



# **Shigleyho konstruování strojních součástí**

---

*prostředí a aby výsledky mé práce přispěly k rozvoji společnosti. Slibuji, že budu vždy hájit čest a vážnost fakulty, na které jsem získal, či získala vysokoškolské vzdělání.*

Inženýrovo krédo (Engineer's Creed) Státní společnosti profesních inženýrů (National Society of Professional Engineers, June 1954) zní:

*Jako profesní inženýr věnuji své odborné znalosti a schopnosti k rozvoji lidské společnosti a k jejímu prospěchu.*

*Slibuji:*

*Podávat nejvyšší výkon.*

*Podílet se pouze na poctivém podnikání.*

*Žít a pracovat v souladu se zákony lidské společnosti a nejvyššími normami profesního chování.*

*Dávat přednost práci před prospěchem, důstojnosti a reputaci profese před osobními výhodami a veřejnému prospěchu před všemi ostatními činiteli.*

*V pokoře a s prosbou o Boží pomoc činím tento slib.*

## 1-6 Předpisy a normy

Byly doby, kdy neexistovaly normy pro šrouby, matice a závity. Šrouby stejného průměru mohl jeden výrobce vyrábět se stoupáním např. 2 mm, jiný se stoupáním 2,5 mm. Některá spojení měla levý závit a někdy se lišily i profily závitů. V počátcích automobilismu si mechanik po demontáži často rozložil spojovací součásti tak, aby při následné montáži zabránil jejich vzájemné záměně. Neexistence norem a jednotnosti byly drahé a neefektivní z řady různých důvodů. Nepřekvapuje proto, že lidé, znechucení a neschopni nalézt náhradu za zničenou spojovací součást, použili někdy místo ní vazací drát.

*Norma* je soubor údajů pro součásti, materiály nebo postupy mající za cíl dosažení jednotnosti, účelnosti a předepsané jakosti. Jedním z důležitých účelů normy je omezení počtu položek tak, aby bylo možné zajistit racionální výběr náradí a nástrojů, rozměrů, tvarů a úchylek.

*Předpis* je soubor údajů pro analýzu, návrh, výrobu a konstrukci technického objektu. Záměrem předpisu je docílit předepsaného stupně bezpečnosti, účinnosti a provedení nebo jakosti. Je důležité si uvědomit, že bezpečnostní předpisy nezaručují absolutní bezpečnost. Tě není možno ve skutečnosti nikdy docílit. Někdy totiž nelze zabránit výskytu neočekávaných událostí. Při návrhu budovy, mající odolávat větru o rychlosti  $190 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , to neznamená, že konstruktér považuje výskyt větru o rychlosti  $220 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  za nemožný; jednoduše je velmi nepravděpodobný.

Všechny níže uvedené organizace a společnosti vytvořily normy a bezpečnostní a návrhové předpisy. Název organizace poskytuje představu o zaměření těchto norem nebo předpisů; některé z nich je možno získat ve většině technických knihoven. V ČR je v tomto směru nejvýznamnější organizací Český normalizační institut (ČNI). Organizacemi zájímající strojní inženýry v USA jsou:

Aluminium Association (AA),  
American Gear Manufacturers Association (AGMA),  
American Institute of Steel Construction (AISC),  
American Iron and Steel Institute (AISI),  
American National Standards Institute (ANSI),<sup>4</sup>

<sup>4</sup> V roce 1966 se American Standards Association (ANSA) přejmenovala na United States of America Standards Institute (USAS). Později, v roce 1969, změnila opět svoje jméno na American National Standards Institute (ANSI), jak je shora uvedeno, a tak je tomu dodnes.

American Society for Metals (ASM),  
 American Society of Mechanical Engineers (ASME),  
 American Society of Testing and Materials (ASTM),  
 American Welding Society (AWS),  
 American Bearing Manufacturers Association (ABMA),<sup>5</sup>  
 British Standards Institution (BSI),  
 Industrial Fasteners Institute (IFI),  
 Institution of Mechanical Engineers (I.Mech.E.),  
 International Bureau of Weights and Measures (BIPM),  
 International Standards Organization (ISO),  
 National Institute for Standards and Technology (NIST),<sup>6</sup>  
 Society of Automotive Engineers (SAE).

## 1-7 Ekonomická hlediska

Nákladové úvahy hrají v návrhovém rozhodovacím procesu natolik důležitou roli, že docela dobře můžeme věnovat stejnou dobu jejich studiu jako studiu předmětu návrhu. Zde uvedeme pouze několik obecných přístupů a jednoduchých zásad.

Především poznamenejme, že v problematice nákladů nemá nic absolutní platnost. Materiálové a mzdové náklady obvykle rok od roku rostou. Očekávali bychom však, že náklady na materiál budou mít klesající trend v důsledku automatizace a robotizace. Výrobní náklady na jeden výrobek kolísají město od města a podnik od podniku v důsledku rozdílných a nezbytných režijních nákladů, mzdových nákladů, daní a dopravného.

### Normalizované rozměry

Používání normalizovaných nebo skladových rozměrů je prvním pravidlem pro snižování nákladů. Konstruktor, který předepíše za tepla válcovanou tyč čtvercového průřezu velikosti 53 mm z oceli S235J2, zvýšil náklady na výrobek za předpokladu, že tyče o velikostech 50 a 60 mm, které jsou doporučených rozměrů, budou sloužit stejně

<sup>5</sup> V roce 1993 se Anti-Friction Bearing Manufacturers Association (ABMA) přejmenovala na American Bearing Manufacturers Association (ABMA).

<sup>6</sup> Dřívější National Bureau of Standards (NBS).

dobře. Rozměr 53 mm může být získán na speciální objednávku anebo válcováním nebo opracováním tyče s rozměrem 60 mm; oba tyto postupy však zvýší výrobní náklady. Aby mohl konstruktér předepisovat normalizované nebo doporučené rozměry, musí mít přístup k seznamu skladových zásob používaných materiálů. Ty je možno získat přímo od dodavatelů.

Další upozornění se týká výběru doporučených rozměrů součástí a polotovarů. Ačkoliv je v katalogích obvykle uvedeno značné množství rozměrů, nejsou ve skutečnosti všechny snadno dostupné. Některé rozměry jsou používány zřídka, a nejsou proto skladovány. Zvláštní objednávka takových rozměrů může být finančně nákladnější a způsobit pozdržení celkové dodávky.

Konstruktor předepisuje řadu částí, jako jsou motory, čerpadla, ložiska a spojovací součásti, které je nutno nakupovat. Rovněž v takových případech byste měli předepisovat části, které jsou snadno dostupné. Části vyráběné a dodávané ve velkých množstvích jsou též obvykle o něco levnější. Tak např. cena valivých ložisek závisí více na vyráběném množství ložisek než na jejich rozměrech.

### Velké tolerance

Z faktorů ovlivňujících náklady jsou pravděpodobně nejvýznamnější tolerance. Tolerance ovlivňují v mnoha směrech vyrobiteľnost konečného výrobku; malé tolerance mohou vyžadovat dodatečné výrobní operace nebo dokonce učinit výrobu součástí neekonomickou. Tolerance pokrývají kolísání rozměrů a rozsah drsnosti povrchu a též kolísání mechanických vlastností způsobených tepelným zpracováním a ostatními výrobními operacemi.

Části s velkými tolerancemi mohou být často vyrobeny na strojích s vyšší produktivitou a méně kvalifikovanými pracovníky, jejichž mzdové náklady jsou nižší. Také méně takovýchto částí bude vyraženo v procesu kontroly výroby a obvykle je lze snadněji sestavovat.

### Práh rentability

Při porovnání dvou nebo více konstrukčních návrhů z hlediska výrobních nákladů jsou důležité také faktory, jako jsou počet výrobků, rychlost montážní linky anebo některé jiné okolnosti. Za jistých podmínek mohou být výrobní náklady dvou konstrukčních provedení stejné. Tehdy dochází k situaci, která se nazývá prahem rentability.

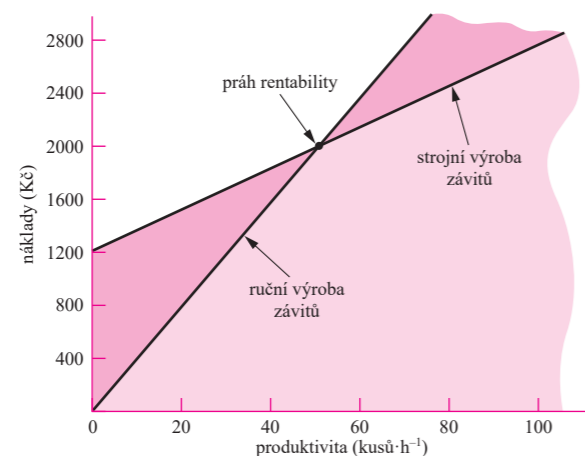
Uvažujme příklad, kdy závit na jisté součásti může být vyráběn s produktivitou 25 kusů za hodinu strojně na automatu nebo 10 kusů za hodinu ručně. Předpokládejme rovněž, že doba na seřízení automatu je tři hodiny a mzdové náklady jsou u každé z těchto výrobních technologií 400 Kč za hodinu včetně režie. Na obr. 1-4 jsou znázorněny náklady v závislosti na produktivitě obou metod. Průsečík obou přímek odpovídá produktivitě 50 kusů. Jestliže je navrhována výroba více než 50 součástí, je rentabilnější použít automat.

### Odhady nákladů

Při vzájemném porovnání dvou nebo více návrhů lze získat potřebnou představu o nákladech mnoha způsoby. Kritériem přitom mohou být různé veličiny. Tak například můžeme vzájemně porovnat dva automobily na základě nákladů v korunách na jeden kilogram jejich hmotnosti. Jiný způsob porovnání nákladů pro dva různé návrhy je založen na počtu jejich součástí: návrh mající menší počet součástí bude mít pravděpodobně nižší výrobní náklady. Může být použita ještě celá řada dalších hledisek, jako jsou plocha, objem, výkon, krouticí moment, kapacita, rychlost a různé výkonové ukazatele.

## Obr. 1-4

Práh rentability.



## 1-8 Bezpečnost a zákonná odpovědnost za škody

V České republice a v řadě dalších zemí je uplatňováno pojetí přísné zákonné odpovědnosti za škody způsobené vadami výrobků, které vychází ze směrnice 85/374/EEC „Product Liability Directive“. Česká republika převzala legislativu Evropské unie v oblasti odpovědnosti za škody způsobené vadou výrobku zákonem č. 59/1998 Sb. (Tento zákon byl později nahrazen zákonem č. 209/2000 Sb. a v současnosti zákonem č. 89/2012 Sb.) Tato odpovědnost je založena na následujících dvou principech: 1. za škodu odpovídá přímo výrobce, 2. výrobce má objektivní odpovědnost za škodu způsobenou vadou jeho výrobku, to znamená, že nerozhoduje, zda škodu zavinil či nikoliv. Poškozená osoba prokazuje pouze vadu výrobku, v jejímž důsledku vznikla škoda, vzniklou škodu a příčinnou souvislost mezi vadou výrobku a způsobenou škodou. Výrobce se může odpovědnosti zprostit jen tehdy, prokáže-li existenci některé z taxativně stanovených zprošťovacích skutečností.

Jednou z choulostivých situací, se kterou se můžete setkat v inženýrské praxi, je rozhodování o dalším postupu u technického řešení, které je podle vašeho názoru špatné. Samozřejmě jestliže je to možné, budete se snažit dané řešení opravit nebo provedete vhodné zkoušky pro ověření, že vaše obavy jsou neopodstatněné. Jestliže žádná z těchto možností není uskutečnitelná, může váš další postup spočívat v tom, že do návrhového spisu založíte patřičný záznam a jeho kopii si uschováte pro případ, že by se originál „ztratil“. Tento postup vás sice může na jednu stranu ochránit, na druhou stranu však může vést k tomu, že budete opomenuti při povyšování do vyšších funkcí nebo že budete dokonce propuštěni. Nakonec jestliže jste přesvědčeni, že se jedná o špatné technické řešení a nemůžete se s tím smířit, měli byste změnit místo svého zaměstnání.

Nejlepší cestou vedoucí ke splnění požadavků zákonné odpovědnosti za škody je dobrý inženýrský přístup jak při analýze, tak i navrhování, kontrola jakosti a komplexní zkušební postupy. Reklamní pracovníci často barvitě vychvalují výrobky v propagačních materiálech. Tyto údaje je třeba pečlivě technicky posoudit, aby byly odhaleny přehnané sliby, a připojit přiměřená upozornění a návody k použití.

Několik knih<sup>7</sup> vám v tom může pomoci a můžete v nich později čas od času hledat potřebná poučení.

## 1-9 Přiměřenost posouzení

Přiměřenost posouzení byla definována v podkap. 1-2 společně s dalšími pojmy užitečnými při navrhování ve strojírenství. Přiměřené posouzení představuje takový vhodný a důležitý způsob myšlení, který bývá také označován jako primární dovednost, tedy prvořadá schopnost konstruktéra. Přiměřené posouzení začíná v případě počátečního návrhu udáním souboru technických podmínek, v případě konečného návrhu pak jeho úplným popisem (výkresy sestavení, detailní výkresy) a kusovníkem.

Stojí-li konstruktér nad svým konečným návrhem (po provedení všech rozhodnutí), měl by posoudit, zda návrh respektuje v požadované míře všechna daná omezení a zda splňuje či dokonce překračuje původní očekávání. Měl by rovněž posoudit, zda návrh vykazuje optimální vlastnosti anebo zda se jim alespoň přibližuje. Přiměřené posouzení je tedy soudem o tom, zda byla zohledněna omezení a zda bylo dosaženo optimálního návrhu.

<sup>7</sup>KAMM, L. J., *Successful Engineering: A Guide to Achieving Your Career Goals*, McGraw-Hill, New York, 1989; *Real World Engineering: A Guide to Achieving Career Success*, IEEE Press, New York, 1991; *Understanding Electro-Mechanical Engineering: An Introduction to Mechatronics*, IEEE Press, New York, 1995; *Designing Cost-Efficient Mechanisms*, Society of Automotive Engineers, Warrentown, Pa., 1993.

V průběhu přiměřeného posuzování jsou shromažďované informace použity k rozhodování o tom, zda bylo dostatečně přihlédnuto k daným omezením a věnována patřičná pozornost otázkám optimalizace. Příslušná posouzení se přitom mohou od sebe v jednotlivých případech lišit použitými teoretickými a empirickými kroky a způsoby výpočtového modelování. Cílem probíhajících myšlenkových pochodů je rozhodnout, zda existující návrh nebo jeho části jsou funkční, bezpečné, spolehlivé atd. Pro získání zběhlosti v posuzování je vhodné začít jednotlivými jednoduchými částmi posudku a postupně přecházet k analýze stále náročnějších situací.

V podkapitole 1-3 bylo uvedeno 26 návrhových činitelů – všem by měla být při tomto posuzování věnována náležitá pozornost. Tak například v souvislosti s bodem 2, pevnost / napjatost, jsou vhodné následující otázky:

- Jakou pevnostní charakteristiku materiálu použít (pevnost v tahu, smluvní mez kluzu, mez únavy, mez pevnosti při tečení atp.)?
- Jaké napětí použít (tahové, smykové, hlavní, redukované atp.)?
- Která z dvojic napětí / příslušná pevnostní charakteristika vypovídá nejvíce o funkční způsobilosti a které místo nebo která místa jsou kritická?
- Jak přesně známe napjatost a pevnostní charakteristiku materiálu?
- Jak velký rozdíl mezi napětím a použitou pevnostní charakteristikou materiálu je „dostatečný“?

Podobně bychom se měli zaměřit na zbývající položky souboru návrhových činitelů.

Má-li být přiměřené posouzení též účelné, musí kvantitativně zhodnotit odpovědi na položené otázky, a to včetně výpočtového modelování. Stejně jako je tomu u jakékoliv intelektuální schopnosti, i k vysoké míře odbornosti dospějete postupně: začnete jednoduchými příklady a budete pokračovat procvičováním problémů na aplikacích až po náročné problémy vyžadující specifická posouzení. Neustále byste měli rozvíjet svoje znalosti, odhad, dovednost a důslednost.

Přiměřené posouzení čerpá z dílčích analýz, jimž jste se věnovali v rámci předchozího studia řady odborných předmětů. Podle sledovaného cíle si z nich pak vyberete to potřebné. Podobně je tomu i s výukou předmětu, pro který je určena tato kniha. Vychází z řady vědních oborů, s nimiž jste již v průběhu svého studia získali jisté zkušenosti. Začíná s řešením jednodušších problémů, kdy je snadné určit, co je důležité, a navrhnout přiměřené posouzení. Při procházení knihy budete postupně získávat další zkušenosti. Bylo by proto vhodné, abyste se vraceli k předchozím úlohám a ověřili si, zda byste je řešili stejným způsobem. Váš učitel přitom zodpoví vaše dotazy, vysvětlí řadu detailů a napomůže tak růstu vaší konstruktérské dovednosti. Radte se s ním, jak využívat této dovednosti při řešení případů rozpracovaných v této knize nebo úkolů předepsaných učebními plány předmětu.

## 1-10 Nejistoty

Při navrhování ve strojírenství se setkáte s řadou nejistot. Tak např. nejistoty týkající se napětí a pevnostních charakteristik materiálu zahrnují:

- složení materiálu a vliv jeho změny na vlastnosti,
- rozdílnost vlastností v různých místech polotovaru,
- vliv výrobního procesu na vlastnosti v daném místě a v jeho okolí,

- vliv sousedních montážních skupin, jako např. svarků a lisování za tepla, na napjatost,
- vliv tepelně-mechanického zpracování na vlastnosti,
- intenzitu a rozložení zatížení,
- platnost použitých výpočtových modelů,
- intenzitu koncentrací napětí,
- vliv času na pevnost a geometrii,
- vliv koroze,
- vliv opotřebení,
- neúplnost seznamu zdrojů nejistot.

Nejistoty v uvedených veličinách a vlastnostech vždy znamenají jejich změnu, proměnlivost, neurčitost. Tuto skutečnost musí konstruktéři respektovat při svém navrhování. Především se to týká materiálových vlastností, proměnlivosti zatížení a platnosti výpočtových modelů. Určením nejistot se zabývají normy TNI 4109-1, -3 a -3.1 (014109).

Pro zahrnutí vlivu nejistot při navrhování byly vypracovány různé přístupy; základními jsou deterministický a pravděpodobnostní přístup. Deterministický přístup zavádí návrhový součinitel založený na nejistotě parametru vyjadřujícího ztrátu funkce (kterým může být např. zatížení způsobující poruchu) a nejistotě dovoleného parametru (kterým může být maximální dovolené zatížení). Návrhový součinitel  $k_n$  je definován jako

$$k_n = \frac{\text{parametr vyjadřující ztrátu funkce}}{\text{maximální dovolený parametr}} \quad (1-1)$$

Jestliže je parametrem zatížení, potom maximální dovolené zatížení může být určeno ze vztahu

$$\text{maximální dovolené zatížení} = \frac{\text{zatížení při ztrátě funkce}}{k_n} \quad (1-2)$$

### PŘÍKLAD 1-1

Uvažte, že maximální zatížení působící na konstrukci je známo s nejistotou  $\pm 20\%$  a zatížení vyvolávající její porušení je známo s nejistotou  $\pm 15\%$ . Jestliže jmenovitá hodnota zatížení způsobující poruchu je 10 kN, určete návrhový součinitel a maximální dovolené zatížení, které vykompenzují uvedené nejistoty.

Abychom zahrnuli nejistotu zatížení při porušení, musíme jeho jmenovitou hodnotu zvýšit v poměru 1/0,85. Maximální dovolené zatížení pak musíme snížit v poměru 1/1,2. Potom návrhový součinitel kompenzující dané nejistoty je

$$k_n = \frac{1/0,85}{1/1,2} \approx 1,4.$$

Z rovnice (1-2) lze určit maximální dovolené zatížení

$$\text{maximální dovolené zatížení} = \frac{10\,000}{1,4} \approx 7\,000 \text{ N}.$$

Pravděpodobnostní metody různých úrovní jsou založeny na statistických vlastnostech parametrů a zaměřují se na určení pravděpodobnosti výskytu kladné hodnoty funkce poruchy<sup>8</sup> (tedy na určení spolehlivosti). Kapitola 19 obsahuje podklady pro použití statistiky při navrhování.

## 1-11 Napětí a jeho mezní hodnoty

Spolehlivé používání výrobků závisí na tom, jak konstruktér zaručí, aby v jejich kritických místech bylo maximální napětí menší, než je jeho mezní hodnota. Tato nerovnost musí být splněna s dostatečnou rezervou, aby byly pokryty všechny zdroje nejistot příslušných veličin; za těchto podmínek pak může dojít k porušení pouze ve výjimečných případech.

Pod shora uvedenou mezní hodnotou rozumíme „mezní hodnotu napětí pro danou geometrii a podmínky užití“. Dosažením mezních hodnot je charakterizováno dosažení různých mezních stavů. Příslušná kritéria (související se schopností výrobku plnit předepsanou funkci z technických, ekonomických, ekologických a jiných závažných důvodů) a mezní hodnoty musí být stanoveny v technických podmínkách, které jsou dány normami, předpisy, směrniciemi nebo vzájemným ujednáním. Jako mezní hodnoty budou v této knize nejčastěji používány smluvní mez kluzu pro 0,2% zbytkové deformace, mez pevnosti v tahu a mez únavy při lomu.

Odolnost proti porušení je vlastnost materiálu nebo strojní součásti. Závisí na druhu, zpracování a výrobní technologii materiálu. Uvažujme například zásilku pružin. Jak je to s únosností určité pružiny? Jestliže je pružina zamontována do stroje, působením vnějšího zatížení v ní vznikají napětí, jejichž velikost závisí na rozměrech pružiny a která jsou nezávislá na materiálu a způsobu výroby. Po demontáži nepoškozené pružiny ze stroje v ní napětí od vnějšího zatížení klesnou na nulu. Avšak únosnost zůstává jako jeden z ukazatelů vlastností pružiny. Pamatujme tedy, že únosnost charakterizuje jednu z inherentních vlastností součásti, „vlastností vložených do součástí“ v důsledku jistého materiálu a způsobu výroby.

Rozmanité způsoby mechanického a tepelného zpracování kovů, jako jsou kování, válcování a tváření za studena, mají za následek rozdílné mechanické vlastnosti v jednotlivých místech součásti. Například uvedená pružina bude mít s největší pravděpodobností pevnost na vnějším průměru vinutí odlišnou od pevnosti na vnitřním průměru, neboť pružina byla vinuta za studena a na uvedených dvou průměrech nemohla být stejně deformována. Pamatujme rovněž, že hodnota pevnosti stanovená pro součást se vztahuje pouze k jistému místu nebo k řadě míst součásti.

V této knize budeme užívat  $R_e$  pro označení meze kluzu v tahu,  $R_m$  pro označení meze pevnosti v tahu,  $R_{ec}$  pro označení meze kluzu v tlaku a  $R_{mc}$  pro označení meze pevnosti v tlaku.

V souladu s přijatými zvyklostmi použijeme písmen řecké abecedy  $\sigma$  a  $\tau$  pro označení normálového a smykového napětí. Různé indexy budou označovat některé zvláštní charakteristiky. Tak např.  $\sigma_1$  je hlavní napětí,  $\sigma_y$  je napětí ve směru osy  $y$  a  $\sigma_r$  je napětí v radiálním směru.

Napětí je jednou z nejdůležitějších stavových veličin charakterizujících stav tělesa; je funkcí jeho zatížení, geometrie, teploty a způsobu výroby. V základech pružnosti a pevnosti je při výkladu závislosti napětí na zatížení a geometrii kladen důraz na otázky teplotních napětí. Avšak napětí vyvolaná tepelným zpracováním, tvářením, montáží atd. jsou též důležitá a někdy bývají opomenuta.

<sup>8</sup> V jednodušším případě – při použití teorie interference – je tato funkce poruchy rovna rozdílové rezervě spolehlivosti. Podrobněji o tom později v 19. kap. (Pozn. překl.)

Stanovení napětí a pevnosti je jednou ze základních úloh při návrhu bezpečné, ekonomické a dobře fungující konstrukce. Podrobněji se této otázce věnuje 3. kap. této knihy.

Podle ČSN EN 1990 Eurokód: *Zásady navrhování konstrukcí* má charakteristická hodnota vlastnosti materiálu nebo výrobku danou pravděpodobnost, že nebude splněna v hypoteticky neomezeném souboru zkoušek. Tato hodnota obecně odpovídá určitému kvantilu předpokládaného pravděpodobnostního rozdělení sledované vlastnosti materiálu nebo výrobku. Dolní charakteristická hodnota vlastnosti materiálu je obvykle definována jako její 5% kvantil. Tato hodnota tedy nebude splněna s pravděpodobností 5 % v hypoteticky neomezeném souboru zkoušek. Pojmy „minimální mez kluzu“ nebo „minimální mez pevnosti“ materiálové normy nezavádějí. Neodborné použití slova *minimální* může být tedy matoucí.

## 1-12 Návrhový součinitel a součinitel bezpečnosti

Při navrhování ve strojírenství je postaven konstruktér před následující možné situace:

- Výrobek je vyráběn ve velkých množstvích, je vysoce hodnotný nebo je nebezpečný, jsou opodstatněné zkoušky materiálů, součástí a prototypů v provozu.
- Výrobek je vyráběn v dostatečném množství, aby byl opodstatněný nenáročný program materiálových zkoušek, třeba co možná nejmenší počet zkoušek pevnosti v tahu.
- Výrobek je vyráběn v tak malých množstvích, že nejsou prováděny vůbec žádné materiálové zkoušky.

Poslední dva případy jsou problematičtější. Jde též o otázku vadné výroby: proč k ní dochází, a jaká nápravná opatření je proto třeba uskutečnit?

Obecný přístup k otázce stanovení vztahu mezi dovoleným zatížením a zatížením při ztrátě funkce představuje deterministická metoda návrhového součinitele, která je klasickou metodou navrhování.

Její základem je rovnice (1-2)

$$\text{maximální dovolené zatížení} = \frac{\text{zatížení při ztrátě funkce}}{k_n},$$

kde  $k_n$  je návrhový součinitel.<sup>9</sup> Pro dané zatížení při ztrátě funkce je při zdvojnásobení návrhového součinitele příslušné dovolené zatížení poloviční. Tento vztah je používán bez ohledu na to, zda je splněna podmínka lineární závislosti napětí na zatížení. V metodě návrhového součinitele je pak v části věnované posouzení návrhu určen *součinitel bezpečnosti* navržené části. Součinitel bezpečnosti je dán jako poměr parametru vyjadřujícího ztrátu funkce k parametru vyjadřujícímu nejnepříznivější provozní podmínky. Od návrhového součinitele se ještě navíc liší v důsledku zaokrouhlení (obvykle směrem nahoru) způsobeného použitím normalizovaných rozměrů a běžně vyráběných součástí.

Při posuzování součinitele bezpečnosti části je třeba uvažovat všechny mezní stavy, které se u ní mohou vyskytnout. Tak např. zub ozubeného kola se může porušit v důsledku únavy za ohybu nebo kontaktní únavy. Potom má zub jistý součinitel bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu únavy v ohybu a jiný součinitel bezpečnosti

<sup>9</sup> Viz LAPEDES, D. W., *Dictionary of Scientific and Technical Terms*, McGraw-Hill, New York, 1978 pod heslem *factor of safety* (součinitel bezpečnosti).

vzhledem k meznímu stavu kontaktní únavy. Jsou-li např. hodnoty těchto součinitelů 1,5 a 1,3, pak dojde k porušení kontaktní únavou dříve než k porušení únavou za ohybu.

Když Hooke objevil pružné chování kovové pružiny, pojem napětí ještě nebyl znám. Do pochopení jeho hlubšího významu ještě zbývalo 162 let. Vymezení pojmu napětí vytváří možnost vyjádření návrhového součinitele prostřednictvím napětí. S vynálezem zkušebních strojů<sup>10</sup> umožňujících vyvodit různé způsoby porušení může být návrhový součinitel vyjádřen prostřednictvím napětí a odpovídajících pevností ve tvaru

$$k_n = \frac{R \text{ (ztráta funkce)}}{\sigma \text{ (dovolené)}} = \frac{\text{pevnost}}{\text{napětí}}. \quad (1-3)$$

Pro kontaktní problémy,<sup>11</sup> kde nejsou napětí lineárně závislá na zatížení, se uvedený výraz změni na tvar

$$k_n = \left( \frac{\text{pevnost}}{\text{napětí}} \right)^3 \text{ pro kontakt dvou koulí,} \quad (1-4)$$

$$k_n = \left( \frac{\text{pevnost}}{\text{napětí}} \right)^2 \text{ pro kontakt dvou válců,} \quad (1-5)$$

kde je zohledněna nelineární závislost mezi napětím a zatížením. V rovnicích (1-3) až (1-5) se pevností rozumí minimální smluvní mez kluzu, pevnost v tahu, ve smyku nebo v únavě, případně i jiné veličiny. Je samozřejmé, že druh a jednotky napětí musí odpovídat druhu a jednotkám pevnosti. Napětí a pevnost musí být rovněž vztahovány k jednomu místu.

Návrhový součinitel podle rovnice (1-3) pak zahrnuje všechny tyto zdroje nejistot, tedy nejistoty pevnosti a nejistoty zatížení.

## 1-13 Spolehlivost

V dnešní době je pro konstruktéra a výrobce velmi důležitá znalost spolehlivosti jejich výrobku. Základním vstupním údajem, potřebným při *pravděpodobnostních metodách* navrhování, jsou statistické zákonitosti rozložení napětí a rozložení pevností v nebezpečných místech součástí.

Jedním z ukazatelů bezporuchovosti výrobku je pravděpodobnost bezporuchového provozu (podrobněji je o tom pojednáno v 19. kap. této knihy). Při zjednodušeném (a nepřesném) vyjadřování bývá bezporuchovost chápána jako synonymum spolehlivosti (tak to bylo uvažováno v teorii spolehlivosti v šedesátých letech minulého století). V tomto smyslu se potom pravděpodobnost, že strojní součást neselže při svém používání, nazývá *spolehlivost* této součásti. Spolehlivost  $R$  je vyjádřena číslem v intervalu

$$0 \leq R < 1. \quad (1-6)$$

Spolehlivost  $R = 0,90$  znamená 90% pravděpodobnost bezporuchového provozu. Porucha šesti součástí z každého tisíce vyrobených částí může být považována pro jistou třídu výrobků za přijatelnou poruchovost. To představuje spolehlivost

<sup>10</sup> Přispěli k tomu Musschenbroek (1729), Perronet (1768) a dále Gauthey, Rondelet, Girard a Williams. První, kdo použil hydraulický lis a vyvážené vahadlo, byl Lagerhjelm v r. 1827. Význačným charakteristickým rysem je řízení způsobu porušení v průběhu měření, zavedení teorie pevnosti materiálů ověřené zkouškami a použití Cauchyho definice pojmu napjatosti v tělese (1822).

<sup>11</sup> Viz podkapitola 3-19.