

DK 621.71:531.4

Izračun obremenitev pri strojnih napravah

BRANKO KOZINA

Metode za trdnostne preračune in preizkušanje materialov so se v zadnjih desetletjih zelo izpopolnile. Njihovo popolnost pa lahko izkoristimo pri dimenzioniranju strojnih naprav samo v primeru, če so tudi obremenitve določene s podobno natančnostjo. Tu pa je treba ugotoviti, da izrazitih metod ali sistematičnega izračunavanja obremenitev doslej še ni. Obremenitve jemljemo kot nekaj danega, kot nekaj, kar se ne računa.

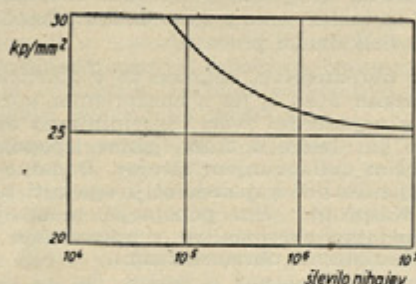
Medtem ko teorija o obremenitvah razpravlja prav malo, si praksa pomaga s cenitvami. Velikosti strojev določajo po imenskih močeh ali imenskih vrtilnih momentih. Te obremenitve imamo za enakomerne kljub temu, da iz izkušnje vemo, da so obremenitve kdaj pa kdaj tudi večje oziroma se močno spreminjajo. Za elektromotorje se zdi n. pr., da je pojem obremenitve določen in vezan na njihovo karakteristiko, pri večini delovnih strojev pa največkrat niti nimamo karakteristike. Stroje kratko in malo razvrščamo v tri skupine: v stroje z enakomerno, s srednje sunkovito in z zelo sunkovito obremenitvijo, kar je zelo preprosto, saj ni nikjer določen niti pojem sunkovitosti niti njene velikosti. Le v redkih primerih — in še tam z negotovostjo — je navedeno, kolikokratno vrednost imenske obremenitve utegnejo dosežati sunki pri obratovanju. Teorija kaže in praksa potrjuje, da tudi veliki faktorji za ocenitev največjih obremenitev ne zagotavljajo nemotene obratovanja.

V še večjo nepreglednost nas zavaja slepo združevanje faktorjev za ocenitev obremenitve s faktorji varnosti. Take navidezno zelo velike varnosti (n. pr. 20-kratne) niso kritje za nepopolnosti pri določanju obremenitev, če sloni račun samo na statičnih obremenitvah in ostajajo neugotovljene dinamične obremenitve ter možnosti za porušitev zaradi utrujanja materiala. Ta kritika velja tudi za uvedene računске metode in celo za predpise, ki sicer podpirajo uporabo računanja po statičnih obremenitvah z omejevanjem maksimalnih hitrosti.

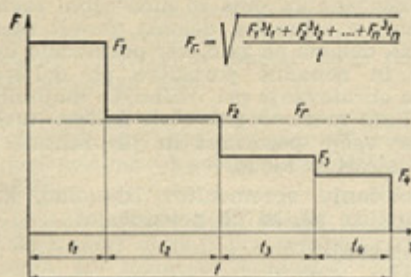
Nepopolnosti konvencionalnega ocenjevanja obremenitev se jasno pokažejo tudi pri poskusih dobrega izkoriščanja utripnih trdnosti materialov. Če so znane spremenljive obremenitve, lahko računamo življenjsko dobo in napetosti po Wöhlerjevih krivuljah (slika 1) in po ekvivalentnih obremenitvah (slika 2). Objavljeni so posamezni preizkušeni predlogi za izračun utripne trdnosti pri gredeh, vijakih, grednih vezeh, vzmeteh ipd., ki izhajajo iz časovno spreminjajoče se obremenitve, vtem ko ne navajajo načina, kako se da določati časovno spreminjanje obremenitve. Pri teh računih si s cenitvami imenskih sil ali momentov in faktorjev sunkovitosti ne moremo prav nič pomagati.

Različne izvore obremenitev si lahko smotrno uredimo takole:

1. **Zunanje sile** ali momenti motorja in delovnega stroja. V glavnem jih lahko istovetimo z delovnimi ali koristnimi silami. Značilne vrste so:
 - 1.1 bremena v gravitacijskem polju,
 - 1.2 tlačne sile plinov ali kapljevin,
 - 1.3 elektromagnetne sile,
 - 1.4 odpori elastičnih deformacij,
 - 1.5 odpori drsnega, kotalnega in notranjega trenja pri nepopolno elastičnih deformacijah,
 - 1.6 obremenitve zaradi trka z zunanjimi masami.



Sl. 1. Primer Wöhlerjeve krivulje za utripno trdnost jekla Č.0500



Sl. 2. Primer diagrama za trajanje različnih obremenitev $F_1, F_2, F_3, \dots$ v ciklusu spremenljive obremenitve. F_r = računska ekvivalentna obremenitev za kotalne ležaje

2. **Masne sile** ali vztrajnostne sile delov motorja ali delovnega stroja. Navadno to niso koristne obremenitve in jih uvrščamo v skupino nezaželenih dodatnih obremenitev. Take sile so:
 - 2.1 lastna teža delov,
 - 2.2 centrifugalne sile delov rotorja,
 - 2.3 vztrajnostne sile pri spremembah hitrosti,
 - 2.4 obremenitve pri trku posameznih delov naprave.
3. **Sile pri nihanjih**, izvirajoče iz periodičnega zaporedja posameznih impulzov. Ti impulzi so lahko ali spremenljive zunanje sile ali spremenljive masne sile. Obremenitve pri nihanjih po navadi tudi niso koristne sile in jih zato štejemo k dodatnim silam. Važne pa so:
 - 3.1 obremenitve pri obratovanju v resonanci,
 - 3.2 obremenitve pri prehodu skozi resonanco,
 - 3.3 obremenitve pri obratovanju zunaj resonance.
4. **Notranje sile** v posameznih strojnih delih, ki povzročajo notranje napetosti. Izvirajo iz:
 - 4.1 toplotnih sprememb ali razlik,
 - 4.2 strukturnih sprememb ali razlik.
5. **Korozija in erozija** tudi povzročata spremembe obremenitev, čeprav le posredno:
 - 5.1 s spremembami nosilnih prereзов,
 - 5.2 s spremembami drsnih površin.

Delovne obremenitve zajema prva točka, čeprav ne popolnoma natančno, ker je težko ločiti koristne obremenitve od potrebnih. V glavnem je za delovne obremenitve značilno, da jih ugotavljamo v okviru tehnološkega postopka ali fizikalnega procesa, pri katerem je delovni stroj sam le izvedba mehanizacije. Spreminjajo se lahko samo s spremembo tehnološkega postopka ali fizikalnega procesa.

Dodatne obremenitve, kakršne so v glavnem razvrščene v točkah 2 do 5, pa z opravljenim koristnim delom niso v neposredni zvezi. Spreminjamo oziroma zmanjšujemo jih lahko s funkcijskim izpopolnjevanjem in boljšim oblikovanjem strojev. Dodatne obremenitve torej niso niti kaj nedoločljivega niti kaj neizogibnega. Nasprotno: čim popolnejši je stroj, tem manjše so dodatne obremenitve v sorazmerju z delovnimi ali koristnimi obremenitvami.

V nakazani razvrstitvi je opaziti še drugo značilnost oziroma razliko: delovne obremenitve so pretežno enakomerne. V strojništvu veljajo nasploh za boljše tisti stroji, ki imajo enakomerno delovno obremenitev, doseženo s kontinuirnimi postopki, ki prevladujejo čedalje bolj. Dodatne obremenitve pa so pretežno spremenljive oziroma so med njimi ravno spremenljive bolj v ospredju, deloma zaradi razmeroma večje jakosti, deloma pa zato, ker povzročajo utrujanje materialov in nenadne porušitve po daljšem času nemotenega obratovanja pri »računsko majhnih« obremenitvah. Zato moramo posvečati določanju dodatnih obremenitev večjo pozornost in jih skušati ugotavljati ter uvrščati v račun.

Pri določanju obremenitev izhajamo, kakor je znano, iz analize sil, ki jih povzročajo:

1. obratovanje,
2. zagon in ustavljanje,
3. izdelava, transport in montaža,
4. nepravilno upravljanje stroja, nenadna razbremenitev ali zaustavitev stroja in druge posebnosti.

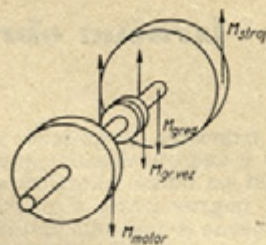
Konvencionalna predstava, da so obremenitve posameznih delov strojne naprave dane z zunanjimi silami, tako da je n. pr. pri rotorjih (slika 3) $M_{stroj} = M_{motor} = M_{gredi} = M_{gr. vezi}$ velja samo pri enakomernem obratovanju. Samo pri tem oziroma samo v stanju ravnotežja veljajo predstave statičnega, enakomernega toka obremenitve.

Ob vsaki spremenljivi obremenitvi pa je tak tok sil neenakomeren, saj se del zunanjih sil na posameznih masah očituje v pospeševanju in so torej med masami naprave na različnih prehodnih mestih tudi različne obremenitve.

V zgoraj omenjeni analizi sil moramo zajeti celotno napravo, zaokroženo v funkcijsko celoto. Motor ali turbina, generator, gredna vez, reduktor, temeljna plošča in temelj skupaj so primer take celote. Šele vozilo z bremenom in cestiščem je celota, ki omogoča določitev glavne obremenitve za dele vozila. Celota naj ne zajema samo strojne naprave, temveč tudi naravno okolje, kakor zemljišča, ljudi, veter, sneg, vodo itd., v katerem bo naprava delovala. Šele taka analiza obremenitev bo stvarna in ne bodo ostali pogoji za uporabo strojev nekaj nedoločljivega.

Današnja razvojna stopnja mehanike daje dovolj možnosti, da lahko tudi dodatne obremenitve izračunavamo s podobno natančnostjo, kakršno dosegajo sodobni trdnostni računi. Zagotoviti si moramo samo prehod od ukoreninjenega poenostavljenega statičnega obravnavanja togih konstrukcij na izračun **dinamičnih** obremenitev v stvarno **prožnih** konstrukcijah. Ko obravnavamo prožne konstrukcije, moramo ločiti

1. posamezne **mase** sistema, to so predeli delov, deli ali sklopi, ki so kompaktni, praktično tog,



Sl. 3. Le pri enakomernih obremenitvah je $M_{stroj} = M_{motor} = M_{gredi} = M_{gredne\ vezi}$

2. vmesne **prožne vezi**, to so predeli delov, deli ali sklopi, ki so sorazmerno prožni; njihove v primerjavi z glavnimi masami sistema razmeroma zelo majhne lastne mase lahko zanemarimo,
3. vmesne **torne** površinske kontakte ali prožne dele z notranjim trenjem,
4. vmesne **ohlapne** oblikovne kontakte ali zveze, ki z odmikom kontaktnih površin lahko prenos obremenitev prekinjajo, čeprav navadno le zelo kratkotrajno.

Kakor smo že poudarili, popolnoma togih konstrukcij v praksi skoraj nimamo in zato niti ne izvedb. kjer bi imeli opravka samo s sestavnimi deli 1. skupine. Tudi konstrukcij, ki bi imele samo sestavne dele prvih dveh skupin, skoraj ni. To bi bili sistemi prožno vezanih mas, dveh ali več. Pri takih sistemih povzročajo spremenljive obremenitve nihanja. Sestavni deli tretje skupine so dušilni elementi pri teh nihanjih. Večina prožnih konstrukcij je sestavljena iz prvih treh skupin in izpostavljena dušenim nihanjem, kakor jih mehanika obravnava za nekatere osnovne sisteme in primere zunanjih sil.

V četrti skupini zajeti vmesni ohlapni oblikovni kontakti ali zveze, ki ob spremembi smeri obremenitve lahko njen prenos prekinjajo, povzročajo dodatne sunkovite obremenitve s trkom. Primer ozobja je značilen za to skupino. Ozobje gonilnega zobnika mora biti ohlapno vloženo v škrbinah gnanega ozobja, da se ohrani možnost toplotnih dilatacij. Pri spremembi smeri vrtilnega momenta se zato kontakti nosilnih bokov razmaknejo. Med razmaknitvijo so rotorji agregata razdeljeni v dva samostojna masna sistema, od katerih je eden pod vplivom gonilnega momenta motorja, drugi pa zaviralnega momenta delovnega stroja. Sprememba kotnih hitrosti obeh sistemov povzroča trk ob zopetni vzpostavitvi kontakta in s tem znane sunkovite dodatne obremenitve ter zvočne efekte z ropotom.

Z urejenimi predstavami o razdelitvi mas in njihovi povezavi v prožni konstrukciji lahko ločimo tudi tokove spremenljivih obremenitev oziroma obremenitve posameznih delov na konstrukciji. Pri vsakem delu sestavljajo obremenitve:

- a) zunanje sile, ki imajo prijemališče na opazovanem delu, kolikor se ne odvajajo na sosednje dele,
- b) sile, ki se na opazovani del prenašajo od sosednjih delov,
- c) sile, ki jih opazovani del prevaja med sosednjimi deli.

Tako združene sile dajejo osnovo za ugotovitev obremenitev posameznih delov na predelih ali sklopih konstrukcije in s tem osnovo za zadovoljivo natančnost dimenzioniranja.

Postopek dimenzioniranja in trdnostni računi terjajo še eno kategorizacijo. Razlikovati moramo in ugotoviti:

1. največjo posamezno obremenitev, ki bi utegnila povzročiti porušitev nove konstrukcije zaradi preobremenitve,
2. statično in superponirano dinamično obremenitev med obratovanjem, ki bi utegnili privedi do porušitve zaradi utrujanja materiala, pri spremenljivih obremenitvah pa še diagram o trajanju raznih obremenitev v enem ciklusu in računske ekvivalentne obremenitve,
3. obremenitve, ki povzročajo trenje in gretje ter bi utegnile preprečevati uporabljivost konstrukcije zaradi obrabe ali gretja.

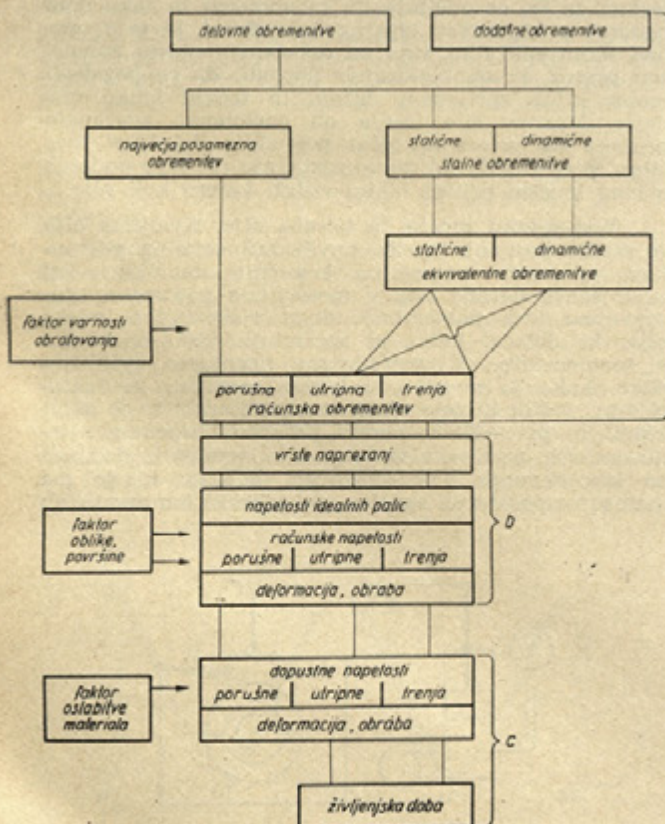
Šele na teh treh kategorijah obremenitev lahko zgradimo potrebne tri trdnostne račune za določitev porušne ter utripne trdnosti in življenjske dobe posameznega strojnega dela.

Z ureditvijo določanja obremenitev se lahko izpopolni tudi postopek dimenzioniranja. Slika 5 kaže shemo predloga, ki jasno razmejuje tri stopnje:

- a) določanje obremenitev,
- b) določanje računskih napetosti in deformacij,
- c) izbiro materiala in ugotovitev dopustnih napetosti ter deformacij, ki morajo biti seveda enake ali nekoliko večje od računskih pod b), ter življenjske dobe.

Tudi **faktor varnosti** konstrukcije je v predlogu po sliki 5 razčlenjen smotno. V označenih treh stopnjah smo uvrstili:

- a) faktor varnosti pri obratovanju,
- b) faktorja oblike in površine,
- c) faktor oslavitve materiala.



Sl. 5. Shema dimenzioniranja

Literatura navaja pogosto za vsak primer uporabe in izračuna posebne faktorje varnosti, ki združujejo povrhnj faktorja varnosti tudi različne ugotovljene ali marsikdaj niti ne omenjene druge faktorje, recimo faktor kvalitete zakova, koncentracije napetosti itd. Take združitve so nepregledne in zamudne ter povečujejo nevarnosti za napake. Naravno škodljivo pa je, zajemati v faktorju zanesljivosti konstrukcije **faktorje nezanesljivosti** pri določanju obremenitev, obravnavanju trdnostnih računov zapletenih oblik in obvladovanju tehnoloških postopkov.

Faktor varnosti pri obratovanju naj po predlogu vsebuje le še premišljeno povečanje nosilnosti ali življenjske dobe z namenom preprečevanja nevšečnosti, ki bi nastajale ob okvarah. Ta faktor naj bo tem večji, čim nevšečnejše so posledice okvare, n. pr. izgube življenja, škoda zaradi prekinitve celotne proizvodne verige, povečan izmeček ali samo cena za izmenjavo dela. Faktor varnosti pri obratovanju pa naj seveda ne nadomešča varnostnih ali zaščitnih naprav.

Faktorja oblike in površine naj uvrstita razliko med napetostmi v palici s konstantnim prerezom in gladko površino, kakršno predpostavlja trdnostni račun, in med stvarnimi koncentracijami napetosti ob prehodnih prerezih in temeni zarez na natrganih površinah strojnega dela.

Faktor oslavitve materiala pa naj slednjič še uvrsti vpliv tehnološkega postopka ali temperature in razlike med nosilnostjo poskusnega polizdelka ter dela konstrukcije.

V vertikalni smeri kaže shema na sliki 5 trojno delitev. Že v prvi stopnji pri določanju obremenitev potrebujemo tri računske vrednosti: porušno obremenitev, ki je navadno največja posamezna obremenitev, utripno obremenitev ter obremenitev trenja, ki sta po navadi enaki obratovanju pri stalni obremenitvi. Ves trdnostni izračun opravimo trikrat ali pa za vsak del konstrukcije pregledamo, ali niso potrebne vse tri smeri izračuna.

Ureditev izračuna strojnih naprav in delo ter smiselna izpopolnitev postopkov pri dimenzioniranju prinašajo za prakso dve prednosti:

1. natančnejše dimenzioniranje in rentabilnejšo izdelavo uvedenih konstrukcij,
2. izpopolnitev in razvoj novih konstrukcij, pri katerih prožni in zaščitni elementi lokalizirajo spremenljive obremenitve, da ne obremenjujejo občutljivih delov konstrukcij.

Razvoj tehnoloških metod, raziskav materialov in trdnostnih izračunov je viden. Med osnovami je ostal edino zanemarjen izračun obremenitev, ki je še zmerom takšen, kakršen je bil v časih parnega batnega stroja, ko še niso poznali konstrukcijskih jekel niti utripne trdnosti niti ne koncentracij napetosti, marveč so si pomagali s podobnimi faktorji varnosti, kakršne smo do zdaj obdržali samo še za ocenitve obremenitev.

Proizvodnja se sicer oslanja na meritve na prototipih. Vrednotenje meritev pa ne more biti popolno, dokler niso razčiščeni osnovni pojmi in niso meritve pravilno usmerjene. Prav iz držav s sodobno razvito tehniko merjenja prihajajo povsem dognane ugotovitve o nepopolnosti dosedanjih računskih metod. Naši proizvodnji tudi še manjka naslonitev na obširnejše meritve, zaradi česar nam povzroča nepopolnost izračunov temvečjo škodo. Prikazana ureditev in uvrstitev izračunov za obremenitve je razmeroma enostavna.

Avtor: dr. ing. Branko Kozina, Inštitut za elektroniko, Ljubljana