

UNIVERZITET U NIŠU

Mašinski fakultet

Saša S. Randelović

Mladomir O. Milutinović

PRIMENJENE TEHNOLOGIJE PLASTIČNOSTI



Niš, Novi Sad, 2024.

U N I V E R Z I T E T U N I Š U

M a š i n s k i f a k u l t e t

Saša S. Randelović

Mladomir O. Milutinović

PRIMENJENE TEHNOLOGIJE PLASTIČNOSTI

Niš, Novi Sad, 2024.

PRIMENJENE TEHNOLOGIJE PLASTIČNOSTI

Autori :

dr Saša S. Randelović, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu

dr Mladomir O. Milutinović, redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu

Recenzenti :

dr Mihajlo Popović, vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Beogradu

dr Tomaž Pepelnjak, vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Ljubljani

Izdavač :

Mašinski fakultet u Nišu

Lektor :

Sonja Kostić

Tiraž : 200 primeraka

Štampa : Grafika GALEB, Niš

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

621.7:669(075.8)

РАНЂЕЛОВИЋ, Саша, 1966-

Primenjene tehnologije plastičnosti / Saša S. Randelović, Mladomir O. Milutinović.

- Niš : Mašinski fakultet, 2024 (Niš : Galeb). - 334 str. : ilustr. ; 25 cm

Na vrhu nasl. str.: Univerzitet u Nišu. - Na nasl. str. pored mesta izdavanja i: Novi Sad.

- Slike autora. - Tiraž 200. - Beleška o autorima: str. [336]. - Bibliografija: str. 327-334.

ISBN 978-86-6055-182-7

1. Милутиновић, Младомир, 1967- [autor]

а) Метали -- Обрада деформисањем

COBISS.SR-ID 157311753

Preštampavanje ili umnožavanje nije dozvoljeno.

PREDGOVOR

Primenjene tehnologije plastičnosti, ili jednostavnije i šire obrada metala plastičnom deformacijom, kroz čitavu ljudsku istoriju predstavlja pokretačku snagu društvenih zajednica koje su dominirale na svetskoj pozornici. Samo na početku tog evolucionog puta čovek je pronalazio i uzimao metale direktno od prirode da bi ih sa vrlo malo dorade prilagođavao sebi kako bi opstao u surovim uslovima. Ali to prilagođavanje je vremenom postalo nužno i neophodno jer je čovek kroz njihovo prilagođavanje upravo dokazivao svoju moć nad drugima u svom okruženju, ali i prirodom. Sa bogatim iskustvom i sve većim znanjem, zasnovano na prirodnim fundamentalnim i primenjenim naukama, metali i ostali industrijski materijali su pružali sve veće tehnološke mogućnosti.

Za pokretanje i osvajanje takvih tehnologija danas do izražaja dolaze sistemski rad, naučni pristup i suštinsko poznavanje ključnih parametara. Malo je reći da slučajnih uspeha nema, jer nekada velike zemlje (imperije) stekle su svoj primat upravo na ovakvim tehnologijama, bazirajući ga na razvoju pre svega vojne industrije, teške mašingradnje, alatnih mašina, automobilske i avio industrije itd. A u tim mračnim i surovim vremenima, kojima ljudska istorija obiluje, kada čovek čoveku pokazuje svoje primitivno lice (na bilo kom nivou društvene lestvice), on sva svoja iskustva, znanja i komparativne tehnološke prednosti pokreće protiv drugog čoveka, koga je proglasio neprijateljem.

To veliki i bogati rade u časovima razonode, sa osmehom, u rukavicama, za bogatom trpezom, u tajnim i ovalnim salonima, a mali i sirotinja, u direktnoj, bezpoštednoj borbi, gde se ljudska narav ogleda u surovosti, instiktu za preživljavanje vraćajući nas u bližu i dalju istoriju čovečanstva. I dok se prvi i ne sretnu, možda i ne upoznaju, drugi su takav tehnološki napredak plaćali životom jer veliki nakon rata grade nad tim žrtvama novo i "lepše" doba. Kakva ironija. Evidentno je da spirala uspeha postoji i da je čovek kroz istoriju dokazao da ide napred u bolje sutra, ali dela, artefakti i dostupni podaci govore da je on to radio na vrlo surov i bestijalan način.

Za sve to ljudska ruka i noga mu je bila nedovoljna, on je morao da uzme "štap", ali to mu je bilo malo pa je počeo da "nosi i pravi štapove" gde je do punog izražaja došla i ljudska pamet. I dok ljudska noga i ruka, danas evidentno pokazuju gotovo svoje krajnje fizičke domete (sportski rezultati), dotle malena siva masa, ljudski um, "privilegovana i dobro zaštićena", neprekidno smišlja nove i nove prednosti koje život čine lepšim, sadržajnijim, ali i vrlo, vrlo ružnim, neprimereno današnjim ali i budućim vremenima. Slučajno ili namerno, čovek pored dobrih civilizacijskih poteza pravi i pogešne korake, koji nakon dužeg ili kraćeg vremena moraju da pretrpe manje ili veće korekcije pre svega u pogledu humanosti i prilagođavanju osnovnim ljudskim potrebama.

Da ne bude da čitaoca samo uvodimo u opasne ratne igre i uvek aktuelnu vojnu industriju, svakako treba pomenuti i druge industrijske grane koje velike prednosti i pronalaskе tehnologija plastičnog deformisanja primenjuju vrlo brzo za dobrobit čovečanstva. Tu su pre svega moćna auto industrija, avio industrija, industrija železničkih vozila i infrastrukture, građevinarstvo, industrija pakovanja i ambalaže i sl.

Ključna uloga tehnologija može da se prati kroz istorijske periode, koje su prema stepenu njihovog razvoja i tehnološkim dostignućima obeležili čitave ljudske epohe i društvena dešavanja (od kamenog, bakarnog, bronzanog pa do gvođenog doba).

I uvek kada je čovek pomislio da je najmoćniji i da je došao do vrha, da nema više gde, on je nalazio nove mogućnosti i metode za prilagođavanje i obradu metala jer je to bio veliki izazov, prilika za veliku finansijsku dobit i konačnu ukupnu pobeđu.

Upravo poslednja dva i početak dvadeset prvog veka predstavljaju takav iskorak u ovom pogledu, gde i ako smo pomislili da sve znamo, tržište ipak traži nešto novo, superiorno i nešto jedinstveno. Bilo da se radi o kvalitetu, izdržljivosti, bilo novom vrhunskom dizajnu ili uštedi materijala i energije, koja je nikada više aktuelna, inženjeri tehnologija plastičnosti su opet tu da reše problem.

Ali za razliku od već davnih vremena, problemi i zadaci su se uvećali toliko da sada nema pojedinačnog nego timskog rada koji evidentno daje bolje rezultate. Tim inženjera ima veliku potporu sistematizovanog znanja i iskustva kroz bogatu literaturu, savremene softverske pakete pa čak i sve prisutnije veštačke inteligencije koja već sada prepoznaje i generiše nova i bolja industrijska rešenja u ovoj oblasti.

Ovako slikovit i nadahnut osvrt kroz tehnološku istoriju samo je predgovor čitaocu u dublje poznavanje i bolje ovladavanje upravo primenjenim tehnologijama plastičnosti koje dokazano predstavljaju čovekovo otelotvorenje, nekada, sada ali i u bližoj i daljoj budućnosti.

Sadržaj ovog udžbenika se u velikoj meri zasniva na višegodišnjim predavanjima autora u oblasti plastičnog deformisanja.

Autori izražavaju zahvalnost recenzentima Prof. Dr Mihajlu Popoviću i Prof. Dr Tomažu Pepelnjaku za uloženi trud i savetima koji su doprineli podizanju kvaliteta ovog udžbenika.

Niš, Novi Sad, jun 2024. god.

Autori

S A D R Ź A J

PREDGOVOR	3
SADRŽAJ.....	5
1. UVOD	11
2. PRIMENA TEORIJE NAPONA I DEFORMACIJA	15
2.1. Mehaničke karakteristike metala pri plastičnoj deformaciji	16
2.2. Tvrdća metala pri plastičnoj deformaciji.....	17
2.3. Zrnasta mikrostruktura metala pri plastičnoj deformaciji	18
2.3.1. Teorija dislokacija kristalne građe metala.....	19
2.3.2. Ojačavanje pomoću čvrstih rastopa	20
2.3.3. Ojačavanje precipitatima i tvrdim česticama	21
2.3.4. Uticaj veličine kristala	23
P 2.1 Hal Peč aproksimacija.....	24
2.3.5. Tekstura deformacije i njena geometrijska interpretacija	27
2.3.6. Funkcionalna raspodela orijentacija	32
P 2.2 Relativne i logaritamske deformacije, glavni naponi kod izvlačenja	35
P 2.3 Tenzor napona, komponente tenzora napona	37
2.4. Uslovi plastičnosti i ojačavanje metala	39
P 2.4 Glavni normalni naponi, maksimalni tangencijalni naponi, oktaedarski naponi, devijatorski i sferični deo tenzora napona	44
P 2.5 Glavni normalni naponi, maksimalni tangencijalni naponi, devijatorski i sferični deo tenzora napona.....	48
P 2.6 Koeficijent vida naponskog i deformacionog stanja.....	50
P 2.7 Intenzivnost napona, koeficijent vida naponskog i deformacionog stanja, modul plastičnosti.....	53
P 2.8 Provera uslova plastičnosti zida suda pod pritiskom	55
2.4.1. Ojačavanje metala pri plastičnoj deformaciji	57
P 2.9 Aproksimativna kriva ojačavanja trećeg reda	60
P 2.10 Aproksimativna kriva ojačavanja prvog reda.....	60
P 2.11 Ekvivalentne deformacije i kriva	

ojačavanja drugog reda	61
P 2.12 Aproksimativna kriva ojačavanja trećeg reda u temperaturnom opsegu.....	62
P 2.13 Aproksimativna kriva ojačavanja pri obradi na toplo	62
2.5. Jednačine kretanja materijalnog delića kontinuma.....	65
P 2.14 Komponente tenzora napona i jednačine kretanja	66
2.6. Primena teorije deformacija	67
P 2.15 Gradijent tenzora pomeranja, tenzor deformacija	71
P 2.16 Invarijante tenzora deformacija	74
P 2.17 Hidrostatički i devijatorski deo tenzora deformacije	77
2.7. Osnove FEM analize plastičnih deformacija kontinuma	79
P 2.18 Trajektorija materijalne čestice pri poznatoj brzini	82
P 2.19 Devijatorski deo tenzora napona, ekvivalentni napon.....	84
2.8. Inkrementalna deformacija i brzina deformacije	86
2.8.1. Inkrementalni tenzor lineranih deformacija	86
2.8.2. Tenzor brzina deformacije	89
2.8.3. Relacija između inkrementalnog tenzora linearnih deformacija i tenzora brzine deformacije	92
P 2.20 Komponente tenzora brzine deformacije	93
P 2.21 Ekvivalentne plastične deformacije	95
2.9. Deformabilnost.....	98
2.9.1 Dijagram granične deformabilnosti pri zapreminskoj deformaciji	102
2.9.2 Dijagram granične deformabilnost pri deformaciji lima	104
P 2.22 Vrednost pokazatelja naponskog stanja	109
2.10. Termička obrada i transformacije mikrostrukture čelika.....	116
3. PLASTIČNO DEFORMISANJE LIMA.....	129
3.1. Probijanje i prosecanje	129
P 3.1 Deformaciona sila, radni dijagram prese, dijagram procesa u koračnom alatu.....	132
P 3.2 Deformaciona sila i deformacioni rad probijanja i prosecanja u koračnom alatu, tehnološke korekcije alata	135
P 3.3 Deformaciona sila probijanja	140
P 3.4 Tehnologiju izrade dela sa radnim karakteristikama prese	145
P 3.5 Fino probijanje i prosecanje, deformaciona sila	148
3.2. Duboko izvlačenje	152
P 3.6 Duboko izvlačenje sa probijanjem i prosecanjem	156
P 3.7 Duboko izvlačenje u prvoj i drugoj tehnološkoj operaciji.....	160

P 3.8 Duboko izvlačenje u drugoj tehnološkoj operaciji	166
3.2.1. Duboko izvlačenje nepravilnih elemenata u auto industriji	168
3.2.2. Karakteristike materijala u auto industriji	171
P 3.9 Provera mehaničke absorpcione moći kutijastih profila	180
P 3.10 FEM simulacija procesa dubokog izvlačenja	183
3.3. Savijanje.....	191
P 3.11 Savijanje dvostrukog ugaonika i elastično ispravljanje.....	194
P 3.12 Dimenzije priprema i sila savijanja V profila	201
P 3.13 Višestruko savijanje u alatu V i U profila	204
P 3.14 Savijanje L profila sa držanjem.....	209
4. ZAPREMINSKO PLASTIČNO DEFORMISANJE	213
4.1. Sabijanje.....	214
P 4.1 Sabijanje cilindričnog dela u dve tehnološke operacije	216
P 4.2 Sabijanje prizmatičnog dela sa žarenjem	219
P 4.3 Sabijanje cilindričnog dela	221
P 4.4 Sabijanje cilindrične glave vijka.....	224
P 4.5 Sabijanje trake beskonačne dužine	227
P 4.6 FEM model sabijanja cilindra krutim alatom	232
P 4.7 FEM model sabijanja cilindra deformabilnim alatom	240
4.2. Kovanje	242
P 4.8 Kovanje složene glave vijka u zatvorenom alatu.....	252
P 4.9 Kovanje složene glave vijka u otvorenom alatu	255
P 4.10 Toplo kovanje osnosimetričnog oblika u alatu sa vencem.....	257
P 4.11 Toplo kovanje osnosimetričnog oblika i određivanje broja udara.....	260
P 4.12 FEM simulacija procesa toplog kovanja	268
4.3. Istiskivanje	272
P 4.13 Istosmerno istiskivanje, deformaciona sila i rad.....	273
P 4.14 Istosmerno istiskivanje šupljih elemenata	276
P 4.15 Suprotnosmerno istiskivanje	279
P 4.16 Kombinovano istiskivanje.....	282
4.4. Valjanje	284
P 4.17 Hladno valjanje lima	286
5. TEHNOLOGIJE PLASTIČNOG DEFORMISANJA I INDUSTRIJA 4.0.....	293
5.1. Industrija 4.0 u proizvodnim procesima	294
5.2. Metode ispitivanja materijala.....	302
5.2.1. Ispitivanje vrtložnim strujama	302

5.2.2. Ispitivanje magnetnim česticama	302
5.2.3. Ultrazvučni test	303
5.2.4. Provera debljine nanetog sloja	304
5.2.5. Lasersko ispitivanje.....	304
5.2.6. Industrijske kamere	305
5.2.7. Piezoelektrični senzori.....	306
5.2.8. Induktivni pretvarači	307
5.3. Duboko izvlačenje nesimetričnih elemenata	
u alatu sa senzorima	307
5.3.1. Kontrola procesa dubokog izvlačenja PID kontrolerom.....	311
5.3.2. Kontrola brzine deformisanja.....	317
5.3.3. Kontrola napona u zidu izvučenog elementa	317
5.3.4. Mašinsko učenje kao metod poboljšanja sistema sa povratnom spregom	318
6. LITERATURA	327
