na przyspieszone zużycie oraz na modele, które powinny mieć bardzo stabilne wymiary. Chociaż lignomer cechuje się licznymi zaletami, to jednak z uwagi na toksyczność styrenu nie znalazł szerszego zastosowania.

Zagadnieniem podstawowym w produkcji modeli z tworzyw drzewnych jest także ich zaprojektowanie i wykonanie, żeby zminimalizować wpływ naturalnej wady tych tworzyw – niestabilności wymiarowej. Modele z litego drewna najczęściej skleja się z kilku części. Sklejanie odbywa się stronami o podobnym układzie słoï rocznych. Połączenie klejowe najczęściej jest wzmocniane kołkami drewnianymi, wkrętami lub nawet

²⁵³ Technologię polimeryzacji styrenu w drewnie opatentował w połowie lat siedemdziesiątych XX wieku profesor Maciej Ławniczak.

gwoździami wbijanymi w nawiercone wcześniej otwory o średnicy mniejszej niż średnica gwoźdźcia.

Drewno w instrumentach muzycznych – gitary

Charakterystyczne dla instrumentów strunowych z rodziny gitar oraz z rodziny skrzypiec jest łączenie ich elementów konstrukcyjnych niemal wyłącznie techniką klejenia – wyjątkowo rzadko stosuje się metalowe łączniki wzmacniające połączenia.

Instrumenty z rodziny gitar można rozmaicie klasyfikować (np. gitara akustyczna klasyczna, gitara akustyczna do grania akordami, gitara elektryczna, gitara basowa, gitara dobro, gitara hawajska, gitara elektroakustyczna i wiele innych). Z punktu widzenia konstrukcji najważniejszy wydaje się podział na gitary akustyczne i elektryczne. W gitarach akustycznych drgania strun są przenoszone przez podstawek (mostek) do płyty wierzchniej. Dźwięk jest przetwarzany i wzmacniany wewnątrz pudła rezonansowego i następnie emitowany przez okrągły otwór w płycie rezonansowej. W gitarach elektrycznych przetworniki zamieniają drgania strun na sygnał elektryczny, który jest później wzmacniany przez wzmacniacz i emitowany przez głośniki.

Głównymi elementami konstrukcyjnymi gitary akustycznej są: (1) pudło rezonansowe, (2) gryf (na którym są rozmieszczone progi) oraz (3) główka z kluczami służącymi do strojenia gitary. Do budowy gitar stosuje się kilkadziesiąt gatunków drewna, a każdy egzemplarz jest wytworzony z udziałem co najmniej kilku jego gatunków.

Przeciętna gitara akustyczna ma następujące wymiary pudła rezonansowego: długość – 480 mm, szerokość – 290 i 370 mm, głębokość – 80-100 mm. Na pudło rezonansowe składają się następujące elementy:

- uźebrowana płyta wierzchnia wykonana z drewna rezonansowego (gatunki podano w tabeli 31); płyta składa się zwykle z dwóch symetrycznych połówek (tak, aby włókna były ułożone w osi podłużnej gitary) wyciętych za pomocą prasy wyposażonej w szablon; do jej spodniej części jest przyklejone uźebrowanie ułatwiające propagację drgań w kierunku poprzecznym do kierunku przebiegu włókien (wzór uźebrowania jest charakterystyczny dla wytwórcy), w środkowej części płyty wykonuje się otwór (tym mniejszy, im bardziej basowe brzmienie ma mieć instrument),
- boczki wykonane z topoli lub mahoni, gięte na gorąco (listwy przed gięciem zanurza się na 15 s w gorącej wodzie, następnie przez minutę formuje się na szablonie za pomocą prasy),
- płyta dolna z klonu lub palisandru.

Tabela 31

Materiały pudeł rezonansowych gitar akustycznych i ich ranking według producentów

Drewno	Nazwa angielska	Opis	Ranking	
			wg M.	wg G.
Świerk sitkajski (<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carrière)	Sitka spruce	Najlepsza wibroakustyka, niezależnie od rodzaju strun to drewno zapewnia dobrą i równomierną wibrację w całym zakresie częstotliwości, niezależnie od głośności dźwięku.	1	2
Świerk Engelmanna (<i>Picea engelmannii</i> Parry ex Engelm.)	Engelmann spruce	Drewno bardzo lekkie, umożliwia uzyskanie nieco głośniejszego i bardziej „przestrzennego” dźwięku niż świerk sitkajski, nieco gorsze niskie brzmienia.	2	3
Świerk pospolity (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	Italian alpine spruce (M.), European spruce (G.)	Charakterystyka zbliżona do drewna świerka Engelmanna.	3	5
Świerk czerwony (<i>Picea rubens</i> Sarg.)	Red spruce	Charakterystyka zbliżona do drewna świerka pospolitego.	4	1
Świerk biały (<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss)	White spruce	Tradycyjny materiał do budowy gitar klasycznych.	-	4

M. - C.F. Martin & Co (duża wytwórnia gitar założona w 1833 roku w USA przez Christiana Fredericka Martina - www.martinguitar.com).

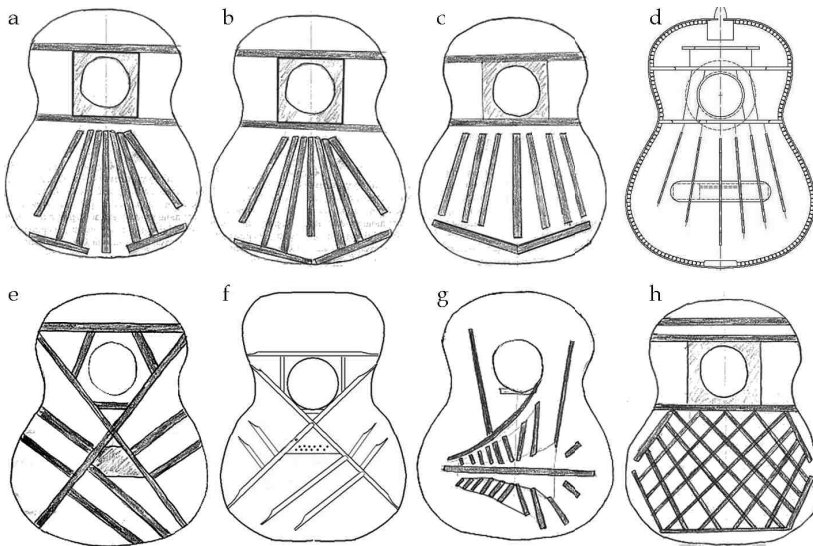
G. - Goodman Guitars (mniejsza wytwórnia gitar prowadzona przez Brada Goodmana - www.goodmanguitars.com).

Na pudle rezonansowym znajdują się: strunnik (obciążony siłą około 60 kg, z hebanu) i mostek (np. z kości).

Do pudła jest przymocowana szyjka, pokryta hebanową lub palisandrową podstrunnicą z nabitymi progami (do 19 szt.), o łącznej grubości do 23 mm. W celu uchronienia szyjki przed wypaczeniem przykleja się do niej sztywną belkę drewnianą lub stalową. Struny (menzura od 630 do 665 mm) dzielą się na wiolinowe (dawniej wykonywane z jelit, obecnie z nylonu) oraz basowe (jedwabne z metalową owijką).

Podstawowe materiały płyt rezonansowych stosowanych w gitarach akustycznych oraz ich ranking według dwóch liczących się na rynku producentów gitar przedstawiono w tabeli 31.

Największy wpływ na jakość dźwięku gitary akustycznej ma płyta rezonansowa, czyli górna część korpusu (pudła rezonansowego). Wykonuje się ją najczęściej z litego drewna świerkowego. Wybrane warianty konstrukcyjne płyty rezonansowej przedstawiono na rysunku 4-3.



Rys. 4-3. Warianty konstrukcyjne płyty rezonansowej pudła gitary: a-d - układy klasyczne, e, f - układy X, g, h - układy swobodne

Uźebrowanie płyty rezonansowej ma za zadanie polepszenie propagacji dźwięku w poprzek włókien oraz wzmocnienie wytrzymałości mechanicznej pudła. Brzmienie gitary w dużej mierze zależy również od wymiarów, geometrii i masy korpusu oraz gęstości i twardości drewna, z którego jest zbudowany.

Drewno wykorzystuje się również do budowy gitar elektrycznych. Gitara elektryczna została skonstruowana w latach trzydziestych XX wieku, jest zbliżona konstrukcyjnie do gitary akustycznej, różni się jednak od niej kilkoma elementami. Najważniejsza różnica wynika z nieco innej funkcji korpusu, który nie musi wzmacniać dźwięku, tak jak w gitarze akustycznej. Korpus w gitarze elektrycznej może być wykonany jako:

(1) pudło rezonansowe (jednak o innym kształcie niż w gitarach akustycznych), (2) pudło rezonansowe z umieszczonym centralnie blokiem z litego drewna lub (3) blok litego drewna. Lity korpus może być zbudowany z drewna (najczęściej), włókna szklanego, stopu aluminium z magnezem lub kompozytów grafitowo-epoksydowych. Gitary elektryczne zazwyczaj mają dłuższy gryf niż gitary akustyczne. Na korpusy gitar elektrycznych najczęściej stosuje się drewno drzew liściastych – topoli, olszy, lipy, jesionu, klonu, mahoniowca i innych gatunków²⁵⁴, a w przypadku tańszych modeli – sklejkę drzew liściastych (np. brzozy bądź olszy z bukiem²⁵⁵).

Duży wpływ na akustykę instrumentów strunowych ma sposób połączenia gryfu z korpusem. Najtańszą w wykonaniu i jednocześnie najmniej korzystną akustycznie konstrukcją jest gryf przykręcany (tzw. *bolt-on*) – tego typu rozwiązania nie stosuje się w klasycznym lutnictwie, a jedynie w produkcji masowej. Wysokiej klasy instrumenty są łączone wyłącznie techniką klejenia. Gryf wklejany (tzw. *set-in*) jest lepszym i zarazem droższym wariantem. Najlepsze parametry instrumentu zapewnia konstrukcja *neck-thru-body*, w której obydwa miejsca zamocowania strun znajdują się na jednym kawałku drewna, a dwie boczne części korpusu są doklejone do gryfu.

Podstrunnice i intarsje gitar (akustycznych i elektrycznych) wykonuje się z twardych, odpornych na zużycie, gatunków drzew liściastych (np. orzechu, klonu). Szczególnie cenione jest drewno gatunków tropikalnych (np. heban). Podstrunnice i intarsje pokrywa się lakierami metakrylowymi, które zwiększają twardość powierzchni oraz zabezpieczają ją przed wpływem wilgoci, zmniejszając naturalną higroskopijność drewna.

²⁵⁴ Bardzo często stosuje się gatunki tropikalne, takie jak: dalbergia czarna (*Dalbergia nigra* (Vell.) Allemao ex Benth.), bubinga (*Copaifera salikounda* Heckel), orzech włoski (*Juglans regia* L.), akacjowiec koa (*Acacia koa* A. Gray).

²⁵⁵ Na sklejki „gitarowe” stosuje się również inne gatunki drewna: dalbergie (*Dalbergia nigra* (Vell.) Allemao ex Benth. – ang. *Brazilian rosewood*, *Dalbergia latifolia* Roxb. – ang. *East Indian rosewood*), akacjowiec koa (*Acacia koa* A. Gray – ang. *Hawaiian flamed koa*), mahoń (*Swietenia macrophylla* King – ang. *Honduras mahogany*), orzechy (*Juglans californica* Wats. – ang. *California walnut* i *Juglans hindsii* – ang. *Hinds' black walnut*), klon wielkolistny (*Acer macrophyllum* Pursh – ang. *big-leaf maple*), klon jawor (*Acer pseudoplatanus* L. – ang. *great maple*), klon srebrzysty (*Acer saccharum* Marshall – ang. *sugar maple*), wiśnię (*Prunus serotina* Ehrh. – ang. *black cherry*).

Drewno w narzędziach

Drewno lite może być stosowane również na części (najczęściej na uchwyty) narzędzi ręcznych oraz urządzeń używanych w gospodarstwie domowym. Na trzonki narzędzi „uderzeniowych” (młotki, kilofy) używa się gatunków drewna o dużej sprężystości (np. buku, grabu, brzozy). Osady pilników i pędzli wzmacnia się metalowymi obręczami. Wybrane przykłady zastosowania drewna na części chwytowe narzędzi zawiera tabela 32.

Tabela 32

Wybrane zastosowania drewna na narzędzia






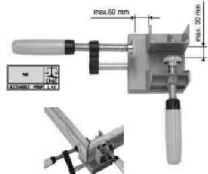

Nazwa	Zastosowanie	Fotografia	Uwagi
1	2	3	4
Oprawka drewniana	W jubilerstwie		Grab
Szczotka bawełniana	W jubilerstwie		Na drewnianej, okutej, piaście
Szczotka fibrowa	W kuchni		Trzpień z drewna buku
Pędzel	AGD		Buk, brzoza
Zwornica śrubowa	W stolarstwie		Twarde drewno gatunków liściastych
Zacisk drewniany mimośrodowy	W stolarstwie		Ramiona zacisku z twardego drewna; w celu zabezpieczenia chwytej powierzchni przed uszkodzeniem części ramion zacisku są pokryte korkiem




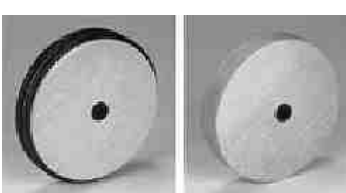
Tabela 32 – cd.

1	2	3	4
Młotek gumowy	Uniwersalne		Narzędzie „uderzeniowe”, stosuje się zatem gatunki sprężyste, np. klon, brzozę Jw.
Młotek	Uniwersalne		

Przykłady zastosowania drewna jako materiału konstrukcyjnego drobnych urządzeń używanych w gospodarstwie domowym przedstawia tabela 33.

Tabela 33

Wybrane zastosowania drewna na przedmioty codziennego użytku

Nazwa	Zastosowanie	Fotografia	Uwagi
Szczotka	AGD		Buk
Parasol	Artykuł codziennego użytku		Uchwyt z giętego drewna buku
Grzechotka	Zabawka		Klon
Kółka	W meblarstwie		Buk; szer.: 21 mm, średn.: 50-70 mm, nośność: 50-70 kg, okładzina z gumy (prod. Rader)

Podstawowym materiałem na drobną galanterię drzewną oraz części maszyn jest drewno buku, które z racji swojej ciepłej (żółtawej i różnowej) barwy doskonale nadaje się do tego celu. Oprócz buku stosuje się brzozę, klon, grab.

Sprzęt sportowy

Inną grupą przedmiotów, które są wytwarzane z litego drewna, jest sprzęt sportowy (np. kije – baseballowe, do krykieta, bilardowe, szczotki do curlingu, wiosła, części łodzi żaglowych).

Standardowy kij baseballowy, przedstawiony na rysunku 4-4 a, ma nie więcej niż 70 mm średnicy i do 1067 mm długości, może być wykonany z drewna lub aluminium. Profesjonalne kije baseballowe są wytwarzane z litego (niewydrażonego) drewna; kije ze stopów aluminium powodowałyby wybijanie piłki poza boisko. Większość kijów jest wykonana z drewna jesionowego, rzadziej z orzesznika²⁵⁶ lub klonu. Dopuszczalne profile, materiały i wymiary kijów zależą od lokalnych przepisów ligowych.



Rys. 4-4. Kije: a - baseballowy, b - do krykieta, c - bilardowe (bez kapki)

Kije do krykieta (rys. 4-4 b) najczęściej są wykonywane z litego drewna wierzbowego. Ten rodzaj materiału zapewnia kompromis między odpowiednią masą, odpornością na uszkodzenia powierzchni (zagniecenia od piłki) oraz sprężystością.

Niemal wszystkie kije bilardowe (rys. 4-4 c) są wykonane z litego drewna, nieliczne egzemplarze są oklejone matami z włókna szklanego

²⁵⁶ Orzesznik (*Carya*) – drzewo z rodziny orzechowatych (*Juglandaceae*), obejmującej 22 gatunki drzew. W Polsce występują trzy z nich: orzesznik gorzki, orzesznik siedmiolistkowy i orzesznik pięciolistkowy.

lub węglowego. Amatorskie kije są wytoczone z jednego kawałka drewna, profesjonalne – są połączone z dwóch. Typowy kij ma 1,5 m długości i waży 510-600 g, składa się z części chwytowej (o długości 0,5-0,6 m), oraz *szczytówki* zakończonej *furelką*, na której naklejona jest skórzana *kapka*. Część chwytową zazwyczaj wykonuje się z jesionów (*Fraxinus L.*), natomiast *szczytówkę* – z drewna klonów (*Acer L.*). Obie części są łączone mufą (plastikową, stalową lub z brązu) lub wklejone bezpośrednio. Oprócz wyżej wymienionych tradycyjnych materiałów stosuje się drewna tropikalne. Lite kije drewniane próbowano zastąpić kijami metalowymi, z tworzyw sztucznych oraz kompozytowymi, jednak żaden z tych materiałów nie został zaakceptowany. Drewniane *szczytówki* kijów bilardowych są wykonywane czasochłonną metodą polegającą na wielokrotnym sezonowaniu (suszeniu), a następnie toczeniu. Cykl suszenie-toczenie może być powtarzany 7-11 razy i trwać 18-24 miesiące. Przy ostatnim toczeniu nadaje się *szczytówce* odpowiednią gładkość, stosując np. nagniatanie specjalnym narzędziem celem zamknięcia porów drewna i zmniejszenia w ten sposób możliwości deformacji na skutek zmian wilgotności materiału. Kij jest zabezpieczony powłokami lakierowymi. Proces skrawania oraz lakierowania najczęściej jest wykonywany ręcznie. Część chwytowa kija jest owijana włóknem (najczęściej naturalnym). Rękojeść owija się nitą (zwykle dwiema warstwami w przeciwnych kierunkach) na długości około 0,30-0,35 m. Część opleciona ma mniejszą średnicę i po nawinięciu opłotu oraz po zalaminowaniu średnica całej części chwytowej jest jednokowa. Drewniane nieowinięte części rękojeści są barwione i lakierowane kilkoma warstwami lakieru odpornego na uderzenia.

4.3. Zastosowania tworzyw drewnopochodnych

Złoty środek (franc. *juste milieu*)
(Blaise Pascal, 1623-1662)²⁵⁷

Spośród tworzyw drewnopochodnych najczęściej w budowie maszyn stosowana jest sklejka oraz drewno prasowane (lite i forniry) z udziałem tworzyw sztucznych.

²⁵⁷ PASCAL (2000).

Sklejka

Sklejka znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach budowy urządzeń typu maszynowego; można do nich zaliczyć:

- sprzęt sportowy – m.in. rakietki do tenisa stołowego, deski narciarskie (snowboardy), deskorolki, niektóre typy nart, płozy do sanek, kije hokejowe, nieliczne kije golfowe, rowery, kajaki oraz wiosła;
- samochody i inne środki transportu – m.in. elementy karoserii, okładziny ścian, podłogi autobusów i wagonów kolejowych, elementy konstrukcji foteli, burty, przegrody i półki, obudowy, skrzynie ładunkowe, podłogi w naczepach i przyczepach²⁵⁸, elementy nadwozi, bryczki i powozy;
- odlewnictwo – modele odlewnicze (drewno brzoźowe, olchowe, drewno gruszy lub orzecha; model jest sklejonny z bardzo grubych fornirów);
- przemysł stoczniowy i szkutnictwo – wyposażenie wnętrza statków, ściany i podłogi ładowni statków, kadłuby i wyposażenie wnętrza jachtów i łodzi;
- instrumenty i sprzęt muzyczny – skrzynie pianin, fortepianów i innych instrumentów, skrzynki kolumn głośnikowych;
- lotnictwo – różnego rodzaju wewnętrzne wyposażenie samolotów, szybowców, elementy modeli (w modelarstwie);
- energetyka – do produkcji rdzeni wielkowymiarowych transformatorów energetycznych;
- opakowania.

Deski rakietek tenisowych są najczęściej wykonywane z trój-, pięcio- lub siedmiowarstwowej sklejki. Twardsze drewno (np. afrykańskie: *limba*²⁵⁹ – *Terminalia superba* Engl. & Diels, koto²⁶⁰ – *Pterygota cordifolia* A. Chev., anegre – *Sapotaceae aningeria*²⁶¹ lub japońskie: cyprysików *Chamaecyparis*²⁶²) jest używane na warstwy zewnętrzne, natomiast bardziej

²⁵⁸ Elementy drewniane mogą stanowić nawet blisko 5% masy nowoczesnej naczepy do ciągnika siodłowego.

²⁵⁹ Występuje również pod nazwami *limbo ciemne* oraz *limbo białe* – wykazane w polskiej normie PN-D-97004: Okleiny z drewna pochodzącego z tropikalnej strefy klimatycznej. Różne określenia barw tego samego gatunku wynika z wyraźnej występujących ciemnych części twardzieli drewna.

²⁶⁰ Drewno niewykazane w normie PN-D-97004.

²⁶¹ Gatunek nieodnotowany w systemie taksonomicznym GRIN.

²⁶² Znanych jest pięć gatunków: cyprysik tępoulskowy, cyprysik Lawsona, cyprysik nutkajski, cyprysik groszkowy, cyprysik żywotnikowy.

miękkie drewna (np. europejska sosna zwyczajna, afrykańska abachi²⁶³ – *Triplochiton scleroxylon* K. Schum.) stanowią warstwę wewnętrzną deski. Pomiedzy warstwami fornirów mogą być wklejone warstwy laminatów z włóknami węglowymi (potocznie zwanymi karbonowymi). Poszczególne kompozycje rodzajów drewna stosowane na rakiety różnią się sprężystością i wagą, a przez to szybkością odbicia i łatwością kontroli kierunku lotu odbijanej piłki. Deski raketek są dobierane do każdej z siedmiu podstawowych strategii gry w tenisa stołowego.

Przykład rakiety do tenisa stołowego oraz jej budowę przedstawiono na rysunku 4-5.



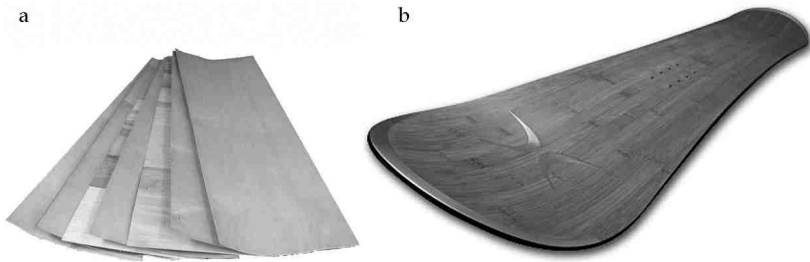
Rys. 4-5. Rakieta do tenisa stołowego: a – deska rakiety, b – pięciowarstwowa struktura deski, c – kompletna rakieta z okładzinami

Podobnie jak niektóre rakiety do tenisa stołowego, większość nart i snowboardów (rys. 4-6) jest wytwarzana z fornirów sklejonych z warstwą (lub warstwami) laminatu z włóknami karbonizowanymi lub szklanymi.

Snowboardy (rys. 4-6) są wyprofilowane i mogą mieć długość od 120 cm (dla dzieci) do 215 cm (profesjonalne, tzw. *alpejskie*). Ich szerokość wynosi od 15 do 28 cm (zazwyczaj 24-25). Ślizg deski (powierzchnia, którą się styka ze śniegiem) jest pokryty higroskopijnym tworzywem sztucznym²⁶⁴, które umożliwia absorpcję smarów zmniejszających tarcie.

²⁶³ Drewno bardzo sprężyste, o dobrych właściwościach akustycznych, służy do budowy afrykańskich bębnow. Dobrze izoluje ciepnie – jest stosowane do budowy saun.

²⁶⁴ Najczęściej jest to polietylen ultrawielkocząsteczkowy – UHMW-PE (ang. *ultra high molecular weight polyethylene*). UHMW-PE charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami ślizgowymi oraz mechanicznymi i nie wykazuje tendencji do korozji naprężeniowej. Jest stosowany m.in. w panewkach sztucznych stawów biodrowych.



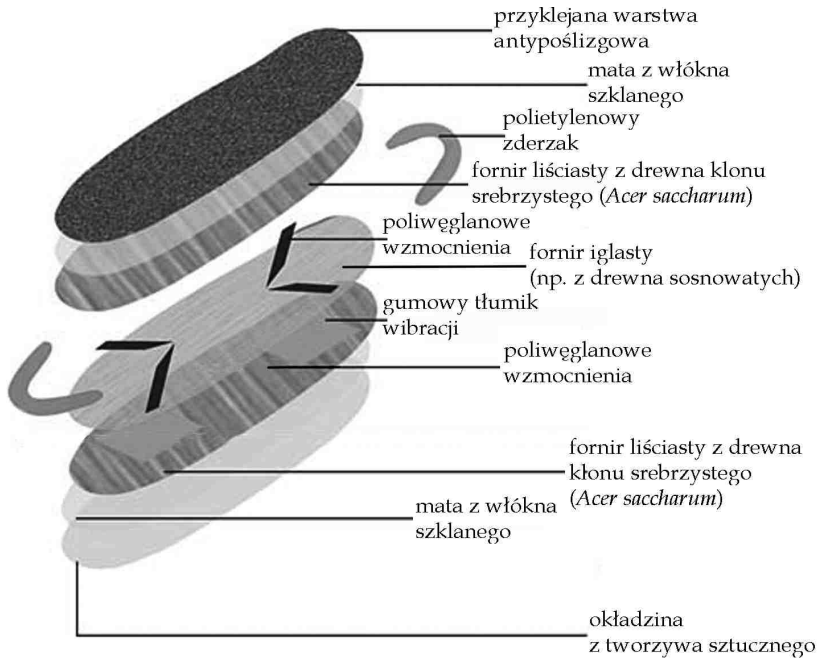
Rys. 4-6. Snowboard: a – siedmiowarstwowa struktura, b – snowboard okuty aluminium i wyprofilowany

Krawędzie boczne deski są zwykle zaopatrzone w okucia wykonane ze stopów metali lekkich (zabezpieczające przed rozwarstwieniem i ułatwiające wykonywanie zwrotów i ewolucji). Najpopularniejszymi rodzajami drewna na forniry stosowanymi w budowie desek są: buk, topola, brzoza, a nawet bambus (który z formalnego punktu widzenia nie jest drewnem).

Ze znaczącym udziałem drewna wykonuje się deskorolki. Tak zwany *deck* deskorolki, czyli główny jej element, pokryty tworzywem antypoślizgowym, jest wykonany najczęściej z siedmiu (rzadziej z dziewięciu) warstw fornirów, czasem z udziałem warstw laminatów węglowych lub aramidowych.

Popularnym materiałem stosowanym na deskorolki jest twarde i wytrzymałe drewno klonu srebrzystego (*Acer saccharinum* L.). Typowy siedmiowarstwowy *deck* najdłuższej deskorolki (tzw. *longboard* o długości 0,9-1,5 m) został przedstawiony na rysunku 4-7. Jest on zbudowany z trzech warstw fornirów, dwóch z twardego drewna liściastego (klonu) o włóknach poprzecznych do osi podłużnej oraz z jednej warstwy miękkiego drewna gatunków iglastych o włóknach zorientowanych podłużnie. Poszczególne warstwy drzewne oraz z tworzyw sztucznych są dobrane w sposób zapewniający deskorolce odpowiednią sprężystość. Powierzchnia jest pokryta wielowarstwową powłoką lakierową odporną na uderzenia.

Pewne typy kijów hokejowych są wykonywane z udziałem fornirów topolowych (np. topoli osiki – *Populus tremula* L.). Struktura kija przypomina warstwową budowę *decku* deskorolki, składa się z rdzenia z drewna osikowego wzmocnionego laminatami z włókien szklanych i węglowych. Wprawdzie kije z udziałem drewna są mniej popularne od



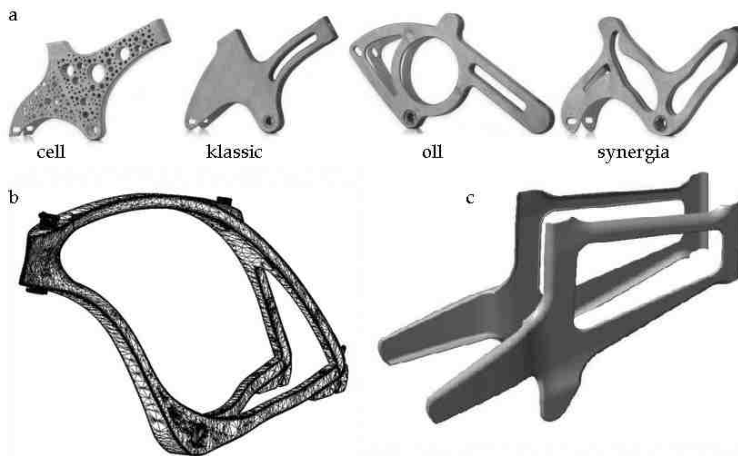
Rys. 4-7. Budowa sandwiczowa deskorolki typu *longboard*

kijów ze stopów aluminiowych oraz kijów kompozytowych wykonanych z tworzyw sztucznych (aramidowych, węglowych itp), jednak są produkowane. Niektóre kije mają wymienne końcówki (tzw. *łopatki*), które w zależności od potrzeby można wymieniać na wykonane z kompozytu drzewnego, metalowe lub z tworzyw sztucznych.

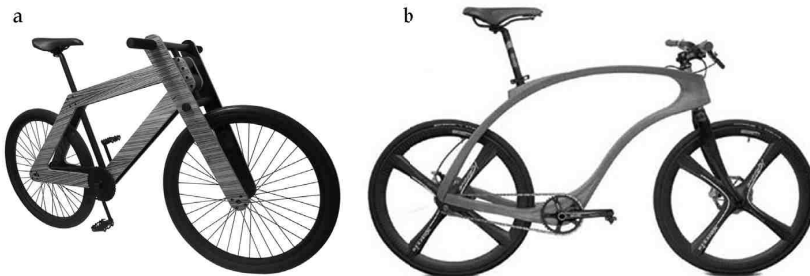
Dość nietypowym obszarem zastosowań tworzyw drewnianych jest wykorzystanie ich na ramy rowerów. Drewniane rowery są produkowane przez szereg firm, m.in: (1) portugalską Xylon Bikes, (2) dwie kooperujące holenderskie: Bleijh B.V. i Design Amsterdam, (3) austriacką GP, (4) niemiecką Waldmeister czy (5) brazylijską Gotabikes. Oprócz firm produkujących rowery są firmy specjalizujące się w produkcji części i akcesoriów rowerowych (np. River Bike USA - drewniane błotniki i podstawki pod rowery czy Brano Meres Engineering & Design USA - bambusowe ramy). W firmie GP prowadzono badania nad zastosowaniem sklejkowych elementów tłumiących drgania, jednak z uwagi na niemożność regulacji tłumienia (która zależy od wagi użytkownika roweru) zrezygnowano z dalszych badań.

Wybrane warianty konstrukcyjne drewnianych ram rowerowych zostały pokazane na rysunku 4-8, wszystkie są wykonane z profilowanej na gorąco sklejki, składającej się z kilku- kilkadziesiąt warstw. W miejscach mocowania tylnego koła, siodełka, suportu oraz widelca są wklejone metalowe tuleje (m.in. ze stopów tytanu). Rodzaj zastosowanego drewna jest niestety najczęściej objęty tajemnicą. Producenci zapewniają o doskonałych właściwościach wytrzymałościowych oraz amortyzacyjnych ram wykonanych z tak nietypowego materiału (KAUFMANN 2006).

Przykłady drewnianych rowerów zamieszczono na rysunku 4-9.



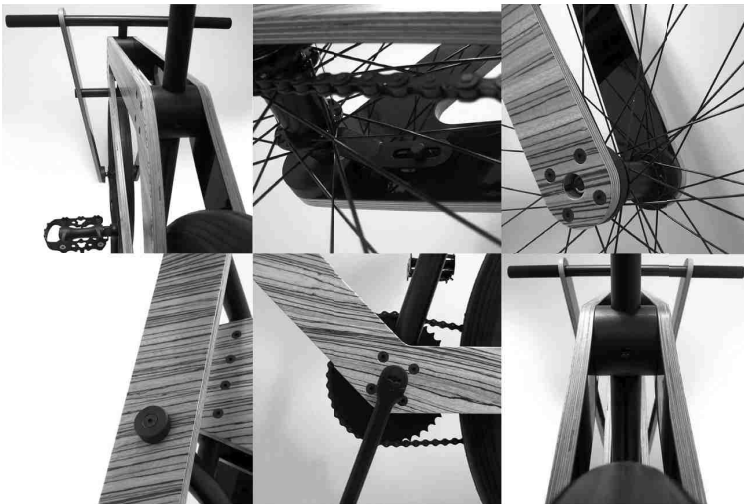
Rys. 4-8. Drewniane ramy rowerów firm: a - Xylon Bikes, Portugalia (cztery modele), b - Waldmeister, Niemcy, c - GP, Austria



Rys. 4-9. Drewniane rowery: a - *sandwichbike* wykonany w koprodukcji firm Bleijh B.V. i Design Amsterdam, Holandia, b - *jano* firmy Waldmeister, Niemcy

W opisywanych rowerach zastosowano zaawansowane technicznie rozwiązania konstrukcyjne, m.in: napęd paskiem zębatym (rower GP), widelce i koła o obręczach wykonanych z poliwęglanu (rower Waldmeister) itp. Wszyscy wymienieni producenci rowerów oferują mechanizmy i osprzęt renomowanych światowych firm.

Rysunek 4-10 przedstawia szczegóły holenderskiego „drewnianego” roweru *sandwichbike*. Jest on jeszcze w stadium koncepcyjnym. Ciekawie skonstruowana jest jego rama, która składa się z dwóch części będących lustrzanym odbiciem. Nabywca *sandwichbike’a* otrzymuje rower w częściach i samodzielnie skręca ze sobą obie połówki ramy, montując metalowe jej części, poszczególne układy (napędowy, jezdny, hamulcowy i kierowniczy) oraz pozostały osprzęt (siodelko, układ oświetleniowy, sygnał dźwiękowy, sakwy itp.) – przypomina to nieco składanie mebli do samodzielnego montażu.



Rys. 4-10. Szczegóły roweru do samodzielnego montażu *sandwichbike*, Holandia

Konstrukcja nośna i koła współczesnego roweru mogą być wykonane niemal w całości z drewna. Takie rowery przedstawiono na rysunkach 4-11 i 4-12. Rowery brazylijskiej firmy Gotabikes (rys. 4-11) są produkowane z sosnowej sklejki skutniczej (wodoodpornej) – kształtki sklejkowe są wytwarzane ręcznie, a następnie obrabiane, tak że rama sprawia

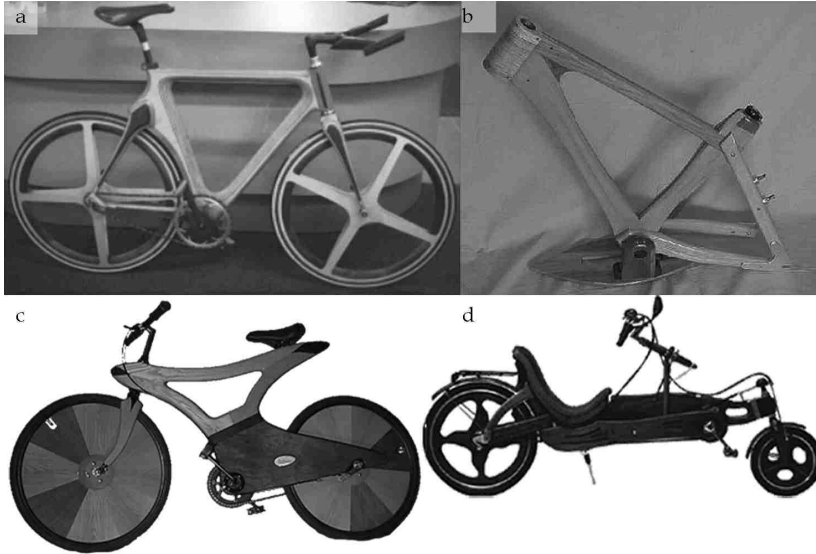


Rys. 4-11. Rower z ramą pozbawioną prostych linii, inspirowaną kształtami natury, produkcji Gotabikes, Brazylia (w górnym prawym rogu – rama o innym kształcie w trakcie produkcji)

wrażenie, jakby była wykonana z jednego kawałka drewna o naturalnej krzywiźnie. Rowery Gotabikes są wytwarzane jednostkowo, tylko na indywidualne zamówienie i – jak zapewnia producent – nie ma dwóch identycznych egzemplarzy. Czas produkcji i niezbędnych testów jednego roweru trwa ponad dwa miesiące, rama jest objęta dwuletnią gwarancją. Waga roweru gotowego do jazdy mieści się w granicach 15-23 kg (23 kg waży rower z drewnianymi kołami).

Najtańszy model Gotabikes z linkami hamulcowymi poprowadzonymi na zewnątrz ramy kosztuje 800 euro, wersja z linkami wewnątrz ramy – 1000 euro, natomiast najdroższy model, z drewnianym widelcem, kosztuje 1800 euro. Do wszystkich modeli oferowane są drewniane koła kosztujące około 1200 euro za komplet.

Na rysunku 4-12 przedstawiono kilka przykładów drewnianych rowerów o ramach i obręczach kół z drewna.

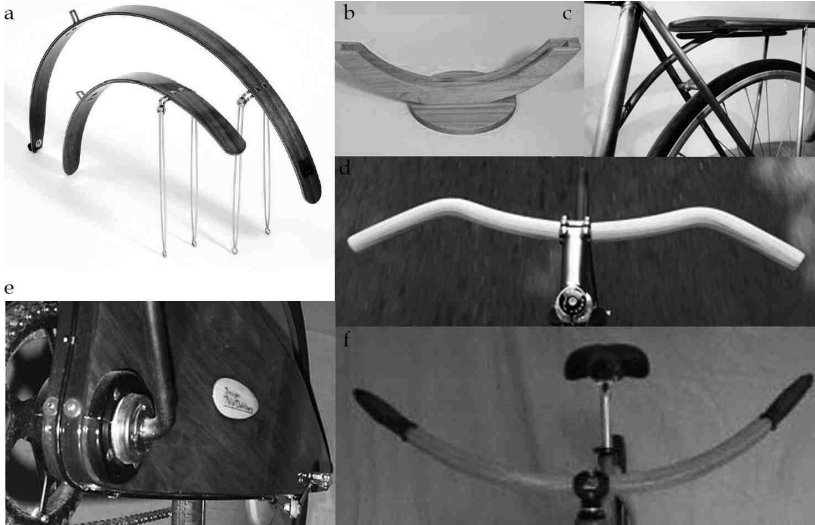


Rys. 4-12. Rowery wykonane niemal w całości z drewna: a – rower (WOODBIKE 2007), b – rama *woodbike* wykonana ze sklejki (brzoza, wiśnia, jesion, dąb), c – konstrukcja amatorska (www.peterhans.nu), d – pojazd *freedom* (OTTAVIA'S SUITCASE 2007)

Z drewna wykonuje się również inne części rowerowe, takie jak błotniki (rys. 4-13 a), podstawki na rower (rys. 4-13 b), bagażniki (rys. 4-13 c) czy kierownice (rys. 4-13 d, f). Błotniki drewniane (takie jak pokazane na rys. 4-13 e) wytwarza się ze sklejki z twardego drewna drzew rosnących w Ameryce Północnej: jesionu, klonu, orzesznika (*Carya Nutt.* – 14 gatunków) oraz z drzew tropikalnych: amarantu (*Peltogyne venosa* (Vahl) Benth.), palisandru (*Dalbergia spp.*), wenge (*Millettia laurentii* De Wild.) oraz lacewood (*Cardwellia sublimis*). Forniry są sklejane wodoodpornym klejem oraz impregnowane wodoodpornym olejem (tzw. *teak oil*). Kierownice są zwykle wykonywane z drewna bukowego giętego na gorąco.

Rama roweru może być także wykonana z łądy bambusa²⁶⁵ (rys. 4-14) wklejonych w metalowe mufy. Pewnym problemem jest tu dobór

²⁶⁵ Więcej informacji na temat zastosowania bambusa w budowie rowerów znajduje się na stronie internetowej firmy Calfee Design (www.calfeedesign.com/bamboo.htm) oraz na stronie projektu Bamboo Bike realizowanego przez The Earth Institute w Columbia University (www.bamboobike.org).



Rys. 4-13. Drewniane części rowerowe: a - błotniki (RIVER CITY BICYCLES 2007), b - podstawka na rower (RIVER CITY BICYCLES 2007), c - drewniany bagażnik (FAST BOY CYCLES 2008), d - drewniana kierownica (FAST BOY CYCLES 2008), e - osłona łańcucha, konstrukcja amatorska (www.peterhans.nu), f - drewniana kierownica (KAUFMANN 2006)



Rys. 4-14. Rower bambusowy Brano Meres Engineering & Design, Słowacja (MERES 2007)

łodyg bambusa, tak aby miały odpowiednie wymiary, odpowiednią jakość powierzchni (brak rys i wgnieceń) i wytrzymałość (nieporażone przez owady). Rama została zrobiona z siedmiu odcinków malezyjskiego bambusa wklejonych (i zabezpieczonych wkretami) w kompozytowe mufy wykonane z udziałem włókna węglowego. Waga takiej ramy nie przekracza 2 kg, natomiast masa całkowita roweru gotowego do jazdy wynosi 10,7 kg. W porównaniu z ramą wykonaną w całości z kompozytów węglowych rama bambusowa subiektywnie lepiej tłumi drgania wzbudzane podczas jazdy, jest też zaskakująco trwała, rower pokazany na rysunku 4-14 wytrzymał dwa lata eksploatacji (wystąpiła jedna awaria – w miejscu mocowania hamulca przedniego poluzowała się mufa).

Sklejka ma bardzo dużo zastosowań w budowie maszyn. Sklejka bukowa lub bukowo-brzozowa (najczęściej pięciowarstwowa) znajduje zastosowanie na elementy amortyzujące w meblarstwie (w meblach do spania, fotelach itp.). Specjalnego rodzaju sklejka o bardzo dobrych właściwościach elektroizolacyjnych, tzw. *elkon*, jest stosowana do wytwarzania rdzeni wielkowymiarowych transformatorów energetycznych. Tzw. *sklejka transformatorowa*²⁶⁶ jest produkowana przez sklejanie na gorąco (145-150°C), pod wysokim ciśnieniem (6-12 MPa) fornirów bukowych o grubości 2 mm żywicą fenolowo-formaldehydową w roztworze alkoholowym. W sąsiadujących ze sobą warstwach forniru włókna mogą przebiegać prostopadle (tzw. *elkon krzyżowy*) lub równolegle (*elkon równoległy*²⁶⁷). Elkon jest produkowany zgodnie z normami PN-EN 60893-2:2005 oraz DIN 7707. Napięcie przebicia równoległe do warstw w temperaturze 90°C wynosi 35 kV, natomiast wytrzymałość elektryczna prostopadle do warstw – 7 kV/mm.

Sklejka jest stosowana wszędzie tam, gdzie do wycinania elementów lub wzorów używa się laserów. Znaczącym odbiorcą sklejki są producenci wykrojników do automatycznej produkcji opakowań kartonowych. Wycinają oni w sklejce skomplikowane rowki do osadzania metalowych ostrzy wykrawających w kartonach kształt rozłożonego opakowania. Do tego typu zastosowań wykorzystuje się sklejkę o ulepszonej budowie – bez żadnych ubytków na powierzchni oraz bez pustych przestrzeni wewnątrz płyty (wady takie mogą zakłócić proces cięcia promieniem lasera). Sklejka do osadzania wykrojników jest produkowana z drewna

²⁶⁶ Na przykład Elkon® produkowany przez firmę Fabryka Sklejka-Pisz SA.

²⁶⁷ Jak podaje producent, ze względów technologicznych do 15% fornirów może być usytuowanych poprzecznie.

liściastego (np. 100% brzozy, 100% olszy lub po 50% brzozy i olszy), jako suchotrwała. Forniry są zwykle sklepane klejami na bazie żywicy mocznikowo-formaldehydowej lub żywicy mocznikowo-melaminowo-formaldehydowej.

Drewno prasowane warstwowo, nasycane tworzywami sztucznymi

Drewno prasowane z żywicami sztucznymi (opisane na s. 85) klasy A, laminowane wzdłużnie, jest używane do wyrobu trzonek do młotków, łat do bijaków, płyt ślizgowych, zjeżdżalni, okładzin hamulcowych i panewek łożysk ślizgowych, podłóg pojazdów dostawczych, elementów przemysłowych linii montażowych, części transformatorów. Drewno klasy B, laminowane krzyżowo, stosuje się na koła zębate, siedzenia w środkach komunikacji zbiorowej, blaty obrabiarek do drewna, a drewno klasy C, laminowane gwiazdźście – na krążki cierne, krążki przekładni pasowych, koła napędzające rolki przenośników przemysłowych, strojnice fortepianów, a nawet podłogi bolidów Formuły 1 itp.

Pancerne drewno prasowane delignit® znajduje zastosowanie w pojazdach wojskowych jako warstwa pochłaniająca energię wybuchów i odłamków. W tabeli 34 porównano właściwości kuloodporne delignitu z typowym szkłem kuloodpornym. Z przytoczonych danych wynika, że tworzywo drewnopochodne ma zaskakująco dużą odporność na penetrację przez pociski typowych broni ręcznych. Jeżeli wziąć pod uwagę, że ciężar właściwy delignitu jest blisko dwukrotnie mniejszy od ciężaru właściwego szkła, mniej więcej półtorakrotnie mniejszy od ciężaru właściwego stopów aluminium i ponad trzy razy mniejszy od analogicznych wartości dla stali, to właściwości te są tym bardziej nieoczekiwane.

Według internetowego serwisu dla hobbystów Gizmo trwają prace nad budową nowego pancerza amerykańskiego wielozadaniowego samochodu terenowego o potocznej nazwie *humvee*. Nowy pancerz wykonany z udziałem fornirów z balsy i laminatów szklanych ma zmniejszyć całkowitą wagę pojazdu o blisko 10% (GIZMO 2008).

Interesujące jest współczesne zastosowanie drewna w budowie łożysk ślizgowych. Materiał ten stosowany jest obecnie niezwykle rzadko, jednak charakteryzuje się pewnymi korzystnymi cechami. Łożysko drewniane (lub drewnopochodne) można nasycić środkami smarnymi i w ten sposób uzyskać łożysko niewymagające smarowania podczas eksploatacji. Udanym rozwiązaniem było skonstruowanie łożysk kompozytowych metalowo-drewnianych, łączących zalety obu materiałów. W metalowej obudowie zamykano drewniane panewki bezpośrednio stykające się

Tabela 34

Odporność wybranych materiałów na przestrzelenie (dane producentów)

Broń	Amunicja/ masa pocisku	Prędkość wylotowa pocisku [m/s]	Energia pocisku [J]	Ode- głość [m]	Grubość pojedynczej lub podwójnej płyty Delignit® BSP* [mm]	Grubość pojedynczej płyty ze szkła** kulo- odpornego (3 strzały) [mm]
Pistolet (9 mm)	9×19 mm Parabellum (v. MK2Z)/ 9,02 g	405 ±15	616-714	3	30	19-22
Pistolet .357 Magnum (9,07 mm)	Półpłaszczowy pocisk płasko- nosowy/ 10,23 g	450 ±12	978-1089	3	35	22-24
Pistolet .44 Magnum (11,18 mm)	Półpłaszczowy pocisk płasko- nosowy/ 15,6 g	471 ±9	1665- 1797	3	40	28-32
Karabin (7,62 mm)	7,62×51 mm, pocisk L2A2/ 8,3 g	830 ±9	3202- 3344	10	2×40, 10 pomiędzy	66-70
Pistolet .357 Magnum (9,07 mm)	Półpłaszczowy pocisk płasko- nosowy/ 10,23 g	435 ⁺³⁰ ₀	965-1103	3	35	-
Pistolet .44 Magnum (11,18 mm)	Półpłaszczowy pocisk płasko- nosowy/ 15,6 g	456 ⁺³⁰ ₀	1622- 1842	3	45	-
Karabin (5,56 mm)	5,56×45 mm, pocisk SS109/ 3,95 g	919 ⁺³⁰ ₀	1478- 1576	10	2×30, 5 pomiędzy	-
Strzelba 12 bore (18,53 mm)	12 breneka/ 28,35 g	406 ⁺⁴⁰ ₀	2337- 2820	10	50	-

*Produkcji LT Lewis Co., Wielka Brytania (www.ltlewis.co.uk).**Produkcji Jeet & Jeet Glass and Chem. P. Ltd., Indie (www.jeetglassindia.com).

z wałem. Powierzchnie ślizgowe (panewki) łożysk z drewna litego wykonywano z twardego drewna następujących gatunków drzew:

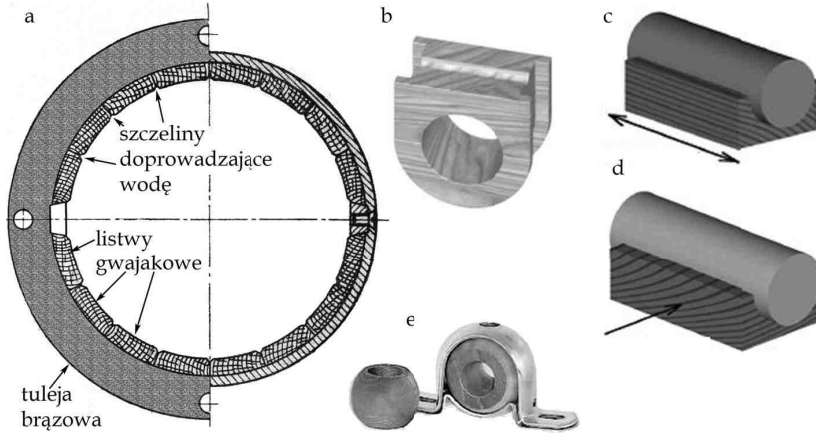
- gwajakowiec lekarski²⁶⁸ (*Guaiacum officinale* L.),
- azobe (*Lophira alata* Banks ex Gaertn.),
- micro (*Eucalyptus microcorys* F. Muell),
- camphorwood (*Dryobalanops aromatica* C.F. Gaertn.),
- tek (*Tectona grandis* L.),
- blackbutt (*Eucalyptus pilularis* Sm.),
- poon (*Calophyllum tomentosum* Wight),
- degame (*Calycophyllum candidissimum* (Vahl) DC.),
- bukszpan²⁶⁹ (*Phyllostylon brasiliensis* Benth. & Hook. f.),
- grusza pospolita (*Pyrus communis* L.),
- dąb szypułkowy (*Quercus robur* L.),
- grab pospolity (*Carpinus betulus* L.).

Szczególnie użytecznym rodzajem drewna stosowanego na elementy ślizgowe jest gwajak. Jest to drewno o ściślejszej, zwartej budowie zawierające substancje nadające mu właściwości samosmarne. Przykład łożyska pochwy okrętowego wału śrubowego o panewce wykonanej z brązu i wyłożonej listewkami modyfikowanego drewna gwajakowego przedstawiono na rysunku 4-15 a. Drewno na okładziny panewki przechowuje się i obrabia w stanie wilgotnym w taki sposób, aby włókna były zorientowane w przybliżeniu promieniowo (rys. 4-15 d). Po nadaniu drewnu obróbką skrawaniem odpowiedniego kształtu impregnuje się je przez kilka do kilkunastu godzin w oleju maszynowym w temperaturze 110°C. Łożysko takie jest smarowane i chłodzone wodą zaburtową; bardzo ważne z trybologicznego punktu widzenia są podłużne szczeliny doprowadzające wodę.

Współcześnie w budowie łożysk stosuje się przede wszystkim drewno prasowane z żywicami sztucznymi (np. tworzywo o handlowej nazwie

²⁶⁸ *Gwajak* – jeden z najcięższych użytkowych gatunków drewna, o ciężarze właściwym 1,3-1,44 g/cm³ (najcięższym gatunkiem jest *Olea laurifolia* – vide tabela 13, s. 40) oraz dużej odporności na ścieranie i ściskanie, niepodatne na impregnację. Gwajak jest otrzymywany z gwajakowca – drzewa rosnącego w Ameryce Środkowej. Ma naturalną odporność na niekorzystne wpływy atmosferyczne, rozkład przez grzyby, mikroorganizmy oraz owady. W żywicy znajduje się o-metoksyfenol (o-hydroksyamizol) stosowany w medycynie jako preparat antyseptyczny i wykrztuśny. Znalazł zastosowanie w budowie maszyn (koła zębate, części trące, łożyska śrub na statkach i łodziach itp.).

²⁶⁹ [...] w południowych krajach drzewo, u nas ozdobna chrościnka (LINDE 1808, t. 1, s. 192).



Rys. 4-15. Współczesne łożyska ślizgowe z materiałów drewnianych: a – okrętowe wału śrubowego, b – z lignostonu (Woodex®), c – nieprawidłowy kierunek włókien (wzdłużny), d – prawidłowy kierunek włókien (promieniowy), e – sposób zabudowy łożyska

lignostone®, najczęściej prasowane drewno buku – *Fagus sylvatica* L.). Tego typu łożyska znakomicie sprawdziły się przy wałach turbin i wałach okrętowych oraz w czopach walcarek używanych w hutnictwie. Stosowano je również w maszynach przemysłu tekstylnego i graficznego oraz w przemysłowych pralkach i wentylatorach pokojowych²⁷⁰. Przykład łożyska z drewna prasowanego z żywicami sztucznymi (w temperaturze 100-160°C pod ciśnieniem 30-40 MPa, z dodatkiem oleju) przedstawia rysunek 4-15 b. Sposób montażu tego typu łożyska przedstawiono na rysunku 4-15 e.

Łożyska ślizgowe wykonane z tworzyw drewnianych wykazują w niektórych zastosowaniach energooszczędność oraz większą trwałość w porównaniu z łożyskami wykonanymi ze stopów metali (z tzw. *stopów łożyskowych*). Przykładowo, zespoły wstępne walcarek do blach z łożyskami z brązu smarowanymi smarami technicznymi na 1 t wyrobu zużywały od 45 do 55 kW·h energii, a z łożyskami z okładzinami drewnianymi i smarowaniem ciśnieniowym wodą – o wiele mniej (średnio od 33 do 35 kW·h).

²⁷⁰ Producenci łożysk z materiałów drewnopochodnych to m.in.: Woodex Bearing Company Ltd. USA (woodexbearing.com), Pobco USA (pobcoplastics.com), Deeco Metals USA (deeco.net/prodindx.htm), Solus Industrial Innovations USA (solusii.com/cat-sec-bearings.html), Slideways Inc. USA (slideways.com/bearings.html).

W małej walcarce starcie 1 mm łożyska z drewna gwajaku ze smarowaniem ciśnieniowym wodą następowało po wyprodukowaniu około 4000 t wyrobu, a w łożyskach z brązu cynowo-cynkowego smarowanego smarami technicznymi – już po 100 t. Z tego prostego zestawienia wynika, że trwałość łożysk z okładzinami drewnianymi była prawie 40 razy większa niż metalowych. Mniejsza twardość gwajaku w porównaniu z metalami też okazała się zaletą: dzięki temu końce wałów miały o wiele większą żywotność (KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2005 a).

Porównanie osiągnięć łożysk ślizgowych wykonanych z typowych materiałów z łożyskami z lignostonu przedstawia tabela 35.

Tabela 35

Obciążalność wybranych materiałów łożyskowych współpracujących z czopem stalowym (WOODDEX 2007)

Materiał	Naciski p_{\max} [MPa]	Prędkość v_{\max} [m/s]	Maksymalne $p \cdot v$
PTFE (teflon)	3,45	0,51	0,04
Nylon 101*	2,76	1,83	0,11
UHMW-PE**	8,27	0,25	0,14
Woodex (impregnowane drewno klonu)	13,80	10,20	0,42
Babit (89% Sn)	10,30	6,10	1,05
Brąz C93200 (83% Cu, 7% Pb, 6,9% Sn, 2,5% Zn)	27,60	3,81	2,63

*Nylon stosowany na łożyska urządzeń mających kontakt z żywnością.

**Polietylen o dużej gęstości (opisany w przypisie 264 na s. 319).

Tworzywa drzewne do zastosowań łożyskowych nie są pozbawione pewnych wad. W porównaniu z panwiami wykonanymi z metalu panwie z materiałów drzewnych charakteryzują się małą przewodnością ciepła (k od 0,27 do 0,30 W/m·K)²⁷¹, co utrudnia odprowadzanie ciepła z węzła tarcia, oraz wykazują wady typowe dla panwi wykonanych z polimerów:

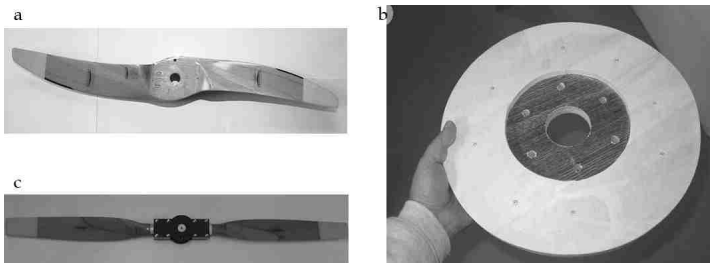
- wrażliwość na podwyższoną temperaturę (> 80°C), co jest szczególnie niekorzystne w stanach awaryjnych (zużycie adhezyjne),
- wrażliwość na wpływ wody – pod jej wpływem materiał pęcznieje, co powoduje: (1) niemożność uzyskania stałej w czasie geometrii, zwłaszcza utrzymania stałego luzu promieniowego, co może mieć

²⁷¹ Stale wysokowęglowe $k = 40$ W/m·K, brązy $Pc = 85$ W/m·K.

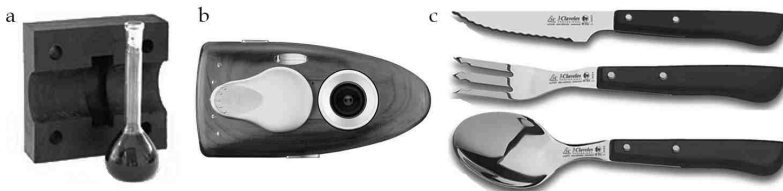
wpływ na warunki pracy, (2) klin smarny ma małą nośność (szczególnie przy smarowaniu hydrodynamicznym) – łożysko pracuje w obszarze tarcia mieszanego.

Drewno, mimo swoich wad, przez długi czas nie miało dobrego zamiennika. W środowisku kwaśnym rozkład drewna rozpoczyna się dopiero przy pH 2, podczas gdy gwałtowna korozja stopów żelaza z węglem następuje już przy pH 5, w środowiskach słabozasadowych korozja drewna praktycznie nie występuje (KOZAKIEWICZ i MATEJAK 2005 a). Łożyska drewniane są obecnie stosowane w rolnictwie do łożyskowania wałów wytrząsaczy klawiszowych (np. łożyska produkcji firmy John Deere wykonane z czerwonego buku kanadyjskiego – *Fagus sylvatica* f. *atropurpurea* G. Kirchn., pokazane na rys. 4-17 a).

Drewno prasowane warstwowo (lignofol) jest wykorzystywane do produkcji śmigieł lotniczych; przykład takiego śmigła przedstawiono na rysunku 4-16 c.



Rys. 4-16. Przykłady drewnianych części samolotów: a – śmigło Woodcomp, typ 004, jesion i buk, sześć warstw, średnica 690 mm, b – osłona silnika ze sklejki, c – śmigło Woodcomp, typ 1000/2, drewniany rdzeń i laminatowa warstwa wierzchnia, średnica 1150 mm



Rys. 4-17. Przykłady zastosowań prasowanego drewna: a – łożysko wytrząsaczy klawiszowych (John Deere) wykonane z czerwonego buku kanadyjskiego – połowa panewki, b – obudowa aparatu fotograficznego wykonana z prasowanego drewna cyprysika (Olympus), c – części chwytowe sztućców z prasowanego buku

Innym przykładem zastosowania prasowanego drewna mogą być: obudowa aparatu fotograficznego (rys. 4-17 b), części chwytowe sztuców (rys. 4-17 c), a także czółenka tkackie stosowane w maszynach włókienniczych. Czółenka tkackie mogą być również wykonane z litego drewna (rys. 4-18).



Rys. 4-18. Drewniane czółenka tkackie

4.4. Nietypowe zastosowania tworzyw drzewnych

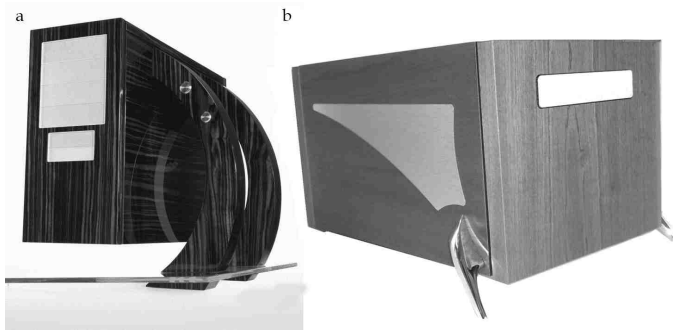
żyć w zgodzie z naturą
(Zenon z Kition, 335-263 p.n.e.)²⁷²

Można zaryzykować stwierdzenie, że każde współczesne zastosowanie drewna w budowie maszyn jest nietypowe. Pewne użycia są jednak bardziej niespodziewane od innych...

Co może się wydać zaskakujące, to fakt, że liczba producentów drewnianych peryferii komputerów jest dość duża. Większość firm wytwarza drewniane obudowy komputerów i monitorów LCD oraz drewniane klawiatury i myszy ze sklejki, jednak zdarzają się podzespoły „maszyn cyfrowych” wykonane z litego drewna. Wybór spośród gatunków drewna

²⁷² VOGT (2004).

jest spory, dominują gatunki tropikalne – liczy się nietypowy rysunek drewna i jego barwa. W przypadku peryferii i podzespołów komputerowych z litego drewna może to być np. drewno olszy, jesionu, brzozy, kłonu, wiśni, hebanu, mahoni, wiązu, jodły, orzesznika (*Carya Nutt.*), dębu, oliwki, gruszy, topoli białej, dalbergii (tzw. *palisandru*) lub satin (*Chloroxylon swietenia* A. DC.). Obudowa komputera może być wykonana zarówno z litego drewna, jak i ze sklejki. Na rysunku 4-19 a przedstawiono obudowę ze sklejki z obłogami hebanowymi (*Diospyros ebenum* J. Koenig), natomiast na rysunku 4-19 b – obudowę z litego drewna afrykańskiego imitującego małoń o nazwie *aboudikro* lub *sapele-mahogany*.



Rys. 4-19. Komputery (IAMECO 2007): a – obudowa ze sklejki (obłogi z hebanu), b – obudowa z litego drewna *aboudikro*

Na rysunku 4-20 pokazano przykłady peryferii komputerowych wykonanych z litego drewna.

Niewątpliwą zaletą drewnianych myszy, klawiatur i monitorów, oprócz bezspornych walorów estetycznych i dotykowych, jest niepowtarzalność. Nie ma dwóch identycznych egzemplarzy, tak jak nie ma dwóch identycznie wyglądających kawałków drewna.

Innym nietypowym obszarem zastosowań dla litego drewna jest budowa samochodów osobowych. Drewno w motoryzacji jest stosowane od momentu powstania pierwszych samochodów i nie zostało nigdy w pełni wyparte przez inne materiały. Wydawać by się mogło, że w czasach współczesnych ten rodzaj materiału inżynierskiego pełni jedynie rolę dodatku, np. elementu zdobienia wnętrza. Jednak, pomimo 100 lat postępu w dziedzinie motoryzacyjnych materiałów konstrukcyjnych, w XXI wieku tworzywa drzewne są wciąż powszechnie wykorzystywane



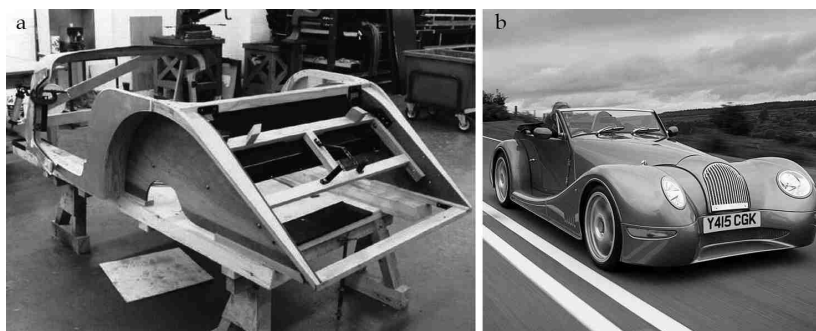
Rys. 4-20. Peryferia komputerowe wykonane z litego drewna (Holzkontor)

w motoryzacji – wytwarza się nawet seryjnie samochody osobowe o konstrukcji nośnej z drewna litego²⁷³.

Przykładem producenta seryjnego samochodu o konstrukcji nośnej z drewna może być angielska firma Morgan, produkująca drewniane klasyczne auta nieprzerwanie od 1910 roku. Model *aero 8* (rys. 4-21) produkowany od 2001 roku jest wykonany w dużej części ze sklejki jesionowej (konstrukcja nośna nadwozia, drzwi) i wyposażony w silnik BMW o pojemności skokowej 4400 cm³. Oprócz *aero 8* firma produkuje jeszcze dwa modele o drewniano-stalowej ramie: *plus 8* i *V6 roadster*. Wymienione trzy modele są wyposażone w silniki o dużych mocach (92 kW – *plus 8*, 150 kW – *V6 roadster*, 238 kW – *aero 8*). Duże moce jednostkowe (1-2,5 kW/kg) powodują duże obciążenia drewnianej konstrukcji nośnej.

Samochody produkcji Morgan, oprócz ram z drewna, mają także wnętrza wykończone z udziałem tworzyw drzewnych.

²⁷³ Najprawdopodobniej najbardziej znany samochód o drewnianej konstrukcji nośnej to produkowany w latach 1931-1956 DKW Front o oznaczeniach F1-F9.



Rys. 4-21. Produkowany seryjnie samochód o drewnianej konstrukcji aero 8 (MORGAN MOTOR COMPANY 2008): a - drewniana rama, b - samochód podczas jazdy

Drewno jest nieszablonywym materiałem dla miłośników motoryzacji. Jednym z tego rodzaju hobbystów, konstruktorów drewnianych samochodów, jest Wasily Łazarenko z ukraińskiej miejscowości Czerniowce. Drewniany pojazd, który wykonał, to tak naprawdę przebudowany opel meriva z silnikiem o mocy 76 kW z 1981 roku. Samochód przedstawiony na rysunku 4-22 wykonano z kształtek sklejkowych²⁷⁴. Pojazd jest

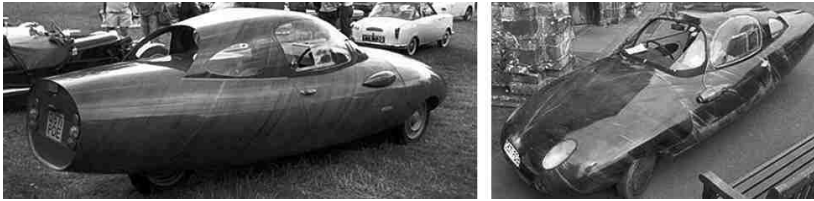


Rys. 4-22. Drewniany samochód „dwustronny” (ITAR-TASS 2007)

²⁷⁴ Źródło: Itar-Tass/Vasily Kiyashko, www.itar-tass.com, dostęp 4.12.2007.

„dwustronny”: lewa strona to nowoczesna limuzyna, natomiast prawa to klasyczny kabriolet.

Na uwagę zasługuje też bardzo mocno przebudowany citroen 2cv z 1969 roku (rys. 4-23). Jego karoseria została wykonana ze sklejki mahoniowej. Według zapewnień właściciela auto, dzięki opływowym kształtom, osiąga prędkość ponad 160 km/h²⁷⁵.



Rys. 4-23. Trójkołowy drewniany samochód *tryane II*

Japońska firma produkująca meble zbudowała w celach promocyjnych w pełni funkcjonalny samochód, którego wszystkie części poza układem napędowym i jezdny są wykonane z drewna (rys. 4-24). Trzyosobowe auto ma wymiary 2500 × 1300 × 1100 mm (długość × szerokość × wysokość), waży 390 kg, a dzięki silnikowi o pojemności skokowej 175 cm³ osiąga prędkość maksymalną 90 km/h. Do budowy wykorzystano trójkołowe podwozie oraz układ napędowy niewielkiej furgonetki²⁷⁶. W samochodzie tym zadbano nawet o to, żeby, oprócz karoserii, wykonać z drewna całe wyposażenie wnętrza (m.in. fotel kierowcy i ławkę pasażerską), obudowy lamp i osłony felg.

Z drewna można wytwarzać „ozdobne” mechanizmy zębate zegarów ściennych, na rysunku 4-25 b przedstawiono fragment drewnianego koła wychwytowego. W zegarze zastosowano kwarcowy układ regulacji chodu, a do napędu wskazówek służy mechanizm wykonany z tworzyw drewnopochodnych wykończonych mahoniowymi oblogami. Obudowa zegara jest również drewniana (HOLMES CLOCKWORKS 2007).

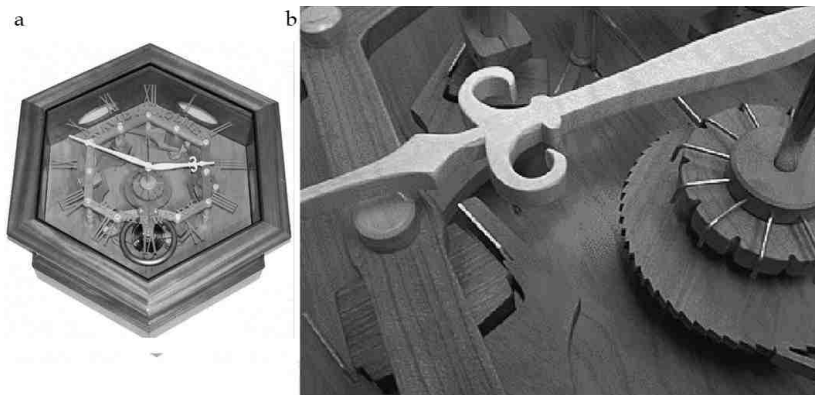
Mechanizmy napędowe oraz obudowy zegarów drewnianych najczęściej są wytwarzane ze standardowej pięciowarstwowej sklejki meblarskiej. Preferowane są sklejki z fornirów brzoźowych z uwagi na łatwość gięcia tego gatunku drewna. Koła zębate są wycinane wycinarką laserową

²⁷⁵ Źródło: www.t-six.com, dostęp 4.12.2007.

²⁷⁶ Źródło: www.koln32.jp, dostęp 4.12.2007.

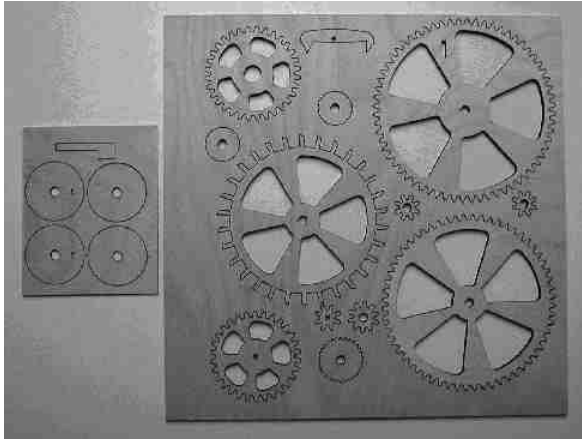


Rys. 4-24. Japoński drewniany samochód (SADA KENBI CO LDT 2007)

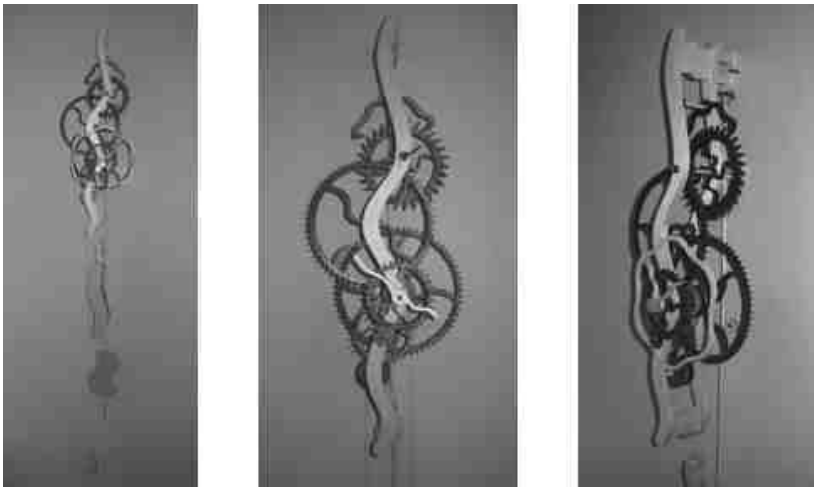


Rys. 4-25. Drewniany zegar (HOLMES CLOCKWORKS 2007): a – zegar w obudowie, b – fragment mechanizmu napędowego

(rys. 4-26). Możliwe jest także budowanie zegarów z litego drewna (np. orzesznika), ale ten rodzaj materiału jest mniej wytrzymały i trudniejszy w kształtowaniu.



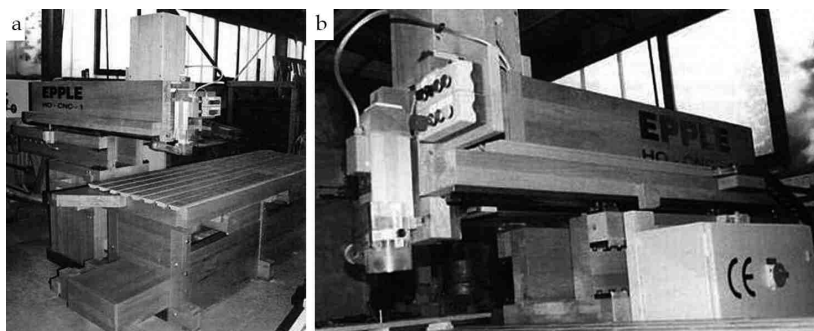
Rys. 4-26. Płyta z wyciętymi laserem kołami zębatymi
(THE CLOCK MECHANICS 2007)



Rys. 4-27. Drewniany mechanizm zegarowy *serpentine* (WOODEN-GEAR-CLOCKS 2007)

Drewniane mechanizmy zegarowe pokazano na rysunku 4-27.

Drewno jest bardzo dobrym tworzywem dla modelarzy i artystów, ma niebanalny wygląd, jest łatwo dostępne oraz nie stwarza problemów podczas obróbki. Niewątpliwie niebanalnym zastosowaniem drewna jest



Rys. 4-28. Obrabiarka CNC do drewna zbudowana z drewna klejonego (KURZ i GRUNDLER 1998): a - widok ogólny, b - jednostka frezarska

wykonane z tego materiału trzyosiowe centrum obróbcze – *ława stolarska CNC* (niem. *CNC-Hobelbank*). Taką maszyną przeznaczoną do obróbki drewna przedstawiono na rysunku 4-28.

Główne zespoły ławy stolarskiej, tzn. jej korpus, tzw. korpus przesuwny (odpowiednik suportu w tradycyjnych maszynach) i jednostka frezarska, są wykonane z litego drewna, fakt ten KURZ i GRUNDLER (1998) komentują, że od tego konstruktorom maszyn „włosy się jeżą”. Konstruktor maszyny, Roland Epple, właściciel małej firmy produkującej drewniane ławy stolarskie (zwane też strugnicami albo stołami stolarskimi) i rozmaitego rodzaju oprzyrządowania i narzędzia stolarskie, wyposażył produkowaną przez siebie ławę w głowicę umożliwiającą wiercenie, frezowanie, grawerowanie i obróbkę konturów wszystkich możliwych elementów z drewna, tworzywa sztucznego, a nawet z metali lekkich. Głównym materiałem konstrukcyjnym maszyny jest parowany, suszony buk zwyczajny, przetwarzany na części maszynowe w formie drewna klejonego.

Ława stolarska CNC pomysłu Epplego pracuje w zakładzie stolarskim w Lesie Bawarskim (południowo-wschodnie Niemcy), gdzie produkuje się elementy urządzenia wnętrza (tzw. *galanterię drzewną*), części do renowacji mebli oraz w małych i średnich seriach podzespoły drewniane dla fabryki lamp. Istnieją pomysły dalszego rozwoju konstrukcji maszyny, ich autorem jest inżynier Ralf Dechert z firmy INA OHG (Technika Liniiowa), a dotyczą one m.in. zastosowania przewodniczących dla przesuwniej jednostki frezarskiej. Podstawowym argumentem za celowością stosowania maszyny z drewna jest mniejszy koszt produkcji zespołów

konstrukcyjnych maszyn (korpusy i duże zespoły) niż odlewów i zespołów spawanych. Konstruktor maszyny widzi duże możliwości redukcji kosztów wytwarzania obrabiarek stosowanych w przemyśle drzewnym. W porównaniu z metalem drewno, oprócz niższej ceny, charakteryzuje się innymi zaletami, np. termiczną stabilnością wymiarową, lepszym tłumieniem drgań, mniejszą masą całkowitą maszyny itp.

Opisywane trzyosiowe centrum obróbcze ma następujące parametry techniczne:

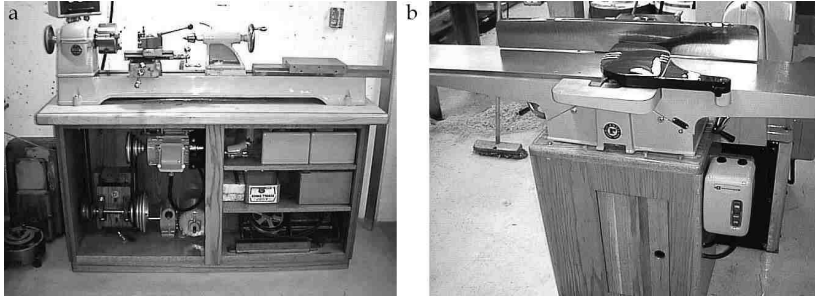
- zakres poziomy korpusu przesuwnego X - 2300 mm (czyli nieco więcej od wartości przeciętnej dla tego rodzaju obrabiarek), Y - 830 mm (poniżej przeciętnej), zakres pionowy Z - 350 mm (poniżej przeciętnej),
- moc silnika głównego 2,2 kW (dużo poniżej przeciętnej),
- posuw do 100 mm/s (wartość przeciętna),
- waga całkowita - 1500 kg (poniżej przeciętnej).

Drewno może być tworzywem do budowy różnego rodzaju prototypów. Na rysunku 4-29 przedstawiono dwa przykłady frezarek CNC o konstrukcji nośnej z tworzyw drewnopochodnych.

Drewno bywa również stosowane do budowy mniej ważnych części obrabiarek (obudowy, szafy itp.). Na rysunku 4-30 przedstawiono



Rys. 4-29. Eksperymentalne drewniane frezarki CNC (SUPER TECH 2008): a, b - konstrukcji Antonio Castry (2003), c - konstrukcji Richarda Koeniga (2004)



Rys. 4-30. Obrabiarki z drewnianymi podzespołami (PEARL 2008): a - tokarka firmy Delta, b - czopiarka firmy Rockwell

tokarkę oraz czopiarkę z elementami drewnianymi. Obydwie maszyny wyprodukowano w latach siedemdziesiątych XX wieku, a zmodernizowano w 2000 roku.

Współcześni producenci obrabiarek nie eksponują faktu stosowania drewna na ich elementy konstrukcyjne.

5.

ZAKOŃCZENIE

Maszyna od początku swojego istnienia jest związana z drewnem. Pierwsza w dziejach ludzkości bardziej złożona maszyna była drewniana (łuk opisany na s. 110). Źródłostów starohinduskiego określenia maszyny to „drewniany wałek” (s. 103). Najstarsza znana definicja maszyny opisuje ją jako obiekt wykonany z drewna (definicja Witruwiusza, przytoczona na s. 10). To wszystko uzasadnia myśl przewodnią książki: **drewno jest najważniejszym materiałem wszech czasów w budowie maszyn**. Ale to nie koniec przesłanek powyższej tezy...

Istnieje bardzo ciekawa, niepoparta jednak dowodami, hipoteza dotycząca pochodzenia nazwy rodu pierwszych polskich władców. Powszechnie wiadomo, że autorstwo imienia i przydomka pierwszego legendarnego władcy Polski, Piasta Kołodzieja, można przypisać kronikarzowi dziejów polskich Wincentemu Kadłubkowi (ok. 1160-1223), który, studiując w starych zapisach czeskich, natrafił na ślady rodu Kolovratów (Kołodziejów). Zarówno historyczne źródła czeskie, jak i polskie wywodzą pochodzenie określenia *kołodziej* bądź od piasty koła, bądź od kołowrotka. Mistrz Wincenty, pisząc *Kronikę polską*, uznał, że pierwsi Piastowie byli kołodziejami. Jednak w języku staroczeskim *kolovrat* oznacza również most zwodzony. Istnieją więc hipotetyczne przesłanki pozwalające uznać, że ród Kolovratów pierwotnie zajmował się budową mostów zwodzonych lub, co bardziej prawdopodobne, posiadał zamek wyposażony w tego typu zmechanizowany most. Kolejną przesłanką do sformułowania takiej hipotezy jest fakt, że ród czeskich, a właściwie morawskich Kolovratów ma taki sam herb jak nasi Piastowie (biały orzeł na czerwonym tle). Gdyby hipoteza była prawdziwa, oznaczałoby to, że nazwa rodowa pierwszej polskiej dynastii panującej pochodzi od nazwy drewnianej maszyny (!) – napędu mostu zwodzonego.

Najważniejszym jednak argumentem przemawiającym za twierdzeniem zawartym w tytule książki może być bardzo znany wynalazek mało znanego Chińczyka Cai Luna²⁷⁷ (ok. 50-121 rok n.e.) – człowieka, który wywarł bardzo duży wpływ na historię cywilizacji. Tym wynalazkiem był wytwarzany z drewna czerpany papier, który w dużym stopniu ułatwił wszystkim twórcom techniki zapis ich osiągnięć, a przez to wydatnie przyczynił się do kumulacji wiedzy i rozwoju techniki w takiej formie, jaką znamy dzisiaj.

²⁷⁷ Ts'ai-Lun według HARTA (1978), Cai Lun według DĄBROWSKIEGO i SINIARSKIEJ-CZAPLICKIEJ (1991).

TEKSTY ŹRÓDŁOWE

W tym miejscu zamieszczono w oryginalnym brzmieniu te teksty, których tłumaczenia zostały użyte w trakcie opisu drewnianych maszyn, a których długość nie pozwoliła na ich cytowanie w tekście książki.

WITRUWIUSZ (vel. Marcus Vitruvius Pollio) (27-13 p.n.e.) *De architectura*²⁷⁸. Fragment, którego tłumaczenie zamieszczono na s. 191-192:

1. *Fiunt etiam in fluminibus rotae eisdem rationibus, quibus supra scriptum est. Circa earum frontes adfiguntur pinnae, quae, cum percutiuntur ab impetu fluminis, cogunt progredientes versari rotam, et ita modiolis haurientes et in summum referentes sine operarum calcatura ipsius fluminis impulsu versatae praestant, quod opus est ad usum.*
2. *Eadem ratione etiam versantur hydraletae, in quibus eadem sunt omnia, praeterquam quod in uno capite axis tympanum dentatum est inclusum. Id autem ad perpendiculum conlocatum in cultrum versatur cum rota pariter. Secundum id tympanum maius item dentatum planum est conlocatum, quo continetur. [...] Ita dentes tympani eius, quod est in axe inclusum, inpellendo dentes tympani plani cogunt fieri molarum circinationem. In qua machina inpendens infundibulum subministrat molis frumentum et eadem versatione subigitur farina. [Liber X, Capitulum V].*

²⁷⁸ Dzieło dostępne online po łacinie: www.hs-augsburg.de.

Pseudo-Juanelo Turriano (1595 ±10) *Los veinte y un libros de los ingenios, y máquinas* [...] ²⁷⁹. Tekst pochodzi z FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO (2008). Fragment, którego tłumaczenie zamieszczono na s. 197-198:

La canal que trae la agua a la rueda es A. La rueda es B. Las palas es C. El arbol de la Rueda es D. y en ello va asentados dos levadores que es E.E. los quales levadores levantan los maços en la parte baxa q' es F.F. en los maços debaxo del mismo maço que es del mango del que sale fuera algun tanto que tengan lugar los levadores de topar con ellos y conviene tener advertencia que no vayan rastrando los maços por la pila ni al entrar ni al salir por causa que rompería el paño tocando en firme conviene no toquen abaxo en la mesa de la pila con quatro dedos, ni menos que en el herir en el paño no vayan a tocar en la olla con una mano de ancho que es G. la pila, y la olla H. y delante pila es I. que es donde entran los maços, sobre pila es donde cae la agua en el paño | K. el paño es L. Los iacos tienen la pila los telares es donde van armados en aquellos los maços campanales. Donde entran colgados los maços que es M.N. los asientos de las corneras es R. Los maços son O.P. conviene que ellos sean de largo ocho palmos de madera de enzina y todo lo demas de muy buena madera. [372f.] (za ARS MECHANICAE... 2009)

BIRINGUCCIO (1540) *De la pirotechnia libri X* ²⁸⁰. Fragment, którego tłumaczenie zamieszczono na s. 238-239:

Et da questo primamente pigliarete la misura del far vno stile di legname di quercia o d'altro legno chel sia seccho & sta gionato longo & grosso secondo el bisogno del opera che hauete da fare & sopra a due caualletti ben fermi in terra tal stile biligarete di tal sorte che giradolo con vna croce o altra linea messa da piei al piu grosso, & che giustamente camini, & sia tato piu longho oltre a quel che ne porta li bilighi quanto nel far dele forme, & da capo & da piei possiate far che la | stia comodamente al fuecho per asciugar le terre messe drieto alla forma senza bruscian li caualletti, & sopra a questo stile coporrete vn masso di terra alquato piu corto che no e la longhezza

²⁷⁹ Dwadzieścia jeden ksiąg o urządzeniach i maszynach – tłumaczenie M.S. Pelen tytuł i dedykacja w oryginalnej brzmii: *Los veinte y un libros de los ingenios, y máquinas de Juanelo, los quales le mandó escribir y demostrar el Católico Rey D. Felipe Segundo, Rey de las Españas y Nuevo Mundo: dedicadas al Serenísimo Señor Don Iuan de Austria, Hijo de el Católico Rey D. Felipe quarto, Rey de las Españas.*

²⁸⁰ Książka napisana po włosku, opublikowana w Wenecji, była pierwszym podręcznikiem metalurgii. Dzieło dostępne online: www.fermi.imss.fi.it.

che ha da esser la capana in forma pirramidale grosso da piei & s'uttill da capo fatto giusto con vno regolo o col cantone de vna tauala giustamente stilata, & questo e il piu de li maestri per farlo piu presto & piu leggiero alle campane gradi el fanno di legname, & l'aguagliano di terra, & questa prima parte la chiamano la roccha, & la fanno che per tutto responde tanto grossa quato el terzo di quel che ha da esser el maschio, & dipoi fatto questo vi danno sopra per tutto di cennare di bucato & la ingrossano di terra da forme comuna per fin appresso al termine di quato ha da venire la grossezza del maschio [fol. 94v-95r].

LITERATURA

- AFORYSTYKA dwudziestolecia: 1918-1939. 1984. Red. L.B. Grzeniewski. PIW, Warszawa.
- AGRICOLA G. (1555-1557): De re metallica. [Faksymile: www.dbc.wroc.pl oraz archimedes.mpiwg-berlin.mpg.de]. (10.11.2007).
- ALLELY S., BAKER T., COMSTOCK P., HAMM J., HARDCASTLE R., MASSEY J., STRUNK J. (1992): The traditional Bowyer's Bible. Vol. 1. Burford, New York.
- AMBROSIEWICZ M. (2002): Jak to z dziegiem było. Historia Tradycja Kultura. Kwartalnik Wigierskiego Parku Narodowego 3. [www.wigry.win.pl/kwartalnik].
- ARS MECHANICAE. Ingeniería medieval en España. (2008). Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones / Fundación Juanelo Turriano, Madrid.
- ARYSTOTELES (1996): Etyka nikomachejska. Etyka wielka. Etyka eudemejska. O cnotach i wadach. Wstępy i komentarze: D. Gromska, L. Regner, W. Wróblewski. PWN, Warszawa.
- ASHBY M.F. (1998): Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim. Dodatek do wyd. pol.: A. Ciszewski, T. Radomski. WN-T, Warszawa.
- ASHBY M.F., JONES D.R.H. (1996): Materiały inżynierskie. T. 2. Kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów. WN-T, Warszawa.
- BARANOWICZ K. (2008): Wiatraki starego typu. [darmowa-energia.eko.org.pl]. (12.01.2008).
- BARANOWSKI A. (1986): Poradnik inżyniera – odlewnictwo. T. 1. Materiały odlewnicze i formierskie, technologia formy, automatyzacja procesów odlewniczych. PWN, Warszawa.
- BASIŃSKI S. (1948): Materiałoznawstwo działu drzewnego. Instytut Rzemieślniczo-Przemysłowy. Poznań.
- BATTISTI E., BATTISTI G.S. (1984): Le macchine cificate di Giovanni Fontana. Arcadia, Milano.
- BBC NEWS (2007). Kanał informacyjny British Broadcasting Corporation. [news.bbc.co.uk]. (17.12.2007).

- BECHMANN R. (1993): Villard de Honnecourt: la pensée technique au XIII. siècle et sa communication. Picard, Paris.
- BEHEM B. (1505): Codex picturatus Balthazaris Behem. [Reprint 1988. KAW, Warszawa].
- BESSON J. (1578): Theatrum instrumentorum et machinarum Iacobi Bessoni. [Reprint. 1999. The Dibner Library of the History of Science and Technology; Smithsonian Institution Libraries; faksymile: www.sil.si.edu].
- BIBLIA MACIEJOWSKIEGO. (1250). (vel Morgan Bible of Louis IX). Rękopis. [Faksymile: www.medievaltimes.com].
- BIEŃ J. (2008): Cechy techniczne fortepianu. [janek.skawina.com.pl]. (18.02.2008).
- BIRINGUCCIO V. (1540): De la pirotechnia libri X. [Faksymile: fermi.ims.fi.it].
- BLEIJH B.V. (2007): Materiały informacyjne producenta drewnianych rowerów, Holandia. [www.sandwichbikes.com oraz www.bleijh.com]. (21.11.2007).
- BOREJSZA P., JAŚKIEWICZ P., ŚWIEŁICKI K., STRASZEWICZ J., RODZIEWICZ A. (1930): Technologia materiałów lotniczych. Wyd. Ministerstwa Spraw Wojskowych, Departament Aeronautyki, Warszawa.
- BRANOWSKI B. (2007): Maszyny i ich układy napędowe. W: Podstawy konstrukcji napędów maszyn. Red. B. Branowski. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań: 24-42.
- BRZEZIŃSKI J. i IN. (1990): Chemia. Ilustrowana encyklopedia dla wszystkich. WN-T, Warszawa.
- BUCHER B. (1889): Die Alten Zunft und Verkehrs-Ordnungen der Stadt Krakau. [Faksymile Kodeksu Baltazara Behema z 1505 roku ze wstępem oraz komentarzami edytora. Gerold, Wien. www.adw.uni-heidelberg.de]. (10.01.2008).
- BURDECKI F. (1938): Technika i przemysł w dawnej Polsce. Państwowe Wydawnictwo Książek Szkolnych we Lwowie, Lwów.
- BURGS DORF F.A.L. VON (1809-1810): Umiejętność lasowa czyli Rękopis dla właścicieli lasów i ich lesniczych: pod tytułem Powszechna teoretyczno-praktyczna wszystkich lasowych umiejętności nauka. T. 1-2. Przez F.A.L. Burgsdorf a przez Filipa Jakoba Nałecz Kobierzyckiego na oyczysty język przełożona. Przemysł. [Reprint. 2005. Ruthenus, Krosno].
- CAMELOT. (2008). Materiały informacyjne producenta tradycyjnych łuków. Camelot, Polska. [www.camelot-luki.pl]. (11.02.2008).
- CAUS S. DE (1615): Les Raisons des forces mouvantes avec diverses machines. [Faksymile: cnum.cnam.fr/ILL/FDA1.html]. (07.09.2007).
- CENNIK DETALICZNY drewna Nadleśnictwa Płock. (2007). [www.lasy.com.pl/a/artykul/ida/12/]. (11.12.2007).
- CHMIEŁOWSKI B. (1745-1746): Nowe Ateny. [Faksymile: www.pbi.edu.pl, (10.01.2007); wersja tekstowa: monika.univ.gda.pl/~literat/ateny/index.htm]. (2.02.2008).
- CLARKE A.C. (1962): Profiles of the future: an inquiry into the limits of the possible. Harper & Row, New York.

- COCKCROFT D.W., COTTON D.J., MINK J.T. (1979): Nonspecific bronchial hyperreactivity after exposure to Western Red Cedar. *American Review of Respiratory Disease* 119: 505-510.
- COLLINS P. (2002): The floating island. *Cabinet Magazine* 7. [www.cabinetmagazine.org]. (2.04.2008).
- DĄBROWSKI H. (2002): Wytrzymałość polimerowych kompozytów włóknistych. Ofic. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- DĄBROWSKI J., SINIARSKA-CZAPLIKA J. (1991): Rękodzieło papiernicze. Sigma NOT, Warszawa.
- DARMOWA ENERGIA. (2008). [darmowa-energia.eko.org.pl]. (12.01.2008).
- DAUMAS M. (1980): History of technology and invention. Crown Publishers, New York.
- DESIGN AMSTERDAM. (2007). Design Amsterdam Pieter Janssen, product & graphic design. Holandia. [www.designamsterdam.nl]. (21.11.2007).
- DIDEROT D. (1740): Diderot pictorial encyclopedia of trades and industry. [Reprint. 1993. Dover Publications, New York].
- DEŁUGOŁECKI W., KUCZYŃSKI J., POŚPIESZNA B. (2004): Młyny w Malborku i okolicy od XIII do XIX wieku. Wyd. Muzeum Zamkowego w Malborku, Malbork.
- DOMESDAY BOOK. (1086). Kataster gruntowy sporządzony dla Wilhelma Zdobywcy. [Faksymile: www.nationalarchives.gov.uk/domesday]. (30.01.2008).
- DYLEWSKI A. (2004): Świątynie Polski. Świat Książki, Warszawa.
- ELEKTROWNIE WIATROWE. (2007). Serwis internetowy Polskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej. [www.elektrownie-wiatrowe.org.pl/t_hist_rozw.htm]. (12.11.2007).
- ENCYKLOPEDIA TECHNIKI. (1994). WN-T, Warszawa.
- ERRARD J. (vel Bar-le-Duc) (1584): Premier livre des instruments mathématiques. Nancy. [Faksymile: gallica.bnf.fr]. (27.11.2007).
- EVOLUTION of sawing tools. (2008). MÜNZ Ingenieur-Dienstleistungen. [www.umuenz.de]. (10.01.2008).
- FABISIAK E. (2005): Zmienność podstawowych elementów anatomicznych i gęstości drewna wybranych gatunków drzew. Wyd. Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań.
- FADIEJEW I., AŁON S. (1990): Naprawa i strojenie fortepianów i pianin. Pomorze, Bydgoszcz.
- FAST BOY CYCLES. (2008). [www.fastboycycles.com]. (12.02.2008).
- FELDHAUS F.M. (1910): Ruhmesblätter der Technik von den Urfindungen bis zur Gegenwart. Brandstetter, Leipzig.
- FELDHAUS F.M. (1958): Maszyny w dziejach ludzkości. Od czasów najdawniejszych do odrodzenia. PWT, Warszawa.
- FINSTERBUSCH E., THIELE W. (1987): Vom Steinbeil zum Sägegatter: ein Streifzug durch die Geschichte der Holzarbeitung. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.

- FIRST FLIGHTS. (1964). Saudi Aramco World, January-February: 8-9.
- FLORA EUROPAEA. (2008). Pięciotomowa encyklopedia europejskich roślin naczyniowych opublikowana w latach 1964-1993 przez Cambridge University Press. Udostępniona w Internecie przez Royal Botanic Garden Edinburgh (Królewski Ogród Botaniczny w Edynburgu). [rbg-web2.rbge.org.uk/FE/fe.html oraz 193.62.154.38/FE/fe.html], (9.12.2007-30.01.2008).
- FUJIWARA T., FUJII T., SHIBAYASHI T., SUZUKI T., HAYASHI Y. (1998): Database of properties of south-east Asian timbers. Forestry and Forest Products Research Institute. [www2.ffpri.affrc.go.jp/fdb/esawoodq/wood.html]. (9.12.2007).
- FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO. (2008). [www: juaneloturriano.com]. (20.02.2008).
- GANOWICZ R., GUZENDA R. (1996): Destrukcyjny wpływ zmian wilgotności otoczenia na drewniane warstwowo klejone konstrukcje. W: Sympozjum naukowe. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 5-6 września 1996. 73-80.
- GEISLER T., SKALMIERSKI B., SOCHACKI W. (1998): Badania wpływu obciążenia zewnętrznego na drgania płyty rezonansowej fortepianu. Zeszyty naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej Politechniki Śląskiej 6: 101-105.
- GENERAL TECHNICAL REPORT FPL-GTR-113. Wood handbook. Wood as an engineering material. (1999). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison.
- GERMPLASM RESOURCES Information Network. (2008). United States Department of Agriculture. [http://www.ars-grin.gov]. (1.10.2007-30.01.2008).
- GIORGIO MARTINI F. DI (1484 ±2): Trattati di architettura ingegneria e arte militare. [Faksymile: bncf.firenze.sbn.it/Bib_digitale/Manoscritti]. (08.12.2007).
- GIZMO. (2008). The gadget blog. [gizmodo.com]. (12.01.2008).
- GLASS A. (1977): Polskie konstrukcje lotnicze 1893-1939. WKiŁ, Warszawa.
- GLASS A. (1984): Polskie skrzydła. Interpress, Warszawa.
- GLASS A. (2004): Polskie konstrukcje lotnicze. T. 1. Stratus, Warszawa.
- GLOGER Z. (1900-1903): Encyklopedia staropolska ilustrowana. T. 1-4. [Reprint 1989, WP, Warszawa].
- GNOIŃSKI T. (1952): Warsztat stolarsko-kołodziejski. PWRiL, Warszawa.
- GOMEX. (2007). Cennik obowiązujący od 11.12.2007. Hurtownia drewna gatunków zagranicznych. [www.gomex.pl]. (11.12.2007).
- GOOD E.M. (2005): What did Cristofori call his invention? Early Music 33, 1: 95-97. [muse.jhu.edu].
- GOSZCZYŃSKI S. (1822): Dziennik podróży do Tatrów. [Reprint 2005. Ossolineum, Warszawa].
- GOTA. (2007). [www.planenco.com.br/Gota]. (15.12.2007).
- GP DESIGNPARTNER. (2007). [gp.co.at]. (21.11.2007).
- GRAY C. (2008): William Samuel Henson. The Pioneer Aviation Group. [www.flyingmachines.org]. (09.01.2008).

- GRINDA. (2007). [www.grinda.navy.ru]. (16.11.2007).
- HAMILTON T.M. (1982): Native American bows. Archaeological Society, Columbia, Missouri, Special Publications 5.
- HAMM J. (1991): Bows & arrows of the native Americans. Lyons and Burford, York.
- HARDY R. (1992): Longbow: a social and military history. Lyons and Burford, York.
- HARRISON J. (1939): *Serca maszyn*. Wyd. Trzaski, Everta i Michalskiego, Warszawa.
- HART M. (1978): Ts'ai Lun. In 100 A ranking of the most influential persons in history. Hart Publishing, New York.
- HERTZ H.R. (1881): Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die eine und angewandte Mathematik* 92: 156-171. [Faksymile: www.uni-leipzig.de]. (9.02.2008).
- HIGGINS N.C. (1957): The equilibrium moisture content-relative humidity of selected native and foreign woods. *Forest Production Journal* 7, 10: 371-377.
- HISTORIA POMORZA. (1969). Red. G. Labuda. T. 1, Do roku 1466, Cz. 1-2, Wyd. Poznańskie, Poznań.
- HOAD T.F. (1986): *The concise Oxford dictionary of English etymology*. Oxford University Press, Oxford.
- HODGE T.A. (1990): A Roman factory. *Scientific American*. 263, 5: 106-111. [www.math.utah.edu/ftp/pub/tex/oraz_bib/toc/sciam1990.html]. (08.07.2007).
- HOFFMAN'S FLYING MACHINES. (1901). *SCI AM*. 84: 281.
- HOLMES CLOCKWORKS. (2007). [www.binarwork.com]. (04.12.2007).
- HOLZ. (2008). Branżowy serwis drzewny. [www.holz.de]. (30.01.2008).
- HOLZTECHNIKUM. (2008). Branżowy serwis drzewny [www.holztechnikum.at]. (30.01.2008).
- HOMEPORTFOLIO. (2007). [www.homeportfolio.com]. (30.11.2007).
- HONNECOURT V. DE (1235-1245): *Carnet de dessins*. [Faksymile: Bibliothèque nationale de France, Département des Manuscrits (division occidentale) Français 19093, www.gallica.bnf.fr]. (12.12.2007).
- HTL. (2008). [www.htl-vil.ac.at]. (30.01.2008).
- IAMECO. (2007). Strona internetowa producenta komputerów z elementami drewnianymi. Irlandia. [www.iameco.com]. (30.11.2007).
- INSTRUMENTENBUCH des Herzog Julius von Braunschweig-Wolfenbüttel. (1573 ±3): Teil I. [Faksymile: www.sachsen-anhalt.de]. (20.01.2008).
- INSTYTUT ARCHEOLOGII i Etnologii PAN. (2007). [www.iaepan.edu.pl]. (12.12.2007).
- ITAR-TASS (2007). Agencja informacyjna. [www.itar-tass.com]. (4.12.2007).
- ITD. (2008). Instytut Technologii Drewna. [www.itd.poznan.pl]. (23.11.2007).
- JACKMAN W.J., RUSSELL T.H., CHANUTE O. (1912): *Flying machines: construction and operation*. Thompson, Chicago. [Faksymile: etext.lib.virginia.edu/toc/modeng/public/JacFlym.html]. (6.12.2007).

- JAGODZIŃSKI W. (1959): Silniki wiatrowe. PWT, Warszawa.
- JANKA G. (1906): Die Härte des Holzes. Centralblatt für das gesamte Forstwesen, Wien.
- JANKOWSKI J. (2005): Drewniany łuk średniowieczny: wybór tradycyjnych łuków i strzał oraz techniki strzeleckie. Replika, Poznań.
- JANUSZEWSKI S. (1998): Tajne wynalazki lotnicze Polaków. Rosja 1870-1917. Ofic. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- JASIUK J. (2002): O starym druku – o kowalstwie. Przegląd Techniczny 6-7. [www.stpuk.org]. (23.01.2008).
- JEET & JEET GLASS AND CHEM. P. LTD. (2007): Materiały informacyjne producenta materiałów kuloodpornych. Indie. [www.jeetglassindia.com]. (16.12.2007).
- JOHANN K., JACOBSSON G. (1781-1784): Technologisches Wörterbuch. Berlin. Bibliothek des Zentralinstituts für Kunstgeschichte, München.
- KARPOWICZ A. (2000): Budowa azjatyckiego łuku złożonego (kompozytowego). [www.bowtime.waw.pl]. (11.02.2008).
- KAUFMANN R. (2006): Fahrrad und Holz. Maszynopis. FH Joanneum University of Applied Sciences, Austria.
- KAY E.R., LEIGH D.A., ZERBETTO F. (2007): Synthetic molecular motors and mechanical machines. *Angewandte Chemie International Edition in English* 46: 72-191. [www.esm.psu.edu]. (29.01.2008).
- KENNETH MAJOR J. (1985): Animal-powered machines. Shire Album 128. Shire Publications, Shire.
- KITOWICZ J. (1840): Opis obyczajów za panowania Augusta III. [Reprint 1985. Wstęp: M. Dernałowicz. PIW, Warszawa].
- KOCENT-ZIELIŃSKI E. (2008): Lotnicze silniki parowe. Zarys historii i rozwoju. [www.samoloty.ow.pl]. (9.01.2008).
- KOCHANOWSKI M. (2005): Dawne młynarstwo. Ser. Ginące zawody i dawne rzemiosła. Red. H. Paner. Wyd. Muzeum Archeologicznego w Gdańsku, Gdańsk.
- KOKOCIŃSKI W. (2004): Drewno: pomiary właściwości fizycznych i mechanicznych. Nakładem autora, Poznań.
- KOKOCIŃSKI W. (2005): Anatomia drewna. Nakładem autora, Poznań.
- KOLBERG O. (1885): Obrazy etnograficzne. [Reprint 1974. W: O. Kolberg: Dzieła wszystkie. Red. J. Burszta, M. Tarko. Polskie Towarzystwo Ludoznawcze oraz Polskie Towarzystwo Muzyczne, Kraków – Wrocław].
- KOLLMANN F.F.P. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Vol. 1. Springer, Berlin.
- KOMUNIKAT PREZESA GŁÓWNEGO URZĘDU STATYSTYCZNEGO z 22 października 2007 r. w sprawie średniej ceny sprzedaży drewna, obliczonej według średniej ceny drewna uzyskanej przez nadleśnictwa za pierwsze trzy kwartały 2007 r. *Monitor Polski* 79, poz. 846.

- KONIECZNY J.R. (1984): Kronika lotnictwa polskiego 1241-1945. WKiŁ, Warszawa.
- KOPKE P. (1956): Maschinen für die Holzbearbeitung. Fachbuchverlag, Leipzig.
- KORTYLEWSKI B., PAPRZYCKI O., STANISZEWSKI J. (1978): Nowy aparat fotoelektryczny do pomiaru połysku powłok lakierowych w drewnie. *Przemysł Drzewny* 9: 3-4.
- KOTARBIŃSKI T. (1991): Myśli i słowa. Wyd. WSP im. Tadeusza Kotarbińskiego, Zielona Góra.
- KOZAKIEWICZ P. (2007): Trochę historii. Zabytki techniki ludowej. Wietrzny weteran. *Gazeta Przemysłu Drzewnego*, listopad.
- KOZAKIEWICZ P., MATEJAK M. (2005 a): Łożyska drewniane. *Gazeta Przemysłu Drzewnego*, maj.
- KOZAKIEWICZ P., MATEJAK M. (2005 b): Trochę historii. Odlot „świerkowej gęsi”. *Gazeta Przemysłu Drzewnego*, kwiecień.
- KOZAKIEWICZ P., MATEJAK M. (2006 a): Klimat a drewno zabytkowe. Wyd. SGGW, Warszawa.
- KOZAKIEWICZ P., MATEJAK M. (2006 b): Trochę historii. Pilarka taśmowa do kłód. Serwis Branży Drzewnej „Drewno” redagowany przez Wydawnictwo Inwestor. [www.drewno.net]. (14.01.2008).
- KOZAKIEWICZ P., MATEJAK M. (2006 c): Trochę historii. Trak według Villarda de Honnecourta. *Gazeta Przemysłu Drzewnego*, kwiecień.
- KOZAKIEWICZ P., MATEJAK M. (2007 a): Trochę historii. Drewniane sznury. Serwis Branży Drzewnej „Drewno” redagowany przez Wydawnictwo Inwestor. [www.drewno.net]. (29.12.2007).
- KOZAKIEWICZ P., MATEJAK M. (2007 b): Trochę historii. Drewniany Breliot XI. Pierwszy przelot nad kanałem La Manche. *Gazeta Przemysłu Drzewnego*, wrzesień.
- KOZAKIEWICZ P., MATEJAK M. (2007 c): Trochę historii. Trak wodny według polskiego podręcznika z 1690 roku. *Gazeta Przemysłu Drzewnego*, marzec.
- KRÜGER F., ROHLOFF E. (1938): Über die innere Reibung von Holz. *Zeitschrift für Physik* 110, 1-2: 58-68.
- KRUK J., MILISAUSKAS S. (1985): Bronocice, osiedle obronne ludności kultury lubelsko-wołyńskiej (2800-2700 lat p.n.e.). Ossolineum, Wrocław.
- KRUK J., MILISAUSKAS S. (1991): Utilization of cattle for traction during the later Neolithic in southeastern Poland. *Antiquity* 65, 248.
- KRUK J., MILISAUSKAS S. (1999): Rozkwit i upadek społeczeństw rolniczych neolitu. Wyd. Instytutu Archeologii i Etnologii PAN, Kraków.
- KRÜNITZ J.G. (1773-1795): *Oekonomische Encyclopädie*. Vol. 1-75. [www.krunitz1.uni-trier.de]. (01.04.2007).
- KRZYSIK F. (1975): Nauka o drewnie. PWN, Warszawa.
- KSIĄŻKIEWICZ S. (1954): Drewno jako materiał do budowy aparatury chemicznej. PWT, Warszawa.

- KUBRYK. (2008). Internetowy Klub Miłośników Żaglowców Kubryk. [www.za-glowce.ow.pl]. (22.06.2007).
- KUCHARZEWSKI F. (1913): Kiedy pojawili się technicy w Polsce i którym z naszych poprzedników pochłubić się możemy? *Przegląd Techniczny* 43: 1-3. [bcpw.bg.pw.edu.pl]. (20.08.2008).
- KURZ A., GRUNDLER E. (1998): Baum... Holz... Maschine. Kugelumlaufführungen in einer ungewöhnlichen Anwendung. *Der Konstrukteur* 11. [www.hs-ulm.de].
- KUŚMIERSKI F. (1925): Drewna wyrobowe i wpływ ich własności na konstrukcje. *Biblioteczka rzemieślnika drzewnego*. T. 1. Nakładem autora z zapomogą Ministerstwa Wyznań Religijnych i Oświecenia Publicznego, Warszawa.
- LANDOR A.H.S. (1902): *Across coveted lands*. Vol. II. Macmillan, London. [Faksymile: gutenberg.org]. (13.12.2007).
- LASY PAŃSTWOWE. (2008). [www.lasypanstwowe.gov.pl]. (12.01.2008).
- LEKSYKON NAUKOWO-TECHNICZNY z Suplementem. (1989). WN-T, Warszawa.
- LEKSYKON PWN. (2004). Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- LEONARDO DA VINCI (1483-1499): *Codex Atlanticus*. [Faksymile: www.leonardo3.net/Atlantico/index_eng.htm]. (3.01.2008).
- LEONARDO DA VINCI (ok. 1487-1490): *Codex Trivulzianus*. [Faksymile: www.universalleonardo.org]. (10.12.2007).
- LEONARDO DA VINCI (1493): *Codex Madrid I*. [Faksymile: Mc Graf Hill Book Company 1974, www.library.cornell.edu]. (03.02.2008).
- LIEBFELD A. (1964): *Polacy na szlakach techniki*. WKiŁ, Warszawa.
- LINDE S.B. (1087-1814): *Słownik języka polskiego*. T. 1-6. Warszawa. [Faksymile: www.kpbc.umk.pl]. (1.11.2007).
- LONDON GUILDHALL LIBRARY. (2008). Corporation of London, City of London. [collage.cityoflondon.gov.uk]. (18.08.2008).
- LOWET T. (2004): *Animal power*. Draft Animal Power (DAP). [www.worldwide-flood.com]. (21.01.2008).
- LT LEWIS Co. (2007). [www.ltlewis.co.uk]. (16.12.2007).
- MAGIERA W. (1974): Urządzenie do pomiaru połysku. *Mechanik* 5: 265-267.
- MAŁY PORADNIK MECHANIKA. T. 1. Nauki matematyczno-fizyczne. *Materiałoznawstwo*. (1994). Red. B. Reymer. WN-T, Warszawa.
- MAŁY ROCZNIK STATYSTYCZNY Polski. (2007). Zakład Wydawnictw Statystycznych GUS, Warszawa.
- MARKS K. (1951): *Kapitał*. Krytyka ekonomii politycznej. T. 1. KiW, Warszawa.
- MATERIAŁOZNAWSTWO dla stolarzy, cieśli, bednarzy i pokrewnych zawodów oraz dla malarzy, lakierników i pokrewnych zawodów. (1945). Red. J. Rogawski, W. Faryna, J. Kryza, M. Majcherczyk, M. Orski. Dąbrowa Górnicza.
- MATERIAŁY SZKOLENIOWE PZŁ. (2002). *Łucznictwo*. Teoria i praktyka szkolenia. *Polski Związek Łuczniczy*, Warszawa. [www.archery.pl]. (11.02.2008).

- MATH WORDS. (2008). Serwis matematyczny. [www.pballew.net]. (7.01.2008).
- MATUSZEWSKI D. (2004): Kogeneracja odnawialnych źródeł energii w warunkach wiejskich. Maszynopis. Politechnika Poznańska, Poznań.
- MERES. (2007). [www.bmeres.com]. (21.11.2007).
- MERTL. (2007). [www.mertl-kunststoff.at]. (21.12.2007).
- MILEWSKI A. (1970): Materiały i wyroby z drewna. Poradnik zaopatrzeniowca branżysty. PWE, Warszawa.
- MOCKO W., ŻAGAN W. (2007): Kolorymetria. W: Technika świetlna – poradnik. Maszynopis.
- MONTAIGNE M. (1996): Próby. Przeł. z francuskiego T. Żeleński Boy. Wyd. Literackie, Kraków.
- MONUMENTA POLONIAE HISTORICA. (1960). T. 1. PWN, Warszawa.
- MORBECK G.C. (1936): The use of wood in American machinery. U.S. Department of Agriculture, Forest Product Laboratory, Madison.
- MORGAŁA A. (2003): Samoloty wojskowe w Polsce 1924-1939. Bellona, Warszawa.
- MORGAN M.H. (1914): The ten books on architecture. London. [Faksymile: www.gutenberg.org]. (2.09.2007).
- MORGAN MOTOR COMPANY. (2008). [www.morgan-motor.co.uk]. (4.08.2008).
- MOSZYŃSKI K. (1967): Kultura ludowa Słowian. T. 1. Kultura materialna. KiW, Warszawa.
- MUZEUM HISTORII PRZEMYSŁU W OPATÓWKU. (2008). [www.muzeum.opatowek.pl]. (5.02.2008).
- NAGYVARY J. (1996): Modern science and the classical violin. A view from academia. *The Chemical Intelligencer* 2, 1: 24-31.
- NAJDAWNIEJSZE SZKICE PIŁ TARTACZNYCH. (2006): *Gazeta Przemysłu Drzewnego* 4, 90.
- NEEDHAM J. (1986): *Civilisation in China*. Vol. 4. Physics and physical technology. P. 2. Mechanical engineering. Caves Books, Taipei.
- NEUE FORSCHUNGEN zu Heinrich Schickhardt. (2002). Kohlhammer, Stuttgart.
- NEUHAUS H. (2004): Budownictwo drewniane. PWT, Rzeszów.
- NEVER SUMMER INDUSTRIES. (2007). [www.neversummer.com]. (22.11.2007).
- NEW AGE FOR MUNGO MAN, new human history. (2003). University of Melbourne, Australia, *ScienceDaily* (Feb. 20, 2003). [www.sciencedaily.com oraz uni-news.unimelb.edu.au]. (10.01.2008).
- NICHOLSON P.T., SHAW I. (2000): *Ancient Egyptian materials and techniques*. Cambridge University Press, New York.
- NORDON M. (1986): *Introduction and analysis of the 21 books of devices and of machines by Pseudo Juanelo Turriano*. Hardwood Academic Publisher, London.
- NORWICH CASTLE MUSEUM. (2007). [www.museums.norfolk.gov.uk]. (5.10.2007).
- NOWACZYK M., KRZOSKA-ADAMCZAK Z. (2001): Pomiar zmian barwy drewna pod wpływem światła. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 340, *Technologia Drewna* 35: 79-86.

- NOWAK T. (1961): Cztery wieki polskiej książki technicznej: 1450-1850. PWT, Warszawa.
- NOWE NAJWYŻSZE DRZEWA na świecie. (2006). Rzeczpospolita, dział „Nauka” 7.09.2006. [www.rzeczpospolita.pl]. (30.01.2008).
- NOWY LEKSYKON PWN. (1998). PWN, Warszawa.
- ONDA. (2003). Acoustic properties of solids. [www.ondacorp.com]. (24.01.2008).
- ORACKI T. (1988): Słownik biograficzny Warmii, Prus Książęcych i Ziemi Malborskiej od połowy XV do końca XVIII wieku. T. 2, L-Ż. Ośrodek Badań Naukowych im. Wojciecha Kętrzyńskiego, Olsztyn.
- ORŁOWSKI B. (1963): Tysiąc lat polskiej techniki. Nasza Księgarnia, Warszawa.
- ORŁOWSKI B. (1985): Nie tylko szablą i piórem... WKiŁ, Warszawa.
- ORŁOWSKI B. (1989): Zwyczaj i niezwykle losy wynalazków. LSW, Warszawa.
- OSTATNI WYKŁAD Leonarda da Vinci w jego Akademii Medyolańskiej (1499): z myśli i twierdzeń rozproszonych w jego rękopisach. (1907). Przeł. Z. Przesmycki (Miriam). Red. J. Peladan. Chimery, Warszawa.
- OSTRORÓG J. (1859): Myślistwo z ogary Jana hrabie Ostroroga, wojewody poznańskiego. Ser. 4 na r. 1859, 51. Wydawnictwo Biblioteki Polskiej, Kraków.
- OTTAVIA'S SUITCASE. (2007). [www.ottavia.com]. (21.11.2007).
- PADECHOWICZ M. (1929): Drewno. W przemyśle, rękodziele i gospodarstwie domowym. Cz. 1 Materiał (opis). Nakładem Miejskiego Muzeum Przemysłowego Im. dra Adryana Baranieckiego w Krakowie, Kraków.
- PARCZEWSKI A., SADOWSKI M., WIERZBICKI A. (1969): Technologia produkcji sklejek. PWRiL, Warszawa.
- PASCAL B. (2000): Myśli. Pax, Warszawa.
- PEARL. (2008). Perkins Electro-Acoustic Research Laboratory. [www.pearl-hifi.com]. (5.02.2008).
- PERMALI WALLACE PRIVATE LTD. (2007). [www.permaliwallace.com]. (12.12.2007).
- PKN. (2007). Polski Komitet Normalizacyjny. [www.pkn.pl]. (27.12.2007).
- PLANS 3-VUES. (2007). [membres.lycos.fr/wings2/3vues/3vues.html]. (29.12.2007).
- POBCO. (2007). [www.pobcoplastics.com]. (21.11.2007).
- POLLENS S. (1995): The early pianoforte. Cambridge University Press, Cambridge.
- POLSKA CZERWONA KSIĘGA ROŚLIN. (2001). Red. R. Kaźmierczakowa, K. Zarzycki. Wyd. Instytutu Botaniki im. Włodzimierza Szafera, Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków.
- POORTVLIET R. (2004): Noah's ark. Abrams, New York.
- PORTAL BUDOWNICTWA. (2007). [www.budnet.pl]. (12.11.2007).
- PROHOLZ. (2008). Serwis drzewny. [www.proholz.at]. (30.01.2008).
- PUDLIS E. (2005): Drewno – surowiec wszech czasów. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- RAMELLI A. (1588): Le diverse et artificiose machine. [Faksymile: cnum.cnam.fr/SYN/fDY3.html]. (11.11.2007).

- RAPORT O STANIE LASÓW W Polsce 2002. (2003). Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa. [www.lp.gov.pl]. (23.01.2008).
- RAPORT O STANIE LASÓW W Polsce 2006. (2007). Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa. [www.lp.gov.pl]. (23.01.2008).
- READ H.E. (1976): Wychowanie przez sztukę. Ossolineum, Wrocław.
- REALE G. (1996): Platon i Arystoteles. Wyd. KUL, Lublin.
- REINFORCING CONCRETE STRUCTURES with fiber reinforced polymers. Manual 3. (2001). ISIS Canada Corporation, Winnipeg.
- RESEARCH INSTITUTE FOR SUSTAINABLE ENERGY. (2007). [www.rise.org.au]. (12.11.2007).
- REULEAUX F. (1875): Lehrbuch der Kinematik. V. 1 – Theoretische Kinematik. V. 2 – Die praktischen Beziehungen. Braunschweig. [Faksymile: www.library.cornell.edu]. (06.07.2007).
- RICHTER H.G., DALLWITZ M.J. (2006): Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. [delta-intkey.com/wood]. (9.12.2007-30.01.2008).
- RIVER CITY BICYCLES. (2007). [www.rivercitybicycles.com]. (21.11.2007).
- ROHLOFF E., LAWRYNOWICZ W. (1941): Zeitschrift für technische Physik 22: 110.
- ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 10 kwietnia 2003 roku w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn i elementów bezpieczeństwa. 2003. Dziennik Ustaw z dnia 23 maja 2003 r.
- ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ŚRODOWISKA z dnia 20 grudnia 2005 roku w sprawie szczegółowych warunków i trybu sporządzania planu urządzenia lasu, uproszczonego planu urządzenia lasu oraz inwentaryzacji stanu lasu. 2005. Dziennik Ustaw z 27 grudnia 2005 r.
- RYŻYŃSKI A. (2002): 750 lat poznańskich mostów. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- SADA KENBI CO LTD. (2007). Materiały informacyjne producenta drewnianego prototypowego samochodu, Japonia. [www.koln32.jp]. (4.12.2007).
- SAECHTLING H. (1999): Tworzywa sztuczne. Poradnik. WN-T, Warszawa.
- SCHABOWSKA K. (2004): Koncepcja dwuwymiarowej wizualizacji konstrukcji mechanicznych oraz elementów maszyn według Stanisława Solskiego (1622-1701). Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 49, 3-4: 209-226.
- SCHRÖDER J. (1899): Catalog of Reuleaux Models Polytechnisches Arbeits-Institut. Illustrationen von Unterrichts-Modellen und Apparaten. Polytechnisches Arbeits-Institut, Darmstadt. [Faksymile: www.library.cornell.edu]. (2.02.2007).
- SCPEs. (2007). The School of Chemistry, Physics and Earth Sciences. Australia. [www.scieng.flinders.edu.au/cpes]. (12.11.2007).
- SEWERYN T. (1961): Technicy i wynalazcy ludowi. LSW, Warszawa.
- SHELTON KIRBY R. (1990): Engineering in history. Dover, New York.
- SIKORSKI K. (1932): Instrumentoznawstwo. Towarzystwo Wydawnicze Muzyki Polskiej, Warszawa.

- SIMPSON W.T. (1998): Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the United States and worldwide. U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, Research Note FPL-RN-0268. [www.fpl.fs.fed.us]. (23.01.2008).
- SIMS B.G., INNS F., DAVID O'NEILL D. (2003): Equipment for working animals, with emphasis on equids in developing countries. TAWS Workshop 24 April 2003, Silsoe Research Institute, England. [www.taws.org]. (23.01.2008).
- SKLEJKI. (2008). Hurtownia sklejki. [www.sklejki.pl]. (10.12.2007).
- SKWARCZYŃSKI W. (1925): Podręcznik budowlany wraz z analizą cen. T. 1. Księgarnia Polska B. Połonieckiego, Lwów.
- SŁOWNIK JĘZYKA POLSKIEGO. (1995). PWN, Warszawa.
- SŁOWNIK JĘZYKA POLSKIEGO. T. 2. H-M. (1902). Red. J. Karłowicz, A. Kryński, W. Niedźwiedzki. Nakł. prenumeratów i kasy im. Mianowskiego, Warszawa.
- SOBCZAK J. (1948): Od żaglowca do transatlantyku. Czytelnik, Wrocław.
- SOLSKI S. (1683): Geometra polski. Wydany w Krakowie Roku MDCLXXXIII (1683), w Drukarni Gerzego y Mikołaja Schedlow, J. K. M. Ordynarynych. [Faksymile: Biblioteka Politechniki Gdańskiej, www.wbss.pg.gda.pl oraz Dolnośląska Biblioteka Cyfrowa, www.dbc.wroc.pl]. (25.11.2007).
- SOLSKI S. (1690): Architekt polski. Wydany w Krakowie Roku MDCLXXX (1690), w Drukarni Mikołaja Alexandra Schedla J. K. M. [Reprint. 1950. Wstęp: J. Burszta, C. Łuczak. Ossolineum, Wyd. PAN, Wrocław]. [Faksymile: Biblioteka Politechniki Gdańskiej, www.wbss.pg.gda.pl oraz Dolnośląska Biblioteka Cyfrowa, www.dbc.wroc.pl]. (25.11.2007).
- SPRAGUE DE CAMP L. (1968): Wielcy i mali twórcy cywilizacji. WP, Warszawa.
- STAMM A.J. (1959): Verfahren zur Abschätzung der Wasserdampfsorption am Fasersättigungspunkt von Holz und Papier. Holz als Roh- und Werkstoff 17, 5: 202-205.
- STASZKIEWICZ J. (1993): *Pinus ×rhaetica* Bürgger – sosna drzewokosa. W: Polska czerwona księga roślin. Red. K. Zarzycki, R. Kaźmierczakowa. Instytut Botaniki im. Włodzimierza Szafera, Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków: 38-39.
- STATUTY Kazimierza Wielkiego. Cz. 1. 1947. Red. O. Balzer. PTPN, z zasiłkiem Prezydium Rady Ministrów i Centralnego Urzędu Planowania, Poznań.
- STIEBER K.L. (1922): Technologia drewna z uwzględnieniem kory, łyka i soków drzewnych. Księgarnia Polska B. Połonieckiego, Lwów.
- STRADA J. (1617-1618): Künstliche Abrisz allerhand Wasser- Wind- Rosz- und Handt Muhlen. [Faksymile: www.library.cornell.edu]. (30.11.2007).
- STRATER P.H. (1993): Na pokładzie XVIII-wiecznych żaglowców. Wielcy marynarze. Wyd. Dolnośląskie, Wrocław.
- SUPER TECH. (2008). Stowarzyszenie Producentów Obrabiarek i Narzędzi. [www.super-tech.com]. (16.02.2008).
- SUWAŁA M. (2006): Szkice o zastosowaniach drewna: od czasów najdawniejszych do współczesności. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.

- SYDOR M. (2005): Właściwości konstrukcyjne pólstywnych połączeń płyt drewno-pochodnych. Maszynopis. WMRT, Politechnika Poznańska, Poznań. [www.au.poznan.pl/sdwtd/sydor/sydor-dr2005.pdf]. (23.01.2008).
- SYDOR M. (2007): Przyczynek do historii techniki napędowej. W: Podstawy konstrukcji napędów maszyn. Red. B. Branowski. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań: 9-24.
- SZCZUKA J., ŻUROWSKI J. (1999): Materiałoznawstwo przemysłu drzewnego. WSiP, Warszawa.
- SZEWCZYK J. (1973): Materiałoznawstwo. Podręcznik dla techników rachunkowości rolnej. PWRiL, Warszawa.
- SZOLGINIA W. (1991): Architektura i budownictwo. WN-T, Warszawa.
- SZULC Z. (1953): Słownik lutników polskich. PTPN, Poznań.
- SZYMAŃSKI R. (2007): Wystawa: Polskie wiatraki. [www.skansen.chorzow-online.pl]. (14.11.2007).
- ŚPIEWAK R. (1998): Czynniki pochodzenia roślinnego jako przyczyna zawodowych chorób u rolników. W: Zagrożenia biologiczne w rolnictwie. Red. J. Dutkiewicz. Instytut Medycyny Wsi, Lublin: 135-143.
- ŚWIDRAKI i bałtyckie wraki. (2008). Panorama nauki. [nauka.panoramainternetu.pl]. (10.01.2008).
- TARAS W., TRZCIŃSKI R. (2008): Łódzie Słowian. [www.zaglowce.ow.pl]. (5.01.2008).
- TARNOWSKI W. (2004): Modelowanie systemów. Wyd. Uczeln. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- TERVUREN XYLARIUM Wood Database. (2008). Metafro – Infosys stands for Metadata African Organization. Royal Museum for Central Africa. [www.metafro.be/xylarium]. (9.12.2007-30.01.2008).
- THE AMERICAN HERITAGE DICTIONARY of the English language. (2006). Houghton Mifflin, Boston. [www.yourdictionary.com/ahd]. (13.11.2007).
- THE CLOCK MECHANICS. (2007). [www.clockplans.com]. (4.12.2007).
- THE LAKE TITICACA Reed Boat Project. (2002). Boliwia. [www.reedboat.org]. (4.12.2007).
- THE WOOD EXPLORER Database. (2008). Ver. 1.0. The Wood Explorer, Inc. [www.thewoodexplorer.com]. (12.11.2007-30.01.2008).
- THORAVAL Y. (2006): Słownik cywilizacji muzułmańskiej. Książnica, Katowice.
- TIHOLAZ A.G. (2005): Zachęta do Heraklita (dla studentów filozofii i kierunków humanistycznych). Wyd. Marszałek, Toruń.
- TROPICALNE DREWNO UŻYTKOWE. (2004-2007). [Cykl artykułów]. Okno 4/2004, 1/2005, 2/2005, 3/2005, 4/2005, 1/2006, 2/2006, 3/2006, 1/2007, 2/2007. [http://www.budmedia.com.pl]. (12.02.2008).
- T-SIX. (2007). Serwis motoryzacyjny. [www.t-six.com]. (4.12.2007).
- VASCULAR PLANTS of Poland. A checklist. (2008). Krytyczna lista roślin naczyniowych Polski. Red. Z. Mirek, H. Piękoś-Mirkowa, A. Zajac, M. Zajac. Instytut

- Botaniki im. Włodzimierza Szafera PAN, Kraków. [info.botany.pl/czek/check.htm]. (9.12.2007-30.01.2008).
- VOGEL B. (2007): Słownik lutników działających na historycznych i obecnych ziemiach polskich oraz lutników polskich działających za granicą do 1950 roku. Wyd. Nauk. Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin.
- VOGT M. (2004): Historia filozofii dla wszystkich. Klub dla Ciebie, Warszawa.
- WAGENFÜHR R. (1984): Anatomie des Holzes. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- WAGENFÜHR R., SCHEIBER C. (1974): Holzatlas. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- WALDMEISTER-BIKES. (2007). [www.waldmeister-bikes.de]. (21.11.2007).
- WAŁĘGA S.K. (2007): Chłopski Ikar znad Dunajca. Klub modelarstwa lotniczego i kosmicznego Avia. [www.avia.tarman.pl]. (19.06.2007).
- WATTS M. (2006): Windmills. Shire Publications, Buckinghamshire.
- WEIGEL G. (2005): A strategic planning model for maximizing value creation in pulp and paper mills. Maszynopis. Université Laval, Québec, Canada. [archimede.bibl.ulaval.ca]. (5.10.2007).
- WESTERN. (2007): Western Power World of Energy, Australia. [www.worldofenergy.com.au]. (14.11.2007).
- WHITE L.T., JR. (1978): Medieval religion and technology. *The Journal of Economic History* 40, 4: 849-850.
- WILLIAMS J., LEÓN H. (2001): Crecimiento del Árbol. Tejidos del Tallo Adulto. Mérida, Venezuela. [saber.ula.ve/db/ssaber/Edocs/laboratorios/labmaderas/publicaciones/guiasdeestudio/crecimientodelarbol.pdf]. (19.01.2008).
- WILTSHIRE NOTES AND QUERIES. (1896). Vol. 1, 1893-1895. [Faksymile: www.wiltshire.gov.uk]. (15.01.2008).
- WIŚLICKI A. (1996): Z dziejów maszyn. Polska Oficyna Wydawnicza BAW, Warszawa.
- WITRUWIUSZ (Marcus Vitruvius Pollio) (ok. 27-13 p.n.e.): De architectura. [Faksymile: www.fh-augsburg.de oraz www.penelope.uchicago.edu]. (17.01.2008).
- WOODBKE. (2007). [www.woodbike.com]. (21.11.2007).
- WOODBURY R.S. (1963): The origins of the lathe. *Scientific American* 208, 4: 132-143.
- WOODEN-GEAR-CLOCKS. (2007). [www.wooden-gear-clocks.com]. (4.12.2007).
- WOODENPROPELLER. (2007). [www.woodenpropeller.com]. (10.12.2007).
- WOODDEX Bearing Company Ltd. (2007). [www.wooddexbearing.com]. (8.11.2007).
- WOODWORKER. (2007). [www.woodworker.de]. (30.01.2008).
- WRÓBLEWSKI I., MEZER K. DE (1948): Podręcznik techniczny dla stolarzy. Cz. 1. Zarys materiałoznawstwa drzewnego. PZWS, Warszawa.
- WYRZYKOWSKI J.W., PLESZAKOW E., SIENIAWSKI J. (1999): Odształcanie i pęknięcie metali. WN-T, Warszawa.
- XYLONBIKES. (2007). [www.xylonbikes.com]. (21.11.2007).

- ZARZYŃSKI P. (2008): Rekordowe cisy. [Rezerwat „Cisy Staropolskie im. Leona Wyczółkowskiego w Wierzchlesie”: www.wierzchlas.las.pl]. (1.01.2008).
- ZBIERSKI H. (1999): Co każdy Śmigielanin o wiatrakach wiedzieć winien. [Centrum Kultury w Śmiglu: ck.smigiel.pl]. (15.12.2007).
- ZEISING H. (1607-1614): *Theatri machinarum erster*. [Faksymile: www.library.cornell.edu]. (14.11.2007).
- ZENKTELER M. (1971): *Mechaniczna technologia drewna*. PWN, Warszawa.
- ZIELSKI A., KRĄPIEC M. (2004): *Dendrochronologia*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- ZONCA V. (1607): *Novo Teatro di Machine et Edificii per uarie et Sicure Operazioni*. [Faksymile: www.library.cornell.edu]. (4.11.2007).
- ŻURAWSKA T. (1982): *Polskie powozy*. Ossolineum, Wrocław.

Akty normatywne

- BN-66/6110-18 Oznaczenie polysku. [Wycofana bez zastąpienia].
- BN-66/7116-02 Liny z wełny drzewnej. [Wycofana bez zastąpienia].
- BN-67/7111-15 Tarcica lotnicza sosnowa nieobrzynana. [Wycofana bez zastąpienia].
- BN-76/7111-15 Lotnicza tarcica sosnowa. [Wycofana bez zastąpienia].
- BS 1203:2001 Hot-setting phenolic and aminoplastic wood adhesives. Classification and test method. [Stosowane na gorąco fenolowe i aminowe kleje do drewna. Klasyfikacja i metody badań].
- DIN 17100 Allgemeine Baustähle. [Stal konstrukcyjna ogólnego przeznaczenia].
- DIN 68705-3 Sperrholz. Bau-Furniersperrholz. [Płyty stolarskie i sklejka. Sklejka budowlana].
- PN-D-04106:1954 Fizyczne i mechaniczne własności drewna. Badanie łupliwości.
- PN-D-94007:1952 Tarcica skutnicza liściasta do budowy i naprawy morskich jednostek pływających.
- PN-D-94007:1961 Okrętowa tarcica liściasta. [Wycofana bez zastąpienia].
- PN-D-94010:1960 Drewno w narzędziach. Warunki techniczne. [Wycofana bez zastąpienia].
- PN-D-94006:1977 Tarcica wagonowa igłasta.
- PN-D-94012:1976 Tarcica okrętowa igłasta.
- PN-D-95008:1992 Surowiec drzewny. Drewno wielkowymiarowe liściaste. Wspólne wymagania i badania.
- PN-D-95017:1992 Surowiec drzewny. Drewno wielkowymiarowe igłaste. Wspólne wymagania i badania.
- PN-D-94007:1961 Okrętowa tarcica liściasta. [Wycofana bez zastąpienia].
- PN-D-97005.11:1983 Sklejka. Sklejka ogólnego przeznaczenia. Wymagania. [Wycofana bez zastąpienia].

- PN-EN 10025-1:2007 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy.
- PN-EN 1311:2000 Drewno okrągłe i tarcica. Metody pomiaru biologicznej degradacji.
- PN-EN 13556:2005 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia stosowana w handlu drewnem w Europie.
- PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- PN-EN 60893-2:2005 (U) Materiały elektroizolacyjne. Przemysłowe sztywne płyty warstwowe na bazie żywic termoutwardzalnych do celów elektrycznych. Część 2: Metody badań.
- PN-EN 636:2005 Sklejka. Wymagania techniczne.
- PN-EN 844-9:2002 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Część 9: Terminy dotyczące cech tarcicy.
- PN-EN 927-3:2007 (U) Farby i lakiery. Wyroby lakierowe i systemy powłokowe na drewno zastosowane na zewnątrz. Część 3: Badanie w naturalnych warunkach atmosferycznych.
- PN-EN 927-6:2007 Farby i lakiery. Wyroby lakierowe i systemy powłokowe na drewno zastosowane na zewnątrz. Część 6: Ekspozycja powłok na drewno w sztucznych warunkach atmosferycznych z użyciem lamp fluorescencyjnych UV i wody.
- PN-EN ISO 2813:2001 Farby i lakiery. Oznaczanie połysku zwierciadlanego niemetalicznych powłok lakierowych pod kątem 20 stopni, 60 stopni i 85 stopni.
- PN-EN ISO 9001:2001 Systemy zarządzania jakością. Wymagania.
- PN-ENV 12038:2002 Trwałość drewna i materiałów drewnopochodnych. Płyty drewnopochodne. Metoda oznaczania odporności na podstawczaki rozkładające drewno.
- PN-H-84020:1988 Stal niestopowa konstrukcyjna ogólnego przeznaczenia. Gątki. [Zastąpiona przez PN-EN 10025:2002 (U)].
- PN-L-19000:1952 Lotnicza tarcica sosnowa. Warunki techniczne. [Wycofana bez zastąpienia].
- PN-L-19001:1952 Lotnicza tarcica świerkowa. Warunki techniczne. [Wycofana bez zastąpienia].
- PN-L-19002:1952 Lotnicza tarcica jesionowa. Warunki techniczne. [Wycofana bez zastąpienia].
- PN-L-19010:1952 Lotnicza tarcica. Magazyny i magazynowanie. [Wycofana bez zastąpienia].

AUTORZY TAKSONÓW

- A. Chev.** - Auguste Jean Baptiste Chevalier (1873-1956)
A. DC. - Alphonse Louis Pierre Pyrame de Candolle (1806-1893)
A. Gray - Asa Gray (1810-1888)
A. Rich. - Achille Richard (1794-1852)
Aiton - William Aiton (1731-1793)
Asch. - Paul Friedrich August Ascherson (1834-1913)
Aubl. - Jean Baptiste Christian Fusée-Aublet (1720-1778)
B. Fedtsch. - Boris Aleksiejewicz Fedczenko (1872-1947)
Baill. - Henri Ernest Baillon (1827-1895)
Banks - Joseph Banks (1743-1820)
Beadle - Chauncey Delos Beadle (1856-1950)
Benth. (lub Bentham) - George Bentham (1800-1884)
Binn. - Simon Binnendijk (1821-1883)
Blume - Carl Ludwig von Blume (1796-1862)
Bong. - August (Gustav) Heinrich von Bongard (1786-1839)
Borkh. - Moritz Balthasar Borkhausen (1760-1806)
Brügger - Christian Georg Brügger (1833-1899)
C.F. Gaertn. - Carl Friedrich von Gaertner (1772-1850)
C.K. Schneid. - Camillo Karl Schneider (1876-1951)
Carrière - Élie Abel Carrière (1818-1896)
Chaix - Dominique Chaix (1730-1799)
D. Don - David Don (1799-1841)
DC. - Augustin Pyramus de Candolle (1778-1841)
De Wild. - Émile August Joseph de Wildeman (1866-1947)
Diels - Friedrich Ludwig Emil Diels (1874-1945)
Domin - Karel Domin (1882-1953)
Douglas - David Douglas (1798-1834)

- Ducke** – Adolpho Ducke (1876-1959)
E.H. Wilson – Ernest Henry Wilson (1876-1930)
Ehrh. – Jakob Fridrich Ehrhart (1742-1795)
Endl. – Stephan Fredrich Ladislaus Endlicher (1804-1849)
Engelm. – Georg Engelmann (1809-1884)
Engl. – (lub Engler), Heinrich Gustav Adolf Engler (1844-1930)
F. Muell. – Ferdinand von Mueller (1825-1896)
F.A. Barkley – Fred Alexander Barkley (1908-1989)
Foug. – Auguste Denis Fougeroux de Bondaroy (1732-1789)
Franco – João Manuel Antonio do Amaral Franco (1921-2009)
G. Kirchn. – Georg Kirchner (1837-1885)
Gaertn. – Joseph Gaertner (1732-1791)
Graebn. – Karl Otto Robert Peter Paul Graebner (1871-1933)
Gray – Samuel Frederick Gray (1766-1828)
Greuter – Werner Rodolfo Greuter (ur. 1938)
Guill. – Jean Baptiste Antoine Guillemin (1796-1842)
H. Deane – Henry Deane (1847-1924)
H. Karst. – Hermann Gustav Karl Wilhelm Karsten (1817-1908)
Haenke – Thaddäus Peregrinus Xaverius Haenke (1761-1817)
Hance – Henry Fletcher Hance (1827-1886)
Harms – Hermann Harms (1870-1942)
Hartm. – Carl Johan Hartman (1790-1849)
Hayne – Friedrich Gottlob Hayne (1763-1832)
Hedl. – Johan Teodor Hedlund (1861-1953)
Hegi – Gustav Hegi (1876-1932)
Hemsl. – William Botting Hemsley (1843-1924)
Hiern – William Philip Hiern (1839-1925)
Hook. f. – Joseph Dalton Hooker (1817-1911)
Huber – Herbert Huber (1931-2005)
Huds. – William Hudson (1730-1793)
J. Koenig – Johann Gerhard König (1728-1785)
J.F. Arnold – Johann Franz Xaver Arnold (?-1785)
Jacq. – Nicolaus Joseph von Jacquin (1727-1817)
Jentys-Szaferowa – Janina Jentys-Szaferowa (1895-1983)
Juss. – Antoine Laurent de Jussieu (1748-1836)
K. Koch – Karl Koch (1809-1879)
K. Schum. – Karl Moritz Schumann (1851-1904)
Keay – Ronald William John Keay (1920-1998)
King – Sir George King (1840-1909)

- Korth.** – Pieter Willem Korthals (1807-1892)
Kotula – Andrzej (Andreas) Kotula (1822-1891)
Kuhl. – João Geraldo Kuhlmann (1882-1958)
L. – Carl von Linnaeus (1707-1778)
Lam. – Jean Baptiste Antoine Pierre de Monnet de Lamarck (1744-1829)
Ledeb. – Carl Friedrich von Ledebour (1785-1851)
Lipsky – Vladimir Ippolitovich Lipsky (1863-1937)
Lindl. – John Lindley (1799-1865)
Link – Johann Heinrich Friedrich Link (1767-1851)
Loudon – John Claudius Loudon (1783-1843)
M.R. Schomb. – Moritz Richard Schomburgk (1811-1891)
Maiden – Joseph Henry Maiden (1859-1925)
Marshall – Humphry Marshall (1722-1801)
Mart. – Carl Friedrich Philipp von Martius (1794-1868)
Maxim. – Carl Johann (Ivanovič) Maximowicz (1827-1891)
Mell – brak danych, oznaczenie według GERMPASM RESOURCES... (2008)
Michx. – André Michaux (1746-1803)
Mill. – Philip Miller (1691-1771)
Mirb. – Charles François Brisseau de Mirbel (1776-1854)
Moench – Conrad Moench (1744-1805)
Muenchh. – Otto von Münchhausen (1716-1774)
Nutt. – Thomas Nuttall (1786-1859)
Oliv. – Oliver Daniel (1830-1916)
Pall. – Peter Simon von Pallas (1741-1811)
Pančić – Joseph Pančić (1814-1888)
Perr. – Pauline Lesley Perry (ur. 1927)
Purkyně – Emanuel von Purkyně (1832-1882)
Pursh – Frederick Traugott Pursh (1774-1820)
R. Hartig – Robert Heinrich Julius Adolph Hartig (1839-1901)
Racib. – Raciborski Marjan (1863-1917)
Radlk. – Ludwig Adolph Timotheus Radlkofer (1829-1927)
Raf. – Constantine Samuel Rafinesque (1783-1840)
Record – Samuel James Record (1881-1945)
Rohwer et al. – brak danych, oznaczenie według GERMPASM RESOURCES... (2008)
Roth – Albrecht Wilhelm Roth (1757-1834)
Roxb. – William Roxburgh (1751-1815)
Rupr. – Franz Josef Ivanovich Ruprecht (1814-1870)
Sarg. – Charles Sprague Sargent (1841-1927)
Schott – Heinrich Wilhelm Schott (1794-1865)

- Scop.** - Joannes Antonius (Giovanni Antonio) Scopoli (1723-1788)
Sieb. (lub Siebold) - Philipp Franz Balthasar von Siebold (1796-1866)
Sm. - James Edward Smith (1759-1828)
Spach - Édouard Spach (1801-1879)
Sprague - Thomas Archibald Sprague (1877-1958)
Staszk. - Jerzy Staszkiewicz (ur. 1929)
Sw. - Olof Peter Swartz (1760-1818)
T. Mey. - Theodore Meyer (1910-1974)
Teijsm. - Johannes Elias Teijsmann (1808-1882)
Tiegh. - Phillippe Édouard van Tieghem (1839-1914)
Tul. - Louis René Tulasne (1815-1885)
Turra - Antonio Turra (1730-1796)
Urb. - Ignatz Urban (1848-1931)
Vahl - Martin Vahl (1749-1804)
Vell. - José Mariano da Conceição Vellozo (1742-1811)
Vent. - Ventenat Étienne Pierre (1757-1808)
Voss - Andreas Voss (1857-1924)
W. Parry - William Edward Parry (1790-1855)
W. Theob. - William Theobald (1829-1908)
Walter - Thomas Walter (1740-1789)
Wats. - brak danych, oznaczenie według GERMPPLASM RESOURCES... (2008)
Wight - Robert Wight (1796-1872)
Wilk. - Heinrich Moritz Wilkomm (1821-1895)
Willd. - Carl Ludwig von Willdenow (1765-1812)
Zucc. - Joseph Gerhard Zuccarini (1797-1848)

INDEKS OSOBOWY

Abbas	156	Branowski	307
Ader	170, 171	Breguet	180
Agricola G.	197	Brinell	40, 41, 44
Agricola M.	290	Broadwood	299
Alban.....	290	von Burgsdorf	63
Al-Rahman II	156	Bystrzonowski	160
Amati	289, 290	Cai Lun	346
Amenhotep III	93	Castro	342
Antoinette.....	180	Castrucci	290
Anzani	178	de Caus	197, 244, 246
Arystoteles	109	Cayley	162, 163, 168
August Oktawian	191	Chanute	166, 167, 174
Babbit	261	Chappuy	290
Backers	299	Chavez	176
Bacon	156	Cheops	93
Behem	139, 140	Chmielowski	160
Bem	160	Clarke	236
Bergonzi	290	Collinge	143
Bernoulli	200, 218	Collins.....	133
Bertolotti	290	Cristofori	296, 297, 298, 299
Besson	241, 242, 243, 254, 255, 272, 273	Curtiss	171, 180, 181
Bielski	159	Cyprian	164
Biringuccio	238	Czosnowski	66
Blériot	175, 176, 178, 180, 181	Dalem	143
Blüthner	297	Dankwart	290
Boquay	290	Dante	157
Boratyni	159	Dekan	12
Bourdin	200	Dias	130

Dobrucki	290	Janka	40, 41, 44
Drais	143	Johann	104
Drzewiecki	172, 173, 175, 178, 179, 181	Kazimierz Wielki	64
Dżeser	110	Klotz	290
Eberle	290	Kotarbiński	275
Eiffel	178	Krzysik	101
Eliasz	139	Kułach	164
Epple	341	Leakey	9
Erard S.	297, 300	Leonardo da Vinci	155, 157, 240, 254, 256
Errard J.	243, 253	Lilienthal	165, 166, 167
Esnault-Pelterie	180	Linde	73, 104, 231
Euler	200	Locatelli	290
Feldhaus	204	Lonati	290
Filon z Bizancjum	191	Lulua	203
Fontana	270, 271	Lupot	290
Fornari	290	Ławniczak	309
Fourneyron	200	Łazarenko	337
Gaglian	290	Maggini	290
da Gama	130	Marius	296
Gand	290	Marks	104
Garros	176	Mascitti	290
Geminiani	290	Matejak	137
di Giorgio Martini	203, 204, 251, 252, 256, 267, 271	Maudslay	248
Girard	200	Maxim	171, 172
Gloger	195	Meikle	216, 218
Gobetti	290	Miller	261
Goszczyński	164	Montagnana	290
Groblicz	290	Montaigne	118
Guadagnini	290	Montgolfier	160, 161
Guarneri	290	Morgan	336, 337
Guersan	290	Moy	169, 170
Henson	168, 169	Nagórski	176
Heraklit	13	Nagyvary	292
Heron z Aleksandrii	148, 202, 302	Naronowicz-Naroński	12, 385
Hertz	39	Niestierow	176
Hoffman	172	Nördlinger	93
de Honnecourt	250, 251, 252	Olivier	156
Jacobsson	103	d'Orleans	244
Jadwiga Śląska	140, 151	Ostroróg	65

Ötzi	111	Stodart	299
Pegoud	176	Storioni	290
Pénaud	169	Strada	257-258
Pierray	290	Stradivarius	290-293
Piotrowski	159	Stringfellow	169
Platon	11, 306	Swedenborg	162, 163
Polhem	248	Szulc	290
Polignac	143	Świętochowski	103
Pollens	296	Tański	165, 167, 175
Potocki	162	Teje	93
Praetorius	290	Teodoros	236
Priestley	161	Ts'ai Lun	346
Ramelli	207, 256	Turczaninow	66
Read	305	Turriano	197, 267, 275, 348
Reuleaux	104	Tutenchamon	92
Ricardo	104	Uffan	12
Rivallon	170	Umar Ibn al- Chattab	203
Ruggieri	290	Van der Waals	30
Saulnier	178	Veranzio	158, 257
Schickhardt	243	Victoria	295
Schroter	296	Voisin	180
Segner	200	Vorreiter	93
Seraphin	290	Votey	302
Seweryn	164, 165	Vuillaume	290
Sibermann	296	Waler	297
Siemienowicz	159, 160	Wawrzyńczak	164
de Sivrac	143	Wenham	163
Skwarczyński	235	Whitehead	173, 174, 180
Smeaton	218	Whitworth	249
Smith	104	Wilkinson	248
Solski	10, 106, 140, 151, 152, 155, 209, 229, 257, 258, 260, 261	Willkins	158
Somis	290	Wincenty Kadłubek	345
Sowiński	166	Witruwiusz	10, 110, 148, 191-192, 267, 284, 345
Stanisław August	162	Władysław Jagiełło	115
Stein	297	Wnęk	164, 165, 166
Steiner	290	Wright	79, 174, 175, 176, 180
Steinway	295, 297	Zebisz (Sebisch)	160
Stieber	131	Zump	296

INDEKS RZECZOWY

A

Aboudikro	335
Acajou	22, 83
Afromozja	83
Akacja	119
Al-Hashemi-II (okręt)	133
Anizotropia	16, 34
budowy anatomicznej drewna	33, 47, 187, 287
właściwości akustycznych (drewna)	286
właściwości wytrzymałościowych (drewna)	16, 101, 102, 305
Azobe	330

B

Babit	332
Balsa	32, 41, 44, 45, 52, 53, 187, 188, 328
Bambus	112, 173, 320, 325, 327
Bankirai	83
Barwa drewna	19, 21, 23, 34, 335
bielu	27
brzozy	58
buku	60, 316
dębu	65
grabu	66
gruszy	67
jedlicy	69
jesionu	70
jodły	72
lipy	73

mahoniowców	83
modrzewia	74
niezabezpieczonego	36
robinii	75
sosny	77
świerku	79
topoli	80
tropikalnego	81
twardzieli	27
Biel	26, 27
dębu	65
jedlicy	69
jesionu	70
modrzewia	74
robinii	75
cisu	63
Biel	99
Blackbutt	330
Brąz	332
Brzost	<i>Patrz: więz górski</i>
Brzoza	21, 22, 23, 27, 44, 51, 55, 59, 86, 90, 93, 100, 145, 183, 184, 187, 189, 308, 314, 316, 318, 320, 325, 335, 338
biała	179
brodawkowata	45, 55, 56, 58, 59
cukrowa	58
czarna	56, 58
dahurska	55, 58
gruczolkowata	<i>Patrz: brzoza brodawkowata</i>
japońska	58
karłowata	55, 58
niska	55, 58

- ojcowska55, 58
 omszona.....56, 58
 karpacka58
 typowa58
 Szafera.....55, 58
 żółta.....58
 Budowa maszyn..... 103, 106
 Buk 21, 22, 23, 27, 39, 41, 44, 48, 51, 55,
 60, 61, 62, 70, 78, 85, 86, 90, 93, 100, 276,
 308, 314, 315, 316, 320, 325, 327, 333
 kanadyjski333
 pospolity *Patrz:* buk zwyczajny
 pośredni.....60
 prasowany.....333
 wielkolistny.....60
 wschodni60
 zwyczajny.....45, 55, 56, 60, 61, 179, 331, 341
 Bukszpan 330
- C**
- Camphorwood..... 330
 Cedr 92, 119
 libański.....93
 Celuloza 29, 30, 33, 84, 90, 91, 92
 Ceramika 14
 Cewki 16, 23, 24
 CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic) 15, 29
 Chmielgrab wirginijski 82
 Ciepło właściwe 20
 Cis..... 21, 27, 44, 55, 56, 63, 90, 93, 111, 112,
 114, 115, 116, 117, 152, 240, 365
 europejski115
 pacyficzny *Patrz:* cis zachodni
 pospolity45, 55, 56, 63, 64, 116
 pośredni.....55, 63
 tatarski27
 zachodni63
 CWS T1..... 144
 Cyprys..... 90
 Czeremcha amerykańska 57
 Czereśnia 27, 38
 ptasia179
 Częstotliwość rezonansowa 17
- D**
- Dalbergia 335
 Dąb 14, 22, 23, 26, 27, 28, 29, 32,
 36, 41, 44, 45, 48, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 60,
 64, 65, 70, 76, 78, 90, 93, 94, 100, 111, 116,
 132, 136, 145, 152, 190, 211, 223, 238, 269,
 276, 277, 308, 325, 335
 bezszypułkowy.....55, 56, 64, 65
 biały.....65
 błotny55, 65
 czerwony57, 65
 korkowy.....65
 letni..... *Patrz:* dąb szypułkowy
 omszony55, 65
 ostrolistny.....198
 pospolity *Patrz:* dąb szypułkowy
 szypułkowy.....55, 56, 64, 65, 330
 twardy..... *Patrz:* dąb szypułkowy
 zimowy *Patrz:* dąb bezszypułkowy
 De Havilland Mosquito 188
 Degame 330
 Delignit 84, 87, 328, 329
 Dereń..... 112
 Długi łuk 111, 114, 115, 116, 117
 Dostępność 20, 102
 Drewno
 budowa16
 definicja.....13
 amarantowe81
 beztwardzielowe58, 66
 bielu.....27
 do budowy okrętów14
 drobnoślōiste.....63
 gatunków iglastych.....16, 26, 39, 70, 129,
 261, 320
 gatunków liściastych16, 26, 29, 39, 50, 85,
 261, 313, 314, 320, 328
 gatunków tropikalnych.....23, 313
 klejone83, 186, 187
 klejone warstwowo83
 konstrukcyjne13
 lite13, 15, 83, 84, 85, 91, 186, 187, 189,
 306, 314, 330, 336

- lożyskowe.....137
 miękkie34, 41, 45, 81
 odziomkowe81
 późne.....24, 27, 29, 38, 46, 70, 74, 117, 285
 grabu66
 robinii.....75
 świerka.....79
 prasowane54, 61, 83, 85, 86, 87, 189, 317,
 328, 330, 331, 333
 prostowłókniste.....145
 satynowe.....81
 szerokosłoiste.....25, 26, 69, 71, 288
 twarde.....34, 314
 twardzieli.....27
 uszlachetnione306
 wąskosłoiste25, 26, 65, 69, 71, 286, 288
 wczesne.....24, 27, 29, 65
 grabu66
 jesionu70
 robinii.....75
 świerka.....79
 wężowe.....43
 Drzwi Płockie139
- E**
- Estetyka.....19
 Eukaliptus68, 83, 90
- F**
- Falistość słoii21
 Fornir.....59, 83, 85, 86, 87, 88, 183, 187, 189,
 318, 319, 320, 327, 328, 338
 Fortepian 71, 72, 80, 284, 286, 287, 294, 295,
 296, 297, 299, 318, 328, 352, 353, 354
 Fregata.....130
 Freijo.....83
- G**
- Galanteria drzewna.....21
 Galeon130
 Galera.....130
 Garbniki.....27
- Gatunki
 iglaste21, 39, 55, 122
 liściaste.....21, 26, 29, 39, 55, 86, 188
 Gęstość17
 Gęstość drewna41
 GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) 29
 Gitara63, 71, 72, 80, 81, 284, 287, 310,
 311, 312, 313
 akustyczna.....310, 312
 elektryczna73, 312
 Głóg.....152
 dwuszyjkowy.....55
 jednoszyjkowy55
 Grab.....21, 27, 41, 44, 63, 66, 93, 100, 136,
 152, 224, 225, 226, 309, 314, 316
 amerykański.....66
 Czosnowskiego.....66
 japoński.....66
 karoliński.....82
 luźnokwiatowy.....66
 pospolity330, *Patrz:* grab zwyczajny
 sercowaty.....66
 Turczaninowa66
 wschodni66
 zwyczajny27, 45, 55, 56, 66, 67
 Grochodrzew26, 27, 37, 41, 44, 45, 55,
 57, 75, 90, 115, 116
 Grusza.....27, 37, 44, 67, 308, 318, 335
 afrykańska83
 domowa67
 dzika.....67
 kaukaska.....67
 oliwkolistna.....67
 polna.....67
 pospolita45, 55, 56, 67, 68, 330
 szara67
 ussuryjska.....67
 wierzbolistna.....67
 Gwajak42, 44, 45, 53, 54, 330, 332
 Gwajakowce.....83, 330
 Gwajakowiec
 lekarski.....330
- H**
- H-4 Spruce Goose.....187
 Heban.....44, 335

- Hebanowce..... 21, 90
 Hemiceluloza 33
 Hemicelulozy 16, 29, 30, 98
 Hikora 115, 116
 Holender (wiatrak) 204, 207, 209, 213,
 214, 215, 253
 Holk..... 130
- I**
- Inżynier 11
 Iroko 83
- J**
- Jabłoń 27, 38, 226
 dzika 56
 Jakość 19, 21
 Jałowiec 21, 27
 pospolity 55
 sawina 55
 Jarzęb pospolity 55, 56
 Jarzębina 115
 Jawor 48, 51
 Jedlica zielona 55, 57, 68, 69
 Jesion..... 22, 23, 26, 27, 29, 37, 41, 44,
 52, 54, 55, 63, 70, 85, 90, 93, 100, 112, 115,
 116, 132, 145, 165, 178, 189, 223, 240, 276,
 308, 313, 316, 317, 325, 333, 335, 366
 amerykański.....55, 70
 biltmorski70
 mannowy.....55, 70
 omszony *Patrz:* jesion pensylwański
 ostroowockowy55, 70
 pensylwański55, 70
 wąskolistny70
 wyniosły45, 53, 55, 56, 70, 71, 115, 116,
 117, 179
 Jesionoklon.....*Patrz:* klon jesionolistny
 Jodła 23, 27, 44, 55, 71, 72, 90, 93, 224,
 240, 276, 335
 balsamiczna.....71
 biała *Patrz:* jodła pospolita
 grecka.....55, 71
- jednobarwna55, 71
 kalifornijska.....*Patrz:* jodła jednobarwna
 kaukaska55, 71
 koreańska55, 71
 olbrzymia.....71
 pospolita45, 55, 56, 71, 72
 syberyjska.....71
 wonna71
- K**
- Karawela 130
 Karraka..... 130
 Kasztan 27
 Kasztanowiec..... 27, 57
 zwyczajny.....27, 57
 Keruing..... 83
 Kliper..... 130
 Klon..... 27, 37, 55, 90, 93, 112, 115, 188, 276,
 291, 308, 310, 313, 315, 316, 317, 320, 325,
 332, 335
 cukrowy115, 116
 Ginnala.....55
 japoński.....55, 63
 jawor.....27, 41, 44, 45, 55, 56, 152, 179, 313
 jesionolistny57
 palmowy55
 połny56, 179
 srebrzysty27, 38, 55, 320
 tatarski55
 zwyczajny27, 56
 Koga 130
 Koło 198, 199, 226, 227, 234, 244, 251,
 252, 260, 275
 deptakowe9, 109, 148, 150, 229, 230,
 231, 234
 wodne9, 109, 190-192, 194-200, 209, 234,
 237, 251, 252, 260, 265
 Konduktywność 20
 Korab..... 130
 Korek..... 48, 52
 Korowina..... 24
 Koszt utylizacji..... 20
 Kozłak 210

- Krabak..... 82
- Krażek linowy 146
- Krażek stały..... 146
- Kryształity celulozy 16, 30
- Kształtki sklejkowe.... 62, 86, 88, 183, 323, 337
- L**
- Lacewood 325
- Langskip..... 130
- Leszczyna 27, 90, 115
- Lignina 16, 29, 30, 33, 36, 90, 91, 92
- Lignofol 15, 84, 85, 86, 87, 187, 189, 309, 333
- Lignomer..... 309
- Lignoston 15, 53, 84, 331
- Limak *Patrz: wiąz szypułkowy*
- Lipa..... 21, 27, 37, 41, 44, 45, 72, 73, 90, 313
- amerykańska.....73
- amurska73
- drobnołistna.....55, 56, 72
- krymska.....73
- małolistna.....73
- srebrzysta55, 72
- szerokolistna.....56, 72
- Longbow 114, 355
- Lotnia 157, 167
- Ł**
- Łątka..... 175
- Łożyska ślizgowe 331
- Łożysko 328, 330
- Łożyskowanie 218, 279
- Łódź trzcinowa..... 118
- Łuk 9, 110, 112, 113, 114, 116, 117
- azjatycki.....112
- kompozytowy.....112, 113, 114
- prosty111, 114
- refleksyjny111, 112, 114
- Łupliwość..... 18, 41
- Łyko 24
- M**
- Machina 10
- Mahonie 21, 23
- Mahoniowce..... 83, 179
- Mahoń..... 42, 44, 45, 63, 83, 310, 313, 335
- Makrofibryle..... 30
- Mary Rose 114
- Maszt..... 120, 125
- Maszyna 10, 103, 106, 162, 170, 242, 244, 255, 273, 345
- Maszyny
- biologiczne106
- elektroniczne.....106
- energetyczne5, 9, 106, 109, 275
- napędowe106, 190
- produkcyjne106, 109
- proste.....109, 110
- robocze.....106
- transportowe.....9, 106, 109, 118
- MDF (Medium Density Fiberboard) 34, 84, 307
- Mechanika wiedeńska..... 299
- Meranti 83
- Mersawa 82
- Micro 330
- Miękisz 16
- Mikrofibryle 30
- Młyn..... 140, 141, 192, 196, 203
- plywający.....197
- zbożowy141, 203
- Moc człowieka..... 123
- Modrzew 22, 27, 41, 44, 55, 74, 90, 93, 122
- europejski45, 55, 56, 74
- japoński.....55, 74
- syberyjski.....55
- Moduł Younga 17
- Morwa..... 112
- N**
- Nakajima Ki-106..... 186
- Nylon 332

- O**
- Obrabialność 19
- Odporność na prąd pelzający 20
- Olcha 318
- Oliwka 335
- Olsza... 22, 23, 27, 29, 41, 44, 45, 55, 93, 313,
328, 335
- czarna 56
- szara 56
- Oporność akustyczna 17
- Oporność falowa (impedancja) 46
- Ortotropia cylindryczna 34
- Orzech 308, 318
- Orzesznik 179, 316, 325, 335
- Osika 37, 56, 93
- P**
- Palisander 310, 325, 335
- Paltrak 214, 215
- Pernambuk 81
- Piasta 145
- Pień (drzewa) 24
- Pilarka ramowa 250, 251, 254, 256, 262,
263, 357
- Piła 259, 262
- Plastyczność 18
- Płyta
- pilśniowa 34
- rezonansowa 284, 287
- stolarska 309
- wiórowa 34
- PNW (Punkt Nasylenia Włókien) 31
- Pochłanianie cieczy niepolarnych 20
- Podwozie 179
- Pojazd 337
- Połysk drewna 36, 37
- Poon 330
- Porowatość drewna 17
- Poszycie karawelowe 127
- Poszycie zakładkowe 130
- Prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej .. 45
- Project Habakkuk 133
- Promienie drzewne 16
- Przenikalność elektryczna 20
- Przepuszczalność gazów 20
- Przewodnictwo cieplne 20
- Przewody żywiczne 16, 74
- PTFE 332
- Pudło rezonansowe 310
- Pykrete 133
- R**
- Rdzeń (pnia drzewa) 27, 29
- Robinia
- akacyjowa 41, 55, 75, 276
- Rodzina
- brzozowatych 58
- bukowatych 27, 60, 64
- kasztanowcowatych 27
- Rozszerzalność cieplna 20
- RWD-22 188
- Ryflka 145
- Rysunek drewna 19, 21, 23, 38
- S**
- Samochód 337
- Samolot 170, 171, 172, 176, 177, 178, 183,
186, 188
- Sapele-mahogany 335
- Satin 335
- Sekwoja 68
- Silnik 168, 178
- Sklejka 15, 34, 59, 60, 72, 87, 88, 89, 144,
183, 184, 186, 187, 188, 189, 309, 318, 322,
323, 325, 327, 333, 334, 335, 338, 362, 366
- brzozowa 183, 188, 327, 338
- brzozowo-bukowa 313
- brzozowo-olchowa 327
- brzozowo-wiśniowa 325
- budowlana 365
- bukowa 190, 327
- bukowo-brzozowa 60, 62, 63, 86, 327
- jesionowa 336
- lotnicza 59, 62, 72, 78, 186, 187, 189

- olchowa.....327
 olchowo-bukowa.....313
 sosnowo-brzozowa88
 sosnowo-olchowa.....88
 Skrzydłowiec..... 159
 Skrzypace 289, 290, 291, 293
 Sosna 22, 25, 27, 28, 29, 38, 44, 52, 53, 54,
 55, 76, 77, 78, 79, 88, 90, 93, 99, 125, 132,
 184, 189, 190, 211, 224, 276, 278, 319, 362
 Banksa57
 błotna77
 czarna.....57
 himalajska.....55
 kosa.....55, 77
 limba.....77
 smołowa.....55
 wejmutka57, 77
 wydmowa.....55
 zwyczajna45, 55, 56, 76, 189, 319
 żółta.....55
 Sprężystość..... 18
 Stal..... 53, 366
 Star 50..... 144
 Struny 311
 Szakłak
 pospolity.....55
 Szerokość rezonansu 46
 Szprychy..... 145
- Ś**
- Ścieralność 18, 20
 Śliwa..... 27, 56
 Śmigło 178, 219, 253
 Średnia cena drewna 23
 Świerk 22, 27, 44, 55, 59, 72, 78, 90, 93,
 188, 190, 276, 278, 284, 285, 294, 311, 312
 Świerk pospolity.....45, 55, 56, 78, 311
- T**
- Teczyna wyniosła..... 82
 Tek..... 330
 Teredo navalis 131
 Tłumienie dźwięku 17, 46, 49
 Tokarka 236, 238, 244, 245, 246, 247
 Topola 22, 23, 27, 29, 41, 44, 55, 73, 80,
 81, 90, 93, 188, 310, 313, 320
 amerykańska.....55
 balsamiczna.....55
 biała41, 45, 55, 56, 80, 335
 kanadyjska.....55
 osika41, 80, 320
 wirginijska.....55
 włoska55
 Trwałość..... 198, 309
 zespołów modelowych.....309
 Trwałość drewna 19, 89, 366
 Twardość..... 18, 40, 44
 drewna41
 Twardziel 27, 74, 77, 99, 211
 cisu.....63, 64
 dębu.....65
 jedlicy69
 jesionu70
 jodły.....72
 fałszywa.....61
 mrozowa.....61
 sosny77
 Tworzywa drewnopochodne 13
- U**
- Udarność 18, 44
 UHMW-PE (Ultra High Molecular Weight
 Polyethylene)332
- W**
- Wciągarka 151, 152
 Wełna
 drzewna.....84, 365
 Wenge325
 Wiatrak 204, 206, 208, 210, 211, 214, 215, 234
 Wiąz 22, 26, 38, 41, 44, 55, 56, 93,
 112, 115, 240, 335
 górski..... 45, 56, 115-117
 pospolity.....56, 179

szorstki.....	<i>Patrz: wiąz górski</i>	Włókna drzewne.....	16
szypułkowy.....	56, 115, 117	Woda w drewnie.....	31
Wiązowiec zachodni.....	82	Woodex.....	331, 332, 364
Wiek kambialny.....	46	Wóz Eliasza.....	139
Wierzba.....	27, 55, 85, 90, 93	Wózek mierniczy.....	142
biała (srebrna).....	56	WPC (Wood Plastic Composite).....	15, 84
borówkolistna.....	55	Współczynnik	
krucha.....	56	Andriejewa.....	51, 288
lapońska.....	55	bezpieczeństwa.....	101, 187
siwa.....	56	jakości akustycznej.....	
Wilgotność.....	17 <i>Patrz: współczynnik Andriejewa</i>	
bezwzględna drewna.....	31	mocy (maszyny parowej).....	170
drewna.....	31	mocy (silnika żywego).....	235
równoważna.....	32	odbicia (światła).....	37
Wiśnia.....	27, 226, 325, 335	odbicia fali dźwiękowej.....	17, 46
Wiśnie.....	56	Poissona.....	47, 49
Właściwości		strat dielektrycznych.....	20
drewna.....	16, 32, 33	tarcia.....	20
ekonomiczne.....	20	załamania (światła).....	37
eksploatacyjne.....	19, 39	Wytrzymałość	
elektryczne.....	20	elektryczna.....	20
estetyczne.....	35	statyczna.....	18
fizyczne (drewna).....	17, 18, 45, 81, 101, 356	zmęczeniowa.....	18
fizyczne (kompozytów).....	16		
konstrukcyjne.....	9, 16	Z	
technologiczne.....	19	Zabarwienia (wada drewna).....	94
termiczne.....	20, 54	Zakres temperatury pracy.....	20
wytrzymałościowe.....	18, 21, 25, 26, 31, 38, 45, 85, 86, 89, 189, 308, 309		
Właściwości konstrukcyjne.....	363	Ż	
Właściwości optycznych.....	37	Żuraw.....	148, 151
Właściwości wytrzymałościowe.....	41		

SUMMARY

WOOD IN MACHINE CONSTRUCTION History of the most important material

Wood is the most important material in machine construction. There is no doubt that it cannot be called the most important material used at the present time but there is no question that it remains the most important material of all times.

This book is the outcome of the author's fascination with the construction history of masterpieces of technical civilisation. The choice and arrangement of the book's content have been selected in such a way as to support with strong evidence the assumed hypothesis about absolute supremacy of wood over all engineering materials. The problems presented in the book can serve two purposes: firstly - to show contemporary engineers historical ways of looking for new technical solutions and, secondly - to encourage contemporary humanists to get better acquainted with, frequently marginalised, values of our industrial and technical heritage.

The book does not overlook the legacy of Polish engineers and technicians working at home and in exile in foreign countries. The author utilised information derived from 32 antique books, 154 monographs and other literature sources, 33 normative acts and 62 internet sources. The publication comprises 35 tables and 182 drawings.

The first chapter explains the author's concept and idea of the book. It gives, among others, two important historical definitions of a machine found in technical literature: the oldest known definition (by Vitruvius, about 20 AD) and the oldest one in the Polish language (after Solski, 1683). Both of them associate a machine with wood.

Chapter two characterises the triad: engineer – wood – machine. The author employs the enlightened understanding of the ethos of the engineer from 1650s attributed to Josef Naronowicz-Naroński. In the second part of this chapter devoted to wood, over 70 of its constructional properties significant from the point of view of the application of wood materials in machine construction were identified. Certain properties were discussed in more detail, i.e. those which, in the author's opinion, exert the most important effect on the choice of a definite engineering material for application in machine construction. In further sections of the chapter, the author catalogued the economically most important wood species in Poland; selected wood-derived materials were characterised; defects of wood materials were described and requirements of sawn timber used in machine construction were listed. In the final part of the chapter, the author defined the term "machine" and general systematics of machines was presented. Last but not least, an attempt was made to answer the question why wood is the most universal material of all engineering materials.

Chapter three presents a review of the history of machines built with significant participation of wood. It opens with simple machines which were essential for the development of all other mechanisms and continues with descriptions of selected types of machines (ships, vehicles, airplanes, cranes, motors, machine tools, energetic machines and musical instruments). The sequence is not accidental, the author selected machines constructed with the participation of wood and which belong to each of four classes. Following a short introduction in which simple machines are described, the following four machine categories were described: (1) transport machines (ships, wooden wheel vehicles, cranes and flying machines heavier than air); (2) selected motors and their applications (water wheels, treadwheels and windmills); (3) selected working machines (machine tools and port machines); (4) selected energetic machines (mechanical chemical machines and musical instruments).

Chapter four includes descriptions of selected cases of contemporary applications of wood in machine constructions. The author presented several dozen cases of simple and obvious applications to more surprising ones, e.g. the application of wood in advanced constructions of numerically controlled machine tools with bodies manufactured with wood participation. The chapter begins with general remarks in which it is emphasised that even in the 19th century wood was used in machine construction surprisingly frequently. This was due to certain unique physico-chemical properties of this material but not exclusively. There were also subjective

quality traits of this material as well as certain characteristics of the social environment of the future wood article, e.g. preconditions associated with the tradition of application of this particular material in some applications, such as musical instruments or sport equipment.

The book ends with a short "Recapitulation" in which the author sums up the main idea found in the title of the book.