1 Podstawy konstrukcji maszyn

Wydawnictwo WNT

1 Podstawy konstrukcji maszyn

Autorzy

Marek Dietrich
Stanisław Kocańda
Bohdan Korytkowski
Włodzimierz Ozimowski
Jacek Stupnicki
Tadeusz Szopa

1 Podstawy konstrukcji maszyn

pod redakcją

Marka Dietricha

Wydawnictwo WNT

Redaktorzy WNT:
Elżbieta Czarzasta
Ewa Kiliś
Halina Wierzbicka

Wydawca:
Karol Zawadzki

Projekt okładki i stron tytułowych: *Grafos*
Ilustracja na okładce: *Asergieiev/iStock*
Skład i łamanie: *Małgorzata Broszkiewicz*

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo.
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Wydanie pierwsze ukazało się w czterech tomach publikowanych w latach 1986–1991 nakładem Państwowego Wydawnictwa Naukowego.

Copyright © by Wydawnictwo WNT
Warszawa 1999, 2015
Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2017

ISBN 978-83-01-19121-4 (t. 1–3)
ISBN 978-83-01-19117-7 (t. 1)

Wydanie III – 1 dodruk (PWN)
Warszawa 2017

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl
www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

Spis treści

Przedmowa – 11

1. Wprowadzenie do problematyki konstruowania – 15

Marek Dietrich (p. 1.1, 1.2), *Włodzimierz Ozimowski* (p. 1.3÷1.7), *Jacek Stupnicki* (p. 1.8)

1.1. Proces konstruowania – 15
1.2. Kryteria oceny konstrukcji – 23
1.3. Zasady wytwarzania maszyn – 27
1.3.1. Półfabrykaty – 28
1.3.2. Przetwarzanie półfabrykatów – 33
1.3.3. Montaż – 36
1.4. Dokładność elementów maszyn – 38
1.4.1. Dokładności wymiarów liniowych – 38
1.4.2. Pasowania – 40
1.4.3. Chropowatość powierzchni – 41
1.4.4. Odchyłki kształtu i położenia – 44
1.5. Normalizacja w budowie maszyn – 44
1.6. Unifikacja – 45
1.7. Wybrane problemy ochrony patentowej – 46
1.8. Materiały konstrukcyjne – 48
1.8.1. Właściwości mechaniczne materiałów konstrukcyjnych – 55
1.8.2. Właściwości fizyczne materiałów konstrukcyjnych – 61
1.8.3. Właściwości technologiczne materiałów konstrukcyjnych – 63
Bibiliografia – 66

2. Modelowanie i optymalizacja – 68

Marek Dietrich (p. 2.1÷2.3), *Włodzimierz Ozimowski* (p. 2.4, 2.5)

2.1. Ogólne problemy modelowania – 68
2.1.1. Istota i potrzeba modelowania – 68

2.1.2. Model nominalny – 71
2.1.3. Model matematyczny – 77
2.1.4. Zjawiska losowe w maszynach – 81
2.1.5. Identyfikacja parametrów modelu – 83
2.2. Metody badania modeli matematycznych – 84
2.3. Optymalizacja w budowie maszyn – 85
2.3.1. Problematyka optymalizacji – 85
2.3.2. Model optymalizacyjny – 86
2.3.3. Deterministyczne metody optymalizacji – 97
2.3.4. Losowe metody optymalizacji – 110
2.4. Mieszane metody optymalizacji – 112
2.4.1. Metoda gradientowo-losowa – 112
2.4.2. Metoda kompleks – 113
2.5. Programowanie dynamiczne – 115
Bibliografia – 125

3. Wspomaganie komputerowe w budowie maszyn – 126
Bohdan Korytkowski

3.1. Wprowadzenie – 126
3.2. Systemy komputerowego wspomagania projektowania, konstruowania i kreślenia CAD 2D – 128
3.2.1. Informacje ogólne – 128
3.2.2. Wymagania sprzętowe – 128
3.2.3. Ogólne zasady pracy z programem – 129
3.2.4. Technika pracy – 130
3.2.5. Organizacja pracy – 132
3.2.6. Nakładki na programy CAD – 134
3.3. Zintegrowane systemy CAD/CAM/CAE – 134
3.3.1. Informacje ogólne – 134
3.3.2. Wymagania sprzętowe – 137
3.3.3. Ogólne zasady pracy w systemie – 137
3.4. CAD w zintegrowanym systemie CAD/CAM/CAE – 138
3.4.1. Modelowanie geometryczne 3D – 139
3.4.1.1. Narzędzia modelowania – 139
3.4.1.2. Organizacja plików – 143
3.4.1.3. Technika modelowania – 144
3.4.1.4. Modelowanie parametryczne – korzyści i zakres zastosowań – 147
3.4.1.5. Analiza elementów modelu geometrycznego – 150
3.4.2. Złożenia – 152
3.4.2.1. Zasady tworzenia złożeń – 152
3.4.2.2. Wiązanie między sobą parametrów różnych części, wchodzących w skład złożenia – 154
3.4.2.3. Rysunki eksplodowane złożeń – 154
3.4.2.4. Organizacja struktury złożenia – 155
3.4.3. Rysunek techniczny – 155
3.4.4. Niektóre programy CAE – 156
3.4.4.1. Programy z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) – 156
3.4.4.2. Programy do analizy mechanizmów – 156
3.5. Języki programowania związane z programami CAD – 157
Bibliografia – 157

4. Niezawodność i bezpieczeństwo – 158

Tadeusz Szopa

4.1. Wprowadzenie w problematykę niezawodności i bezpieczeństwa – 158
4.2. Pojęcia i miary niezawodności – 160
4.2.1. Ogólny model procesu powstawania niesprawności obiektu – 160
4.2.2. Opisowa definicja pojęcia niezawodności – 166
4.2.3. Miary niezawodności – 168
4.2.3.1. Podstawowe miary niezawodności – 168
4.2.3.2. Miary niezawodności charakterystyczne dla obiektów odnawianych – 181
4.3. Zagadnienia wyboru poziomu niezawodności – 183
4.4. Struktura niezawodnościowa – 189
4.4.1. Ważniejsze modele struktur niezawodnościowych – 189
4.4.2. Wybór postaci struktury niezawodnościowej – 193
4.4.3. Opis zależności stochastycznych między czasami funkcjonowania elementów – 194
4.4.4. Wykorzystanie metod drzew do opisu struktury niezawodnościowej i przebiegu zdarzeń niepożądanych – 196
4.5. Modelowanie i analiza niezawodności – 203
4.5.1. Możliwości kształtowania poziomu niezawodności obiektu w fazie jego projektowania – 203
4.5.2. Modelowanie i analiza niezawodności elementu obiektu mechanicznego – 206
4.5.3. Modelowanie niezawodności obiektu złożonego z wielu elementów – 215
4.5.4. Analiza niezawodności obiektu złożonego z wielu elementów – 226
4.5.5. Niezawodność człowieka – 231
4.6. Projektowanie odnowy profilaktycznej – 237
4.7. Eksperymentalne badania niezawodności – 242
4.8. Bezpieczeństwo człowieka w systemach człowiek–technika–środowisko – 249
4.8.1. Wstęp – 249
4.8.2. Podstawowe pojęcia – 252
4.8.3. Miary ryzyka i miary bezpieczeństwa – 256
4.8.4. Związki miar ryzyka z miarami niezawodności i zagrożeń – 260
4.8.5. Jakościowa analiza ryzyka – 264
4.8.6. Ilościowa analiza ryzyka – 267
4.8.6.1. Probabilistyczny model ryzyka – 267
4.8.6.2. Modelowanie zagrożeń – 269
4.8.6.3. Modelowanie niezawodności – 271
4.8.6.4. Procedura modelowania i analizy ryzyka – 271
4.8.6.5. Uwagi dodatkowe – 273
4.8.6.6. Czynnik ludzki w analizach ryzyka – 274
4.8.7. Problemy zarządzania bezpieczeństwem – 274
4.8.8. Projektowanie bezpieczeństwa – 278
Bibliografia – 278

5. Wytrzymałość elementów konstrukcyjnych na pękanie – 282

Stanisław Kocańda

5.1. Wprowadzenie – 282
5.2. Elementy liniowej mechaniki pękania. Pękanie kruche i quasi-kruche – 288
5.3. Współczynnik bezpieczeństwa – 298
5.4. Elementy nieliniowej mechaniki pękania – 301

5.4.1. Plastyczność w strefie pękania – 301
5.4.2. Rozwarcie wierzchołka szczeliny – 304
5.4.3. Całka J – 306
5.5. Pękanie plastyczne. Ujęcie ogólne – 309
5.6. Kryteria porównawcze pękania plastycznego i kruchego – 311
5.7. Wykres oceny pękania – 314
Bibliografia – 318

6. Wytrzymałość zmęczeniowa i podstawy obliczeń zmęczeniowych – 319
Stanisław Kocańda

6.1. Naprężenia zmienne i przebieg zmęczenia – wiadomości wstępne i podstawowe pojęcia – 319
6.1.1. Naprężenia zmienne – 320
6.1.2. Wykresy Wöhlera. Granice zmęczenia – 324
6.1.2.1. Wykresy Wöhlera w ujęciu statystycznym – 331
6.1.3. Wykresy zmęczeniowe – 335
6.1.4. Zjawiska zmęczenia w metalach i ich przebieg – 341
6.1.5. Przełomy zmęczeniowe – 346
6.2. Czynniki wpływające na wytrzymałość zmęczeniową – 351
6.2.1. Działanie karbu – 351
6.2.1.1. Pojęcia ogólne. Współczynniki kształtu – 351
6.2.1.2. Współczynnik działania karbu – 367
6.2.1.3. Zmniejszanie wpływu karbu przez konstrukcyjne kształtowanie – 374
6.2.2. Wpływ wielkości przedmiotu – 379
6.2.3. Wpływ rodzaju obróbki i stanu warstwy wierzchniej – 381
6.2.3.1. Obróbka skrawaniem – 381
6.2.3.2. Obróbki polepszające warstwę wierzchnią – 383
6.2.4. Działanie korozji i ośrodków aktywnych – 387
6.2.5. Wpływ temperatury – 389
6.3. Współczynniki bezpieczeństwa i dopuszczalne naprężenia. Schemat obliczeń – 390
6.3.1. Cykle symetryczne – 390
6.3.2. Cykle niesymetryczne – 396
6.3.3. Obliczenia wstępne – 404
6.3.4. Obliczenia sprawdzające i korekcyjne – 406
6.4. Obliczenia zmęczeniowe przy obciążeniach złożonych – 408
6.5. Probabilistyczne metody obliczeń zmęczeniowych – 414
6.5.1. Ocena prawdopodobieństwa zniszczenia elementów – 414
6.5.2. Ocena prawdopodobieństwa zniszczenia przy określonej wartości współczynnika bezpieczeństwa – 422
6.6. Obliczenia w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej – 426
6.6.1. Naprężenia zastępcze i współczynniki bezpieczeństwa – 431
6.6.2. Probabilistyczna ocena niezawodności z wykorzystaniem hipotezy kumulacji uszkodzeń – 433
6.7. Zakres małej liczby cykli obciążenia – 439
6.7.1. Uwagi wstępne. Pętle histerezy i wykresy cyklicznego odkształcenia – 439
6.7.2. Podstawowe zależności do obliczeń zmęczeniowych. Kryteria odkształceniowe – 444
6.7.3. Kryteria energetyczne – 450

6.7.4. Działanie karbu. Współczynniki bezpieczeństwa – 455
6.8. Obliczenia na podstawie prędkości zmęczeniowego pękania – 464
6.8.1. Opis prędkości zmęczeniowego pękania – 464
6.8.2. Prędkość pękania a mikrobudowa powierzchni pęknięć – 478
Bibliografia – 484

7. Badania eksperymentalne w budowie maszyn – 485
Jacek Stupnicki

7.1. Rola i cel badań eksperymentalnych – 485
7.2. Przygotowanie badań, opracowanie wyników, wnioskowanie – 487
7.2.1. Podstawowe wielkości mierzone w budowie maszyn – 487
7.2.2. Metodyka planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych – 487
7.2.3. Błędy pomiarów – 490
7.2.3.1. Metody pomiarów – 490
7.2.3.2. Źródła błędów – 491
7.2.3.3. Klasyfikacja błędów – 493
7.2.3.4. Ocena wyników pomiarów – 494
7.2.3.5. Wyznaczanie parametrów wzorów empirycznych metodą najmniejszych kwadratów – 500
7.3. Metody pomiarów stosowane w badaniach konstrukcji i w budowie maszyn – 502
7.3.1. Pomiary czasu, temperatury, promieniowania, wielkości akustycznych, magnetycznych, lepkości, masy i gęstości – 502
7.3.1.1. Pomiar czasu – 502
7.3.1.2. Pomiary temperatury – 502
7.3.1.3. Pomiary promieniowania — defektoskopia rentgenowska – 506
7.3.1.4. Pomiary wielkości akustycznych – 509
7.3.1.5. Badania metodami magnetycznymi – 514
7.3.1.6. Pomiar lepkości cieczy i gazów – 516
7.3.1.7. Pomiar masy – 517
7.3.1.8. Pomiary gęstości – 520
7.3.2. Pomiary sił, momentów sił, ciśnień – 522
7.3.2.1. Pomiary sił – 523
7.3.2.2. Pomiar momentu skręcającego – 525
7.3.2.3. Pomiary ciśnienia – 527
7.3.3. Pomiary wielkości geometrycznych – 531
7.3.3.1. Pomiary odległości – 531
7.3.3.2. Pomiary kształtu elementów maszyn – 535
7.3.3.3. Dyskretne metody pomiaru przemieszczeń – 540
7.3.3.4. Polowe metody pomiaru przemieszczeń – 545
7.3.4. Pomiary prędkości i drgań – 555
7.3.4.1. Pomiary prędkości – 555
7.3.4.2. Pomiary drgań – 555
7.3.5. Pomiary odkształceń i naprężeń – 560
7.3.5.1. Stan naprężenia – 560
7.3.5.2. Stan odkształcenia – 563
7.3.5.3. Pomiary odkształceń – 564
7.3.5.4. Interferometryczne metody badania odkształceń i naprężeń – 572
Bibliografia – 590

Skorowidz – 592

Przedmowa

Konstruujemy nowe obiekty techniczne, nowe maszyny. Są one niezbędne do realizacji potrzeb społeczeństwa, jego części lub jednostki, i to potrzeb nie tylko materialnych, ale także – choć pośrednio – intelektualnych i duchowych. Jest jednak rzeczą zrozumiałą, że potrzeby nie są niezmienne. Efekty konstruowania pojawiają się w przyszłości; jego podstawą powinny więc być prognozy przyszłych potrzeb. Prognozowanie jest trudne, ewolucja potrzeb społecznych zależy bowiem od wielu i to różnorodnych czynników. Bardzo ważny jest tu fakt, że spełnienie pewnych potrzeb rodzi nowe potrzeby, a także możliwości ich realizacji. Z tego wprost wynika ogromne społeczne znaczenie twórczej pracy inżynierów.

Duży wpływ pracy konstruktorów na rozwój społeczeństwa łączy się oczywiście z dużą odpowiedzialnością. Odpowiedzialność nie może jednak usprawiedliwiać żądania, żeby praca konstruktora nie zawierała ryzyka. Minimum ryzyka błędu osiąga się bowiem tylko przez powielanie dawnych konstrukcji, co jednak hamuje postęp.

Rozsądny, oparty na racjonalnych przesłankach kompromis między potrzebami a możliwościami jest podstawą wszelkich działań konstruktorów. A nie jest on sprawą prostą, biorąc pod uwagę wielość i różnorodność wpływających nań czynników. Jednoczesne uwzględnienie nieporównywalnych wprost aspektów, takich jak bezpieczeństwo, estetyka, niezawodność czy koszt jest prawdziwą sztuką; konstruowanie jest więc sztuką opartą na najbardziej nowoczesnych podstawach naukowych.

Trzytomowa książka *Podstawy konstrukcji maszyn* dotyczy szeroko pojętych problemów konstruowania maszyn. Nie jest ona przystosowana swym zakresem do jednego konkretnego przedmiotu wykładanego na uczelniach technicznych, nie stanowi więc podręcznika akademickiego w ścisłym tego słowa znaczeniu. Materiał w niej zawarty jest dostosowany przede wszystkim do przedmiotu podstawy konstrukcji maszyn, znacznie jednak rozszerzając jego zakres. Książka może także stanowić pomoc w studiowaniu przedmiotów specjalistycznych, związanych bez-

pośrednio z budową maszyn. Może też być użyteczna w praktyce inżynierskiej – zarówno w konstruowaniu, jak i w procesie odnawiania, uzupełniania i uogólniania wiedzy inżynierów.

W tomie pierwszym zostały przedstawione ogólne problemy konstruowania oraz problemy podstawowe związane wprost z budową maszyn. W rozdziale pierwszym omówiono proces konstruowania oraz wzmianki o ważnych zagadnieniach z nim związanych, takich jak problemy ekonomiczne, materiały konstrukcyjne, normalizacja i unifikacja. Wszystkich tych problemów nie można zmieścić w jednej publikacji; każdemu z nich jest poświęcone bogate piśmiennictwo. Nie można ich jednak pominąć przy omawianiu konstruowania maszyn; stąd w pierwszym rozdziale jedynie je zasygnalizowano.

Drugi rozdział to zagadnienia modelowania i optymalizacji. Potrzeba modelowania rzeczywistości jest oczywista, ale istnieje tu wiele nieporozumień. Niektóre aspekty modelowania wydają się być elementarnie proste, ale mimo to w konkretnych zastosowaniach stwarzają trudności i niekiedy prowadzą do błędów. W procesie podejmowania decyzji konstrukcyjnych pożyteczne jest posługiwanie się informacją możliwie obszerną, a jednocześnie precyzyjną. Poszukiwanie decyzji najlepszych jest znacznie ułatwione przez modelowanie optymalizacyjne.

Przy konstruowaniu maszyn powszechnie wykorzystywane są współczesne techniki komputerowe. Umożliwiają one badanie nawet bardzo złożonych modeli i otrzymywanie wyników o dużej dokładności. Zastosowanie nowoczesnych komputerów i systemów informatycznych pozwala na ograniczenie w procesie konstruowania kosztownych i czasochłonnych badań eksperymentalnych. Dzięki nim jest też możliwe analizowanie wielu wariantów rozwiązań konstrukcyjnych, a przez to optymalizacja konstrukcji. Techniki komputerowe w zastosowaniu do konstruowania noszące nazwę CAD (ang. *Computer Aided Design*) są tematem rozdziału trzeciego.

Zagadnienia niezawodności w budowie maszyn są tematem rozdziału czwartego. Brak badań niezawodnościowych bądź ich niewłaściwe wykonanie prowadzi często do błędnych decyzji konstrukcyjnych, do budowy maszyn zbyt szybko i często psujących się. Powoduje to straty związane z niewykonywaniem przez te maszyny ich zadań, a także kłopoty eksploatacyjne i remontowe. W rozdziale tym omówiono również problematykę zagrożeń stwarzanych przez maszyny i metody wpływania na ryzyko z tym związane.

Jeden z podstawowych mechanizmów niszczenia maszyn to utrata wytrzymałości w wyniku kruchego pękania lub zmęczenia materiału; tematyka ta jest omówiona w rozdziale piątym i szóstym. W zagadnieniach zmęczeniowych podstawowe znaczenie mają nawet, wydawać by się mogło, drugorzędne czynniki konstrukcyjne.

Ostatni rozdział jest poświęcony badaniom eksperymentalnym, niezwykle ważnym w procesie konstruowania. Badania eksperymentalne stanowią bowiem weryfikację modeli i analiz teoretycznych; stanowią też weryfikację przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych.

Ponieważ te różnorodne zagadnienia, przedstawione w książce z punktu widzenia potrzeb konstruktora maszyn, są związane z różnymi dyscyplinami podstawowymi, trudno było zapewnić pełną jednorodność tekstu wszystkich rozdziałów. Ujęcie takie mogłoby bowiem zbyt odbiegać od nomenklatury, symboliki, a szczególnie od sposobu traktowania zagadnień przez te dyscypliny. Dopuszczono więc pewną niejednorodność tekstu, jak również niekiedy powtórzenia materiału w kolejnych rozdziałach.

Dwa następne tomy są poświęcone problemom konstruowania elementów i zespołów powszechnie stosowanych w budowie maszyn. Należą do nich różnego rodzaju konstrukcje nośne, połączenia, sprzęgła, hamulce, łożyska, przekładnie i napędy.

Nie wyczerpuje to oczywiście całej problematyki konstruowania maszyn. Sądzę jednak, że w trzech tomach niniejszego podręcznika uwzględniono wszystkie podstawowe zagadnienia bezpośrednio związane z konstruowaniem.

Czy wybór materiału jest trafny, czy sposób przedstawienia go jest właściwy i w jakim stopniu wypełnia on potrzeby studentów i inżynierów, pozostawiam ocenie Czytelników.

Warszawa, październik 1998 *Marek Dietrich*