temperatura vira odpadne toplote, tem večje so izgube eksergije pri sicer enakih ostalih pogojih.

Če upoštevamo eksergijski izkoristek [1]

$$\zeta = \frac{E_H}{E_T + E_D} \tag{19}$$

lahko enačbo (13) zapišemo tudi v naslednji obliki

$$\frac{E_{izg}}{Q_H} = \frac{T_H - T_{ok}}{T_H} \left(\frac{1}{\zeta} - 1\right) \tag{20}$$

Ta enačba pa je v celoti identična z enačbo (5), ki smo jo dobili pri termokompresiji z mehanskim kompresorjem. Ustrezen komentar smo podali že ob diagramu na sliki 2.

Vsi naravni procesi so nepovračljivi. Izgube eksergije pomenijo izgubljeno delo, ki bi ga sicer lahko pridobili, če bi znali procese voditi povračljivo. Pri termokompresiji pa je zaradi izgube eksergije potrebno vložiti več dela v proces. Zato seveda težimo za tem, da bi bile izgube eksergije čim manjše. V ta namen je koristno, če so razmerja toplot čim večja, če so temperature okolice čim nižje (o izboru temperature okolice glej [4]), če je temperatura vira odpadne toplote višja, če so grelne temperature nižje in pri ejektorskih napravah, če so temperature delovnega sredstva nižje. Te vplive bi morali pri projektiranju in obratovanju ustreznih naprav stalno upoštevati.

LITERATURA

[1] Oprešnik, M.: Exergetischer Wirkungsgrad einer Wärmepumpe bei Abwärmeverwertung. Brennst.-Wärme-Kraft 21 (1969), št. 5, 255—258.

[2] Oprešnik, M.: Wärmepumpen zur Nutzung von Abwärme. Maschinenmarkt, Würzburg 75 (1969), št. 81, 1786—87.

[3] Oprešnik, M., M. Lorbek: Einfluß einzelner Größen auf den exergetischen Wirkungsgrad bei der Thermokompression. Brennst.-Wärme-Kraft 22 (1970), št. 10, 481—483.

[4] Oprešnik, M.: Izbor temperature okoline kod kvalitativnog ocenjivanja toplotne pumpe. Tehnika XXV (1970), št. 4, 639—643.

Naslov avtorjev:

prof. dr. Miran Oprešnik, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani in

dipl. ing. Maja Lorbek, Zavod za hladilno tehniko pri LTH, Škofja Loka

UDK 621.9.01:669.131.7

# Obdelovalnost nodularne litine v primerjavi s sivo litino in jeklom

BORUT JUSTIN

## 1. Uvod

V zadnjem času se v naši državi začenja pospešeno uveljavljati nodularna litina kot konstrukcijski material za ulitke različnih industrijskih vej, predvsem v motorni, avtomobilski in vojni industriji ter za razne dele poljedelskih in gradbenih strojev ter reduktorjev. Nodularna litina je najmlajša v družini železnih litin, daje pa nasproti standardnemu asortimentu določene prednosti:

— je mnogo trdnejša in le malo dražja od sive litine oziroma

— je enako trdna kakor jeklena, pri tem pa precej cenejša in bolje livna.

Ker se po kemični sestavi skoraj ne loči od sive litine, so naprave za njeno pridobivanje enake kakor za sivo litino z malenkostnim dodatkom — napravo za noduliranje tik pred litjem. Z noduliranjem (navadno z Mg) je mogoče dosegati krogličasto izločanje grafita, kar je glavni in edini razlog za dobro trdnost in plastičnost nodularne litine v primerjavi s sivo.

Pionirsko delo pri uvajanju nodularne litine v proizvodnjo je pri nas opravila železarna Store. Približno pred 10 leti je prišla na trg prva nodularna litina iz tega podjetja. Zdaj ponuja ta železarna kompleten asortiment konstrukcijskih in nekaj posebnih vrst nodularnih litin.

Eno glavnih ekonomskih vprašanj pri uvajanju nodularne litine na trg pomeni obdelovalnost tega materiala. Na področju, kateremu je prvenstveno namenjen spekter konstrukcijskih nodularnih litin — to so v glavnem ulitki za zgoraj naštete industrijske veje — prihaja za dodelavo v poštev v glavnem samo obdelava z odrezavanjem in včasih brušenjem. Zategadelj je obdelovalnost z odrezavanjem včasih ključno vprašanje zlasti v primerjavi s konkurenčnimi materiali — sivo litino in jeklom. Namen tega dela je bil ugotoviti obdelovalnost različnih nodularnih litin, sive litine in jekla pri grobem struženju ter primerjati dobljene rezultate med seboj.

## 2. Eksperimentalna oprema, material in pogoji dela

### 2.1. *Eksperimentalna oprema.*

Preskusi so bili opravljeni na eksperimentalni stružnici ES I na Inštitutu za strojništvo. Stružnica je izdelek inštituta in ima niže navedene karakteristike.

Pogonski agregat Ward-Leonardo, 20 kW z brezstopenjsko regulacijo hitrosti vrtenja glavnega vretena 10 . . . 4500 vrt/min, 24 stopenj podajanja od 0,02 mm/vrt do 1,5 mm/vrt ter možnost za vpenjanje obdelovancev do dimenzij $\phi$ 500 × 1000 mm. Stružnica se po konstrukciji precej razlikuje od navadne, ker je namenjena zgolj za opravljanje preskusov.

Posebnost stružnice je tudi konjiček z vgrajenim dinamometrom. Prek njega je mogoče med delom ročno vzdrževati konstantno pritisno silo na obdelovanec. S tem se kompenzirajo napetosti zaradi termičnih dilatacij pri obdelavi, ki bi sicer lahko spreminjale napetostno stanje stroja.

Obodno hitrost merjenja smo spremljali s kolutnim tahometrom, čas pa z laboratorijsko stoparico.

Obrabo orodja na prosti ploskvi smo razbirali z orodjarskim mikroskopom Zeiss z 21-kratno povečavo. Za natančno nastavljanje orodij pod mikroskop imamo izdelano zibko, ki omogoča nagibanje v vseh treh smereh.

Kotanjasto obrabo smo otipavali z iglo s pomočjo doma izdelane naprave, katere signal smo z induktivno merilno dozo ojačili ter ga prek ojačevalnika (Hottinger & Baldwin) vodili na pisalni instrument (Hottinger & Baldwin), ki je risal ojačeni profil otipane površine.

### 2.2. *Orodje in njegova priprava.*

Izključno je bilo uporabljeno orodje s konico iz karbidnih trdin. Odločeno je bilo predvsem glede na izkušnje drugih avtorjev [1, 2, 3, 4, 5], da uporabimo za vse preskuse razen za jeklo karbidno trdino z ISO označbo M 10. Za preskušanje jekla je bila izbrana karbidna trdina P 20 — predvsem zaradi že določene dimenzije odrezka, ki je bila v vseh primerih enaka:

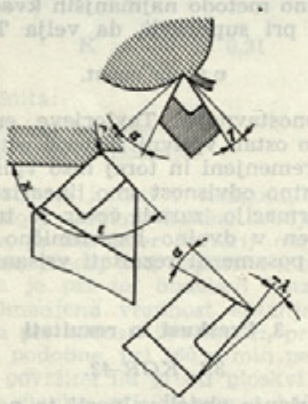
globina rezanja $a = 2$ mm
podajanje $s = 0{,}218$ mm/vrt

Uporabljena orodja so bila inozemskega izvora (TIZIT). Ploščice iz karbidnih trdin (ISO dimenzije A 16 in B 16) so bile lotane na držaje iz jekla Č 1730 z dimenzijami 25 × 25 mm.

Lotanje je bilo električno uporovno z elektrolitnim bakrom, in sicer hkratno zaradi enake kvalitete lotanja. Orodja so bila brušena v dveh fazah. Grobo brušenje je bilo opravljeno z brusom SiC (Swaty — Maribor, označba C80 K10/3V) ter hlajenjem s hladilno tekočino *brusogrin*. Fino brušenje je bilo opravljeno z diamantno brusno ploščo (F. Wendt D 70) brez hlajenja. Po finem brušenju je bil z diamantno brusno ploščo izbrušen tudi radij konice orodja. Grobo brušenje je bilo opravljeno s hitrostjo 11,7 m/s, fino pa z 19 m/s. Brušenje je bilo izvedeno strojno z natančno vnaprej nastavljeno geometrijo orodja in kontroliranim primikom brusa na stroju MSO.

Nebistveni del geometrije orodja smo določili pred preskusi (slika 1).

nastavni kot $\varkappa = 75°$
kot konice $\varepsilon = 90°$
radij konice $r = 0{,}5$ mm



Sl. 1. *Geometrija orodja*

Ostalo geometrijo smo določili šele po obsežni seriji uvodnih preskusov, ki je dala naslednje najugodnejše kote:

prosti kot $\alpha = 6°$
cepilni kot $\gamma = 6°$
nagibni kot $\lambda = 0°$

Orodja P-20 za obdelavo jekla so imela enako geometrijo s to razliko, da je bilo v cepilno ploskev zabrušeno lomilo odrezkov, ki je bilo globoko 0,4 mm in dolgo 1,5 mm.

### 2.3. *Preskušanci.*

Na izbiro smo imeli pet materialov za testiranje: tri vrste nodularnih litin, sivo litino in jeklo:

KGR 42 — KGR 50 — KGR 70 — SL 26 — Č 0645.

Oblika nodularnih preskušancev in onih iz sive litine je bila cilindrična s približnimi dimenzijami:

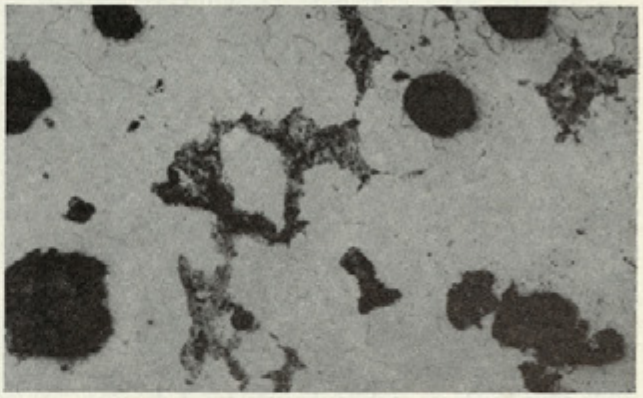
$D_{zunanji} = 180$ mm
$D_{notranji} = 80$ mm
$L = 400 \ldots 500$ mm

Jeklo smo imeli na razpolago v obliki valjev z dimenzijami

$D = 180$ mm
$L = 500$ mm

Karakteristke materialov so bile naslednje:

a) KGR 42 (slika 2)



Sl. 2. *KGR-42, povečava 100:1, nital*

natezna trdnost $\sigma_m = 42$ kp/mm²
meja plastičnosti $\sigma_y = 28$ kp/mm²
razteznost $\delta = 12$ %
trdota $HB = 138 \ldots 174$ kp/mm²

Srednja vrednost trdote (52 meritev) je znašala

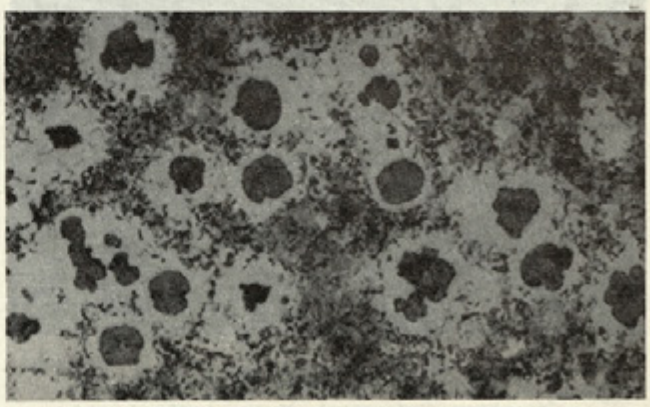
$HB = 166$ kp/mm².

Kemična analiza KGR 42 (v %):

C ... 3,4 ... 3,6
Si ... 2,4 ... 2,7
Mn ... 0,20 ... 0,28
P ... max 0,040
S ... max 0,010
Mg ... max 0,080

Pretežno feritna struktura vsebuje tudi nekaj perlita in različno velike nodule grafita (glej sliko 2).

b) KGR 50 (slika 3)



Sl. 3. *KGR-50, povečava 100:1, nital*

natezna trdnost $\sigma_m = 50$ kp/mm²
meja plastičnosti $\sigma_y = 35$ kp/mm²
razteznost $\delta = 7$ %
trdota $HB = 211 \ldots 229$ kp/mm²

Srednja vrednost trdote (8 meritev):

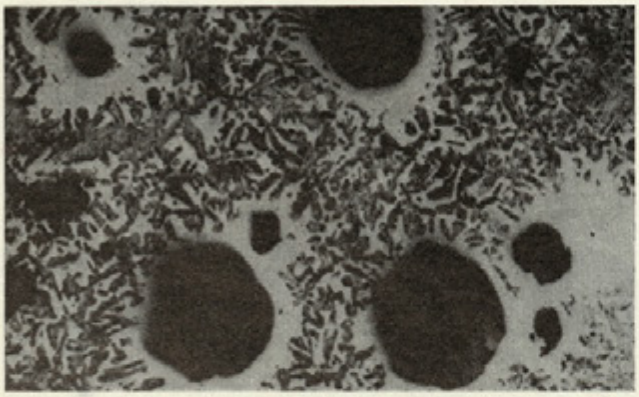
$HB = 222\ kp/mm^2$.

Kemična analiza KGR-50 je enaka kakor pri KGR-42, le odstotek mangana je večji

Mn ... 0,40 ... 0,60 %.

Struktura je feritno-perlitna, bolj finozrnata kakor pri KGR-42, grafitni noduli pa so manjši (slika 3).

c) KGR-70 (slika 4)



Sl. 4. *KGR-70, povečava 100:1, nital*

| | | |
|---|---|---|
| natezna trdnost | $\sigma_m$ = | 70 kp/mm² |
| meja plastičnosti | $\sigma_y$ = | 50 kp/mm² |
| razteznost | $\delta$ = | 2 % |
| trdota | $HB$ = | 219 ... 249 kp/mm² |

Srednja vrednost trdote (10 meritev)

$HB = 236\ kp/mm^2$

Tudi tu se kemična analiza razen pri manganu ujema s podatki KGR-42.

Mn ... 0,60 ... 0,80 %.

Struktura KGR-70 je pretežno perlitna. Okoli nodulov, ki so navadno nepravilne oblike, so ovoji ferita.

č) SL 26 (slika 5)

Sl. 5. *SL 26, povečava 100:1, nital*

| | | |
|---|---|---|
| natezna trdnost | $\sigma_m$ = | 26 kp/mm² |
| meja plastičnosti | $\sigma_y$ | — |
| razteznost | $\delta$ ≈ | 0 |
| trdota | $HB$ = | 159 ... 169 kp/mm² |

Srednja vrednost trdote (6 meritev)

$HB = 166\ kp/mm^2$.

Metalografski posnetek kaže pretežno perlitno strukturo z majhnimi vložki ferita ter dolgimi in tankimi lamelami.

d) Č 0645

| | | |
|---|---|---|
| natezna trdnost | $\sigma_m$ = | 60 ... 70 kp/mm² |
| meja plastičnosti | $\sigma_y$ = | 30 kp/mm² |
| razteznost | $\delta$ = | 17 % |
| trdota | $HB$ = | 160 ... 200 kp/mm² |

Zgornje vrednosti za jeklo so vzete iz standardov JUS. Pri preskušanem materialu smo kontrolirali le trdoto. Vrednosti so ležale v območju

$HB = 156 \ldots 178\ kp/mm^2$.

Srednja vrednost trdote (60 meritev) je znašala:

$HB = 167\ kp/mm^2$.

Za sivo litino in jeklo ni bila opravljena kemična analiza, ker sta materiala v skladu z JUS.

### 2.4. *Pogoji dela.*

Izbrani kriterij za obrabljenost orodja je bil 0,4 mm širok obrabni pas na prosti ploskvi. Pred začetkom uvodnih preskusov, s katerimi smo določili geometrijo orodja in obdelovalne hitrosti za glavni del preskusov, smo z nekaj posamičnimi testi okvirno določili primerne hitrosti struženja. Precej obsežni uvodni preskusi, katerih rezultati so objavljeni drugje [6], so dali že precej natančne vrednosti za izbiro primernih hitrosti za nadaljnje preskuse. Za vsak material smo izbrali po tri hitrosti, pri vsaki od teh pa opravili po več ponovitev, da smo dobili dovolj rezultatov, s katerimi smo s statistično metodo najmanjših kvadratov izračunali rezultate pri supoziciji, da velja Taylorjeva relacija:

$$v\, t^n = \text{const.}$$

Uporaba najenostavnejše Taylorjeve enačbe je bila mogoča, ker so ostali vplivni faktorji ostali med vsemi preskusi nespremenjeni in torej niso vplivali na rezultate. Eksponentno odvisnost smo linearizirali z logaritmično transformacijo, zaradi česar je tudi diagram z rezultati vnesen v dvojno logaritmično merilo $v - t$, v katerem so posamezni rezultati vrisani kot premice.

## 3. Preskusi in rezultati

### 3.1. *KGR-42.*

Za preskušanje obdelovalnosti te nodularne litine so bile določene naslednje hitrosti rezanja:

$v$ = 250, 320, 400 m/min

Med preskusi s temi hitrostmi je bilo opaziti precej trosenja med posameznimi valji, še večje razlike pa so se pojavljale med posameznimi šaržami [6]. Opaziti je bilo tudi majhno poroznost, ki je nastajala na raznih preskušancih na različnih mestih. Dosežena hitrost $v_{60}$ (dopustna hitrost obdelave s pogojem, da vzdrži orodje 60 minut rezanja) je v tem primeru 135 m/min.

### 3.2. *KGR-50.*

Hitrosti preskušanja so bile tokrat:

$v$ = 120, 170, 250 m/min.

Obdelovalnost KGR-50 je bila občutno slabša od KGR-42. Homogenost materiala je bila precej slaba; pojavljala so se pogostna trda mesta in poroznost. Zadnja je včasih segala do globine 20 mm od površine preskušanca. Registrirati je bilo mogoče vzdolžne pasove

z večjo trdoto v preskušancu. Te nepravilnosti so se kazale predvsem v mnogo manjši zanesljivosti rezultatov. Območje 95 % zanesljivosti (v članku zaradi stiske s prostorom ni podano!) je trikrat širše kakor pri KGR-42. Dosežena hitrost $v_{60}$ je 102 m/min.

### 3.3. *KGR-70.*

Izbrane preskusne hitrosti so bile:

$v$ = 80, 120, 170 m/min.

Preskusi so potekali brez motenj. Litina je bila homogena in neporozna razen manjših izjem. Kljub v splošnem slabši obdelovalnosti je pas 95 % zanesljivosti ožji kakor pri KGR-50. Hitrost $v_{60}$ znaša 68 m/min.

### 3.4. *SL 26.*

Hitrosti obdelave so bile

$v$ = 120, 170, 250 m/min.

Preskusi so pri sivi litini potekali normalno brez kakršnihkoli težav. Opaziti ni bilo ne poroznosti ne nehomogenosti. Dosegli smo $v_{60}$ = 87 m/min.

### 3.5. *Č 0645.*

Jeklo smo rezali s hitrostmi:

$v$ = 160, 200, 250 m/min.

Preskušanci so bili intaktni, homogeni in preskusi so potekali nemoteno.

Po pričakovanju se je v večji meri na orodjih pojavljala kotanjasta obraba, ki je dosegla največjo vrednost razmerja kotanje

$$K = \frac{KT}{KM} = 0{,}31$$

Pri tem pomenita:

$KT$ = globino kotanje
$KM$ = 1/2 dolžine kotanje.

To je vrednost, pri kateri v neugodnih razmerah že lahko računamo z zlomom konice orodja zaradi njene oslabitve. Ker je bil sicer kriterij obrabe na prosti ploskvi (0,4 mm) precej pod dopustno mejo, je na dlani ugotovitev, da je pri tej obdelavi kotanjasta obraba nevarnejša. Omenjena vrednost kotanjaste obrabe je bila izmerjena pri hitrosti 200 m/min, pri 250 m/min so bile vrednosti podobne, pri 160 m/min pa manjše.

Obrabna površina na prosti ploskvi orodja je bila pri 160 m/min gladka, pri 200 m/min bolj groba in pri 250 m/min zelo groba.

Pri obdelavi jekla smo dosegli $v_{60}$ = 108 m/min.

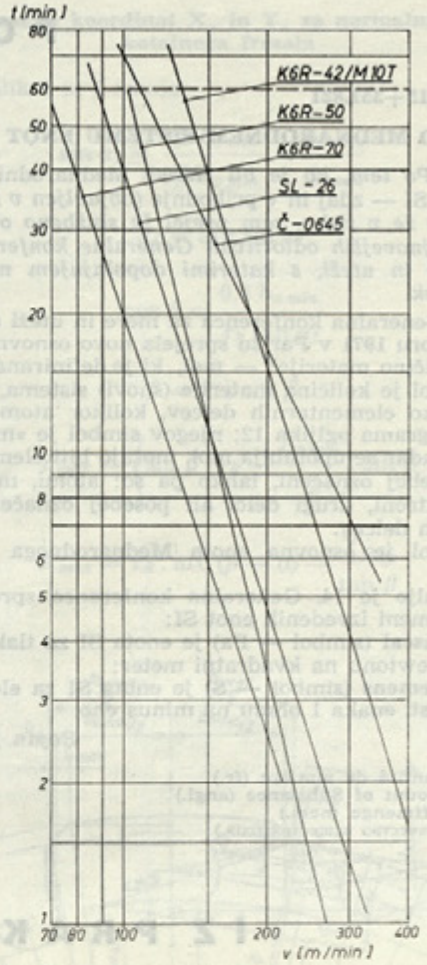
## 4. Sklep

Pregled rezultatov preskusov z vsemi petimi materiali na sliki 6 prikazuje naslednje ugotovitve.

1. Rezultati preskusov treh testiranih nodularnih litin so se razvrstili po pričakovanem vrstnem redu. Najmehkejša med njimi je najboljša in najtrša najslabša. Razlike v obstojnosti orodij so precejšnje (pri $v_{60}$ znašajo 4 : 3 : 2) in sestavljajo lahko v praksi zelo pomembno razliko v stroških obdelave.

2. Obdelovalnost SL 26 leži v delu diagrama, ki je za industrijo zanimiv (od 100 m/min navzdol) nekje med obdelovalnostjo KGR-50 in KGR-70, ki sta po karakteristikah mnogo boljša materiala. KGR-42 kot konkurenčen material — nekoliko boljši in dražji od SL 26 — izkazuje bistveno boljšo obdelovalnost (okr. 50 % večja obstojnost orodij).

3. Jeklo izkazuje za malenkost boljšo obdelovalnost od konkurenčne nodularne litine (KGR-50 — približno




Sl. 6. *Rezultati preskusov obdelovalnosti*

enaka meja plastičnosti). Regresijska premica je položnejša, kar ustreza pričakovanjem. Njen desni spodnji del namreč ni povsem realen, ker to področje omejuje kotanjasta obraba, katere regresijska premica je bolj strma.

4. Obdelovalna prednost jekla je glede na njegovo precej višjo ceno verjetno premajhna v primerjavi z litino.

## 5. Literatura

[1] K. Kämmer: Die spanabhebende Bearbeitung von Gußeisen mit Kugelgraphit; ZwF 1967, št. 1.

[2] K. Hitomi, G. L. Thuering: Machinability of Nodular Cast Irons Part III. Tool Life of Carbide and Ceramic Cutting Tools, Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, May 1964.

[3] G. Hug: Determining Tool Life on Nodular Cast Iron, The Tool Engineer, May 1958.

[4] Tizit: Werkstattberatung für die Zerspanungstechnik.

[5] SANDVIK — Coromant, prospekt in navodila za izbiro kvalitete orodja in rezalnih vrednosti.

[6] B. Justin: Obdelovalnost konstrukcijske nodularne litine, Strojniški vestnik, 1971, št. 1.

Avtorjev naslov:
mag. ing. Borut Justin,
Ljubljana, Zagrebška 15