

# Ojnice s perlitno mikrostrukturo za avtomobilski motor

UDK: 621.73.043:620.17

ASM/SLA: F22M, 2-61, Y26r, T21b

F. Vodopivec, S. Jurca, J. Žvokelj, F. Filipov  
in K. Kuzman

Vpliv temperature kovanja na velikost austenitnih zrn na različnih presekih utopno kovanih ojníc. Vpliv velikosti austenitnih zrn na mehanske lastnosti in prelom jekla z mikrostrukturo iz perlita in ferita, ki je bilo kontrolirano ohlajeno s temperature deformacije. Primerjava lastnosti, mikrostrukture in preloma ojníc s poboljšano mikrostrukturo in ojníc s perlitno mikrostrukturo.

## 1. UVOD

Ojnice se izdelujejo s kovanjem v utopih. Postopek obsega odrez paličastega jekla, ogrevanje sekancev, kovanje v utopih, ohladitev in toplotno obdelavo s kaljenjem in popuščanjem. Shematično je proces prikazan na sliki 1. Možnost večje racionalizacije postopka je odprava toplotne obdelave z uporabo takih pogojev za kovanje in ohlajanje izkovkov, da se doseže mikrostruktura, ki izkovkom zagotavlja potrebne uporabne lastnosti. Proces se torej spremeni v neke vrste termomehnično kovanje in nudi v fazi ohlajanja izkovkov dve možnosti: ena je kaljenje izkovkov neposredno s temperature kovanja z naknadnim popuščanjem, druga možnost pa je kontrolirano ohlajanje izkovkov, da bi dosegli mikrostrukturo, ki ne potrebuje nobenega popuščanja. Ta pot je najbolj zanimiva s stališča poenostavitve procesa in prihranka ener-

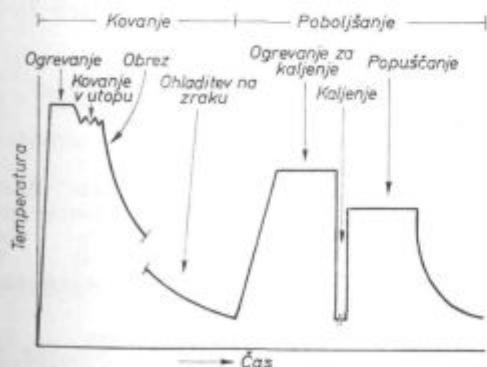
gije, zato smo se na pobudo vodstva kovaške industrije »Unior« Zreče lotili raziskav, kako bi bilo možno uresničiti. Pri delu smo dosegli obetajoče uspehe, ki so vzpodbuda za nadaljevanje dela. Postopek je namreč tak, da ga je potrebno v vseh fazah temeljito preveriti zaradi pomembnosti ojníc v sklopu avtomobilskega motorja, potrebno pa ga je preveriti tudi s stališča primernosti jekla.

Rezultati do sedaj izvršenega dela so zbrani v dveh poročilih Metalurškega inštituta v Ljubljani.<sup>1,2</sup> O nekaterih rezultatih pa smo že poročali.<sup>3</sup> V tem delu bomo povzeli najvažnejše ugotovitve, da bi predstavili v skrajšani obliki izvršeno delo in nakazali odprta vprašanja.

## 2. ZNAČILNOSTI KOVANJA JEKLA V UTOPIH

Pri utopnem kovanju se v nekaj udarcih izoblikuje končni izdelek iz surovca, ki ima najpogosteje valjasto obliko. Število udarcev je odvisno od oblike izkovka in deformacije, ki je potrebna, da bi se utop popolnoma napolnil in da bi dosegli polno obliko izkovka. Na preseku ojníc, ki je bila ohlajena s temperature kovanja s tako hitrostjo, da se dobro razločijo austenitna zrna (v nadaljevanju AZ), se vidi, da so ta zrna neenakomerna (sl. 2) in da so hitri prehodi med področji velikih in majhnih AZ (sl. 3). Kovanje v utopih poteka pri temperaturi, pri kateri standardna jekla rekristalizirajo med zaporednimi udarci kladiva ali stiskalnice. Stopnja deformacije ne vpliva pomembno na velikost rekristaliziranih zrn austenita (sl. 4). Zato lahko sklepamo, da je različnost AZ v izkovku posledica različnosti v načinu odprave deformacijske energije iz vroče preoblikovanega jekla. Kjer so v izkovku AZ majhna, se je izvršila statična rekristalizacija avstenita tudi po zadnjem udarcu; kjer pa so zrna velika, je deformacija povzročila le rast AZ, ne pa rekristalizacije.

Različnost v velikosti AZ je tem večja, čim večji je presek izkovka. Preizkusi kažejo, da so AZ v povprečju manjša na manjših presekih ojníc (sl. 5), da razlika med njimi raste s temperaturo kovanja, in sicer hitreje nad ca 1200 °C kot pod to temperaturo kovanja in da s temperaturo raste tudi povprečna velikost AZ. Če upoštevamo

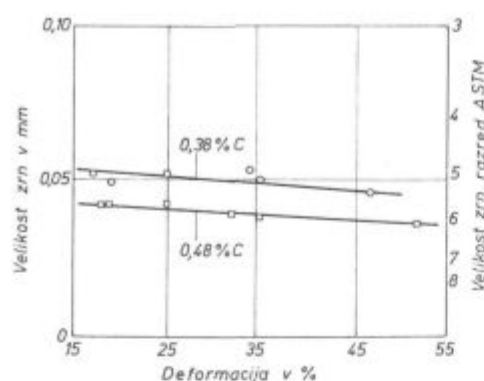


Slika 1

Shematičen prikaz izdelave lahkih izkovkov z utopnim kovanjem in toplotno obdelavo

Fig. 1

Schematic presentation of manufacturing light forgings with die casting, and their heat treatment

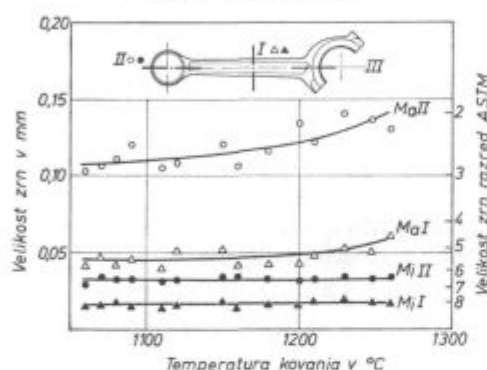


Slika 4

Vpliv stopnje deformacije pri 1150 °C na velikost zrn austenita, ki so nastala pri statični rekristalizaciji. Jekli A in B

Fig. 4

Influence of the degree of deformation at 1150 °C on the size of austenite grains formed during static recrystallization. Steels A and B



Slika 5

Vpliv temperature kovanja ojnica na velikost najmanjših (Mi) in največjih (Ma) austenitnih zrn na dveh presekih ojnica iz jekla B

Fig. 5

Influence of the forging temperature of shafts on the size of the smallest (Mi) and the biggest (Ma) austenite grains on two cross section of shafts made of steel B

uporabne temperature kovanja, lahko na osnovi slike 5 sklepamo, da je v kovanih ojnica pričakovati AZ, ki se razlikuje za ca 5 razredov po ASTM. To razliko bi se dalo zmanjšati s tako rekonstrukcijo utopov, ki bi v vsaki fazi kovanja zagotovila na vseh delih izkovka lokalno deformacijo najmanj 15 %, kar zagotavlja rekristalizacijo avstenita v drobna zrna, ali pa uporabiti jeklo, ki je manj nagnjeno k rasti avstenitnih zrn. Ta možnost se nam zdi tehnološko bolj obetajoča in lažje izvedljiva. Domnevali smo, da je pred posegi v sam proces kovanja in pred razvijanjem novega jekla potrebno preveriti, ali se da s tako neenakomernimi AZ v izkovkih in s kontroliranim ohlajanjem doseči mikrostrukturo, ki da jeklu uporabne lastnosti, ki ne zaostajajo za lastnostmi poboljšanih izkovkov. Tako imamo več možnosti za uspeh kot z ukrepi, s katerimi bi na račun hitrejše rasti manjših zrn avstenita dosegli bolj enakomerno mikrostrukturo jekla v izkovku. Ne da bi imeli za to mnenje empirične dokaze, menimo, da je bolj logično pričakovati boljše lastnosti od jekla, ki je

konglomerat drobnih in velikih AZ, kot od jekla, ki bi bilo konglomerat enakomernejših, vendar v povprečju večjih AZ.

Kot primerna stabilna mikrostruktura, ustvarjena s termomehničnim kovanjem, prihaja v poštev samo mikrostruktura iz lamelarne perlita z določeno količina ferita.

V nadaljevanju te razprave bomo to mikrostrukturo označili kot perlitno. Tako mikrostrukturo predvidevajo tudi norme nekaterih proizvajalcev avtomobilov, vendar v teh normah ni navedeno, da je to mikrostruktura, ki jo imajo lahko utopno kovani deli motorja. Ferit naj bo v perlitni mikrostrukturi tako izoblikovan, da bo ugodno vplival na lastnosti. V nobenem primeru nista zaželena igličasti predvajnitni ferit in bajnit.

Na osnovi te analize smo si v delu zastavili dva cilja:

a) dognati, kako vpliva velikost AZ na lastnosti jekla, ki je primerno za perlitne izkovke — ima torej po termomehničnem kovanju trdoto podobno trdoti poboljšane jekla,

b) skovati v primernih pogojih nekaj ojnica in na njih izvršiti preizkuse in preiskave, da bi ugotovili ali ima izkovke, v katerem ima jeklo različna AZ, lastnosti, ki se lahko ekstrapolirajo iz preizkusov pod a), in ali so lastnosti takih ojnica primerljive z lastnostmi poboljšanih ojnica.

Tabela 1

VELIKOST AVSTENITNIH ZRN  
V EKSPERIMENTALNIH OJNICAH.  
Razred ASTM

	Prezre ojnica					
	I		II		III	
	Mi	Ma	Mi	Ma	Mi	Ma
A 1	3	6	3	7	2	5
A 2	3	7	2	6	2	6
A 3	3	7	2	6	2	6

Mi — največja zrna

Ma — najmanjša zrna

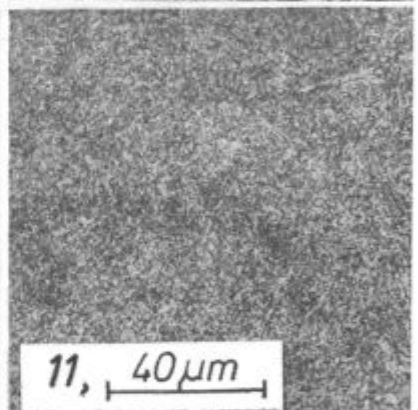
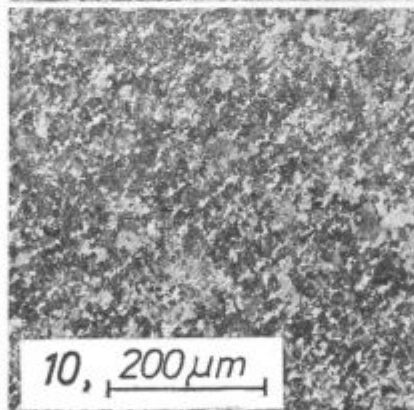
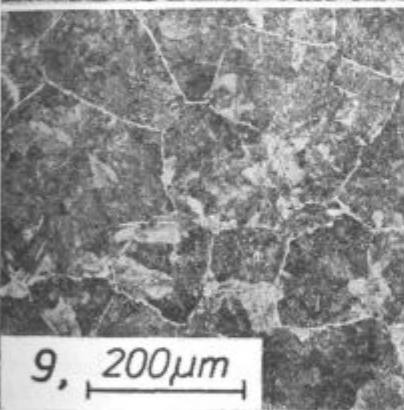
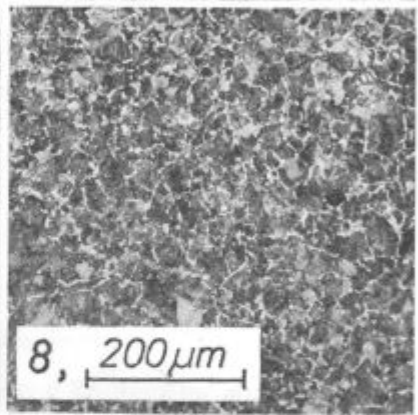
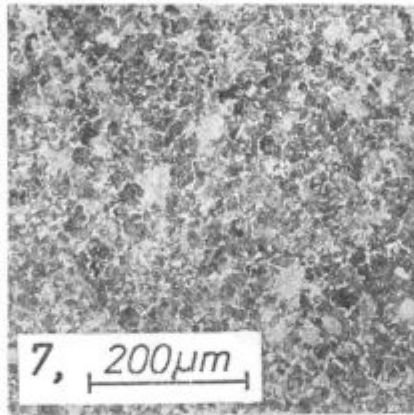
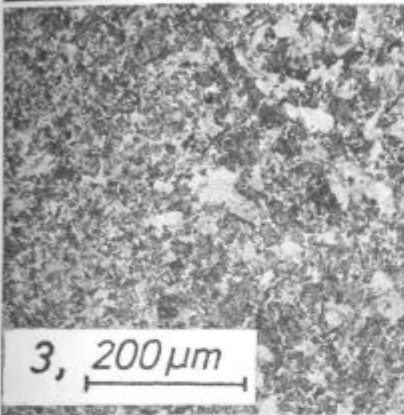
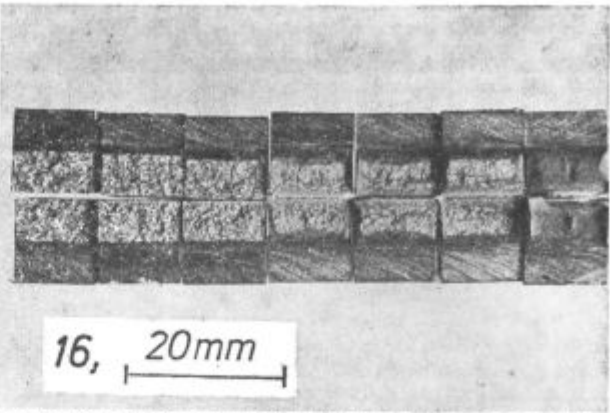
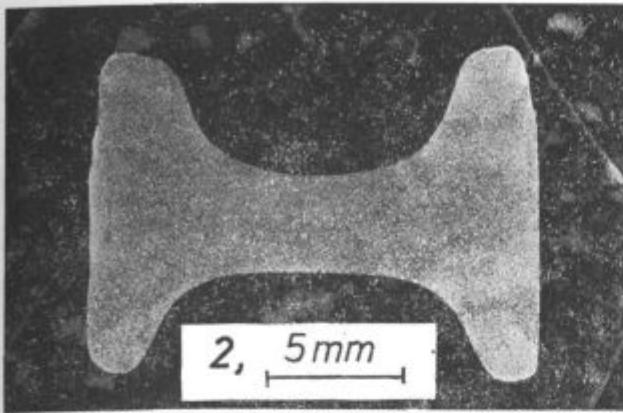
Pomen drugih oznak je enak kot v tabeli 2.

Tabela 2

LASTNOSTI EKSPERIMENTALNIH IN  
PRIMERJALNIH OJNIC

Ojnica	Trdota			Sila pri meji plast. (kN)	Raztržna sila (kN)	Raztezek stebra ojnica %
	I	II	III			
A 1	254	249	238			
A 2	259	240	240	51,0	83	7,4
A 3	232	226	238			
B 1	219	220	223	81,5	91,7	6,5

Opomba: I, II in III — površinska trdota blizu prezre, označenih na sliki 5. Povprečna vrednost 5 meritev. Ojnica A1, A2 in A3 so bile vzete ob začetku, v sredini in ob koncu eksperimentalnega kovanja. B1 — primerjalna ojnica.



Slika 2

Presek stebra ojnice iz jekla A

Slika 3

Detajl mikrostrukture preseka na sliki 2

Slika 7

Mikrostruktura po deformaciji pri 1050 °C in kontrolirani ohladitvi. Jeklo A

Slika 8

Mikrostruktura po deformaciji pri 1150 °C in kontrolirani ohladitvi. Jeklo A

Slika 9

Mikrostruktura po deformaciji pri 1250 °C in kontrolirani ohladitvi. Jeklo A

Slika 10

Mikrostruktura po normalizaciji. Jeklo A

Slika 11

Mikrostruktura po poboljšanju. Jeklo A

Slika 16

Prelomi žilavostnih preizkušancev iz jekla A. Od desne: poboljšano stanje, normalizirano stanje, jeklo deformirano pri rastočih temperaturah 1050, 1150, 1250 in 1300 °C ter jeklo, ki je bilo ogrevano pri 1300 °C

Fig. 2

Cross section of the shaft body. Steel A

Fig. 3

Detail of the microstructure of the cross section in Fig. 2

Fig. 7

Microstructure after deformation at 1050 °C and controlled cooling. Steel A

Fig. 8

Microstructure after deformation at 1150 °C and controlled cooling. Steel A

Fig. 9

Microstructure after deformation at 1250 °C and controlled cooling. Steel A

Fig. 10

Microstructure after normalisation. Steel A

Fig. 11

Microstructure after quenching and tempering. Steel A

Fig. 16

Fractures of impact-test samples of steel A. From the right: quenched and tempered, normalized, deformed at increasing temperatures 1050, 1150, 1250, and 1300 °C, heated at 1300 °C

Odgovor na ti dve vprašanji je istočasno odgovor na vprašanje, s kakšnimi posegi v proces je mogoče izpeljati kontrolirano kovanje in ali ima termomehanično kovanje perspektivo.

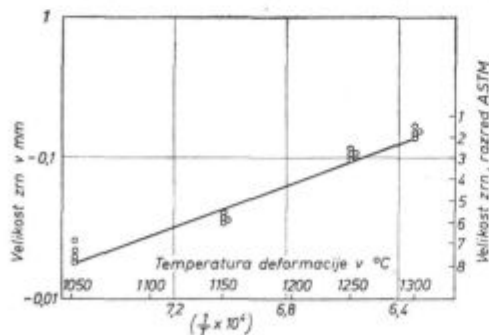
### 3. EKSPERIMENTALNO DELO IN MATERIAL

Z laboratorijskimi preizkusi smo najprej ugotovili vpliv temperature deformacije na velikost AZ, ki nastanejo pri statični rekristalizaciji avstenita. Deformacijo približno 20 % smo izvršili s pomočjo padalnega kladiiva. Po deformaciji smo vzorce ohladili tako, da se je izoblikovala mikrostruktura iz zrn lamelnarnega perlita, obdanih s feritno opno, ki je nastala po mejah AZ. Na sliki 6 je prikazan vpliv temperature deformacije na velikost AZ, na slikah 7, 8 in 9 pa mikrostruktura jekla, ki je bilo deformirano pri različnih temperaturah. Za primerjavo smo uporabili normalizirano jeklo (sl. 10), poboljšano jeklo (sl. 11) in jeklo, ki je bilo ogrevano pri 1300 °C. Izbrani interval temperature deformacije in ogrevanja prekriva razpon temperature utopnega kovanja in je zagotovil jeklo z enako osnovno mikrostrukturo, vendar z velikostjo AZ v razponu ca 6 razredov po ASTM.

Iz naraščanja velikosti AZ v odvisnosti od temperature na sliki 6 smo izračunali navidezno aktivacijsko energijo za statično rekristalizacijo avstenita. Ta znaša 150 kJ/mol, kar je nekoliko nad vrednostjo, ki smo jo poznali za rekristalizacijo jekla z 0,42 % C<sup>4</sup> pri vročem valjanju. Razliko je treba verjetno pripisati razliki v sestavi jekla in v načinu deformacije.

Laboratorijski preizkusi in preiskave ohlajanja in mikrostrukture izkolkov v kovačnici so bili osnova za izbiro pogojev za preizkus termomehničnega kovanja ojnic, pri katerem smo kontrolirali temperaturo kovanja in hitrost ohlajanja izkolkov.

Vse preizkuse in preiskave smo izvršili na jeklu z 0,48 % C, 1,2 % Mn in 0,30 % Cr (Jeklo A). Iz



Slika 6

Odvisnost med temperaturo deformacije in velikostjo zrn, ki so nastala s statično rekristalizacijo avstenita

Fig. 6

Relationship between the temperature of deformation and the size of grains formed by static recrystallization of austenite

tega jekla smo izkovali tudi preizkusne ojnice. Primerjalne poboljšane ojnice iz tekoče proizvodnje so bile iz jekla z 0,38 % C, 0,78 % Mn in 0,58 % Cr (Jeklo B). Preizkusne ojnice (termomehanično skovane ojnice) so imele mikrostrukturo, ki jo kaže slika 2, primerjalne ojnice pa mikrostrukturo, ki je zelo podobna tisti, ki jo prikazuje slika 11.

Na preizkušancih, ki so bili deformirani v laboratoriju in so imeli po preseku enakomerna AZ, smo izvršili mehanske preiskave (meja plastičnosti, trdnost, duktilnost, žilavost, trajna trdnost pri rotacijskem upogibu), na ojnicah pa raztržne preizkuse in preizkuse trajne trdnosti pri izmenični natezno tlačni obremenitvi do  $2 \cdot 10^6$  nihajev.

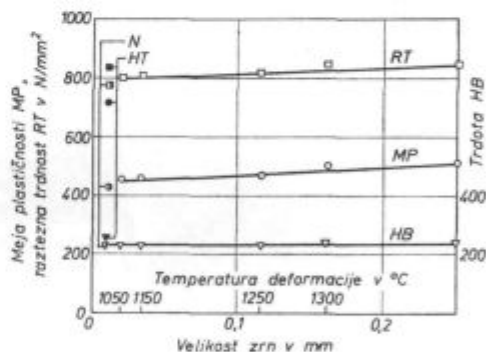
Prelome žilavostnih preizkušancev in prelome utrujenostnih preizkušancev smo pregledali v raster elektronskem mikroskopu, da bi dognali, kako se mikrostruktura in velikost AZ odražata na mehanizmu preloma.

### 4. REZULTATI

#### 4.1 Mehanski preizkusi

##### a) Kovani preizkušanci

Na slikah 12, 13 in 14 je prikazano, kako velikost AZ vpliva na različne lastnosti jekla. Na abscisi so navedene tudi temperature deformacije in prikazane lastnosti normaliziranega in poboljšane jekla.



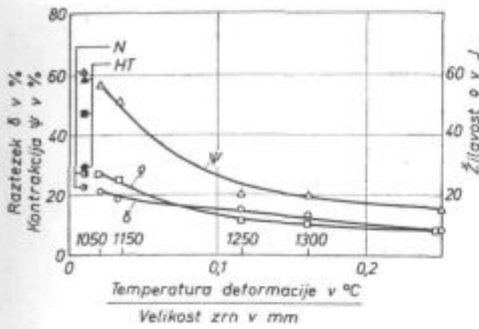
Slika 12

Vpliv velikosti austenitnih zrn na trdoto (HB), na mejo plastičnosti (MP) in na trdnost (RT). Jeklo A: N — normalizirano, HT — poboljšano stanje, nd — nedeformirano jeklo

Fig. 12

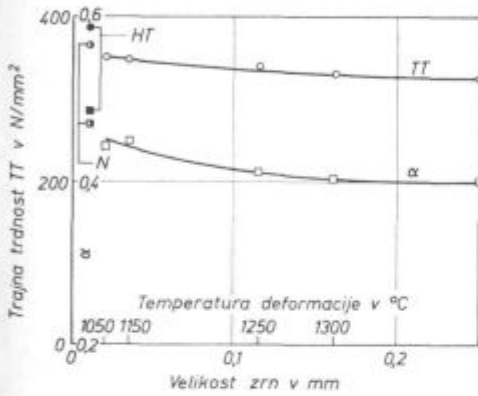
Influence of the size of austenite grains on the hardness (HB), yield point (MP), and strength (RT). Steel A: N — normalized, HT — quenched and tempered, nd — not deformed

Lastnosti normaliziranega jekla je mogoče ekstrapolirati iz lastnosti deformiranega jekla, tako da upoštevamo razlike v velikosti AZ, poboljšano jeklo pa ima znatno večjo žilavost in mejo plastičnosti kot jeklo s perlitno mikrostrukturo s podobno trdoto. Pri povečanju AZ počasi rastejo trdnost, meja plastičnosti in trdota jekla s perlit-



Slika 13  
Vpliv velikosti austenitnih zrn na žilavost ( $\rho$ ), raztezek ( $\delta$ ) in kontrakcijo ( $\psi$ ). Jeklo A. Označbe so enake kot na sl. 12

Fig. 13  
Influence of the size of austenite grains on the toughness ( $\rho$ ), elongation ( $\delta$ ), and contraction ( $\psi$ ). Steel A. Symbols the same as in Fig. 12



Slika 14  
Vpliv velikosti austenitnih zrn na trajno trdnost pri vrtnem upogibu (TT) in na razmerje med to trdnostjo in natezno trdnostjo ( $\alpha$ ). Jeklo A. Označbe so enake kot na sliki 12

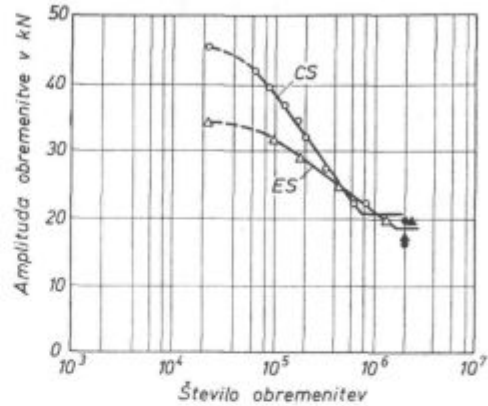
Fig. 14  
Influence of the size of austenite grains on the fatigue in rotation-bending test (TT), and on the fatigue/tensile strength ratio ( $\alpha$ ). Steel A. Symbols the same as in Fig. 12

no mikrostrukturo. Prav tako povečanje velikosti AZ zmanjšuje duktilnost (kontrakcijo in razteznosti) in žilavost jekla. Te lastnosti se hitreje zmanjšujejo, ko temperatura deformacije zraste preko ca 1170 do 1200 °C. Trajna trdnost pri rotacijskem upogibu (Wöhlerjeva trdnost) se nekoliko zmanjšuje, ko raste velikost AZ. Pomembno je, da je razlika med trajno trdnostjo poboljšane jekla in jekla s perlitno mikrostrukturo okoli 11 %, kar je mnogo manj od razlike v meji plastičnosti, ki dosega 57 % in je bližje razliki v trdnosti, ki dosega okoli 5 %. Dejstvo, da se trajna trdnost zmanjšuje, ko raste velikost AZ, kaže, da je v procesu nastajanja utrujenostne razpoke in njenega širjenja bolj udeležena duktilnost jekla, kot njegova trdnost. O tem bomo razpravljali kasneje.

b) Mehanski preizkusi ojníc

V tabeli 1 so prikazane največje in najmanjše velikosti AZ na treh presekih preizkusnih ojníc,

ki so označeni na sliki 3. V tabeli 2 pa so prikazane mehanske lastnosti preizkusnih in primerjalnih ojníc. Na sliki 15 je končno prikazano, kako se spreminja število nihajev do loma obeh vrst ojníc, odvisno od amplitude izmenične obremenitve do  $2 \cdot 10^6$  nihajev. Pri amplitudi obremenitve, ki povzroči prelom pri tem številu nihajev, odstopa časovna trdnost preizkusnih ojníc za manj od 10 %

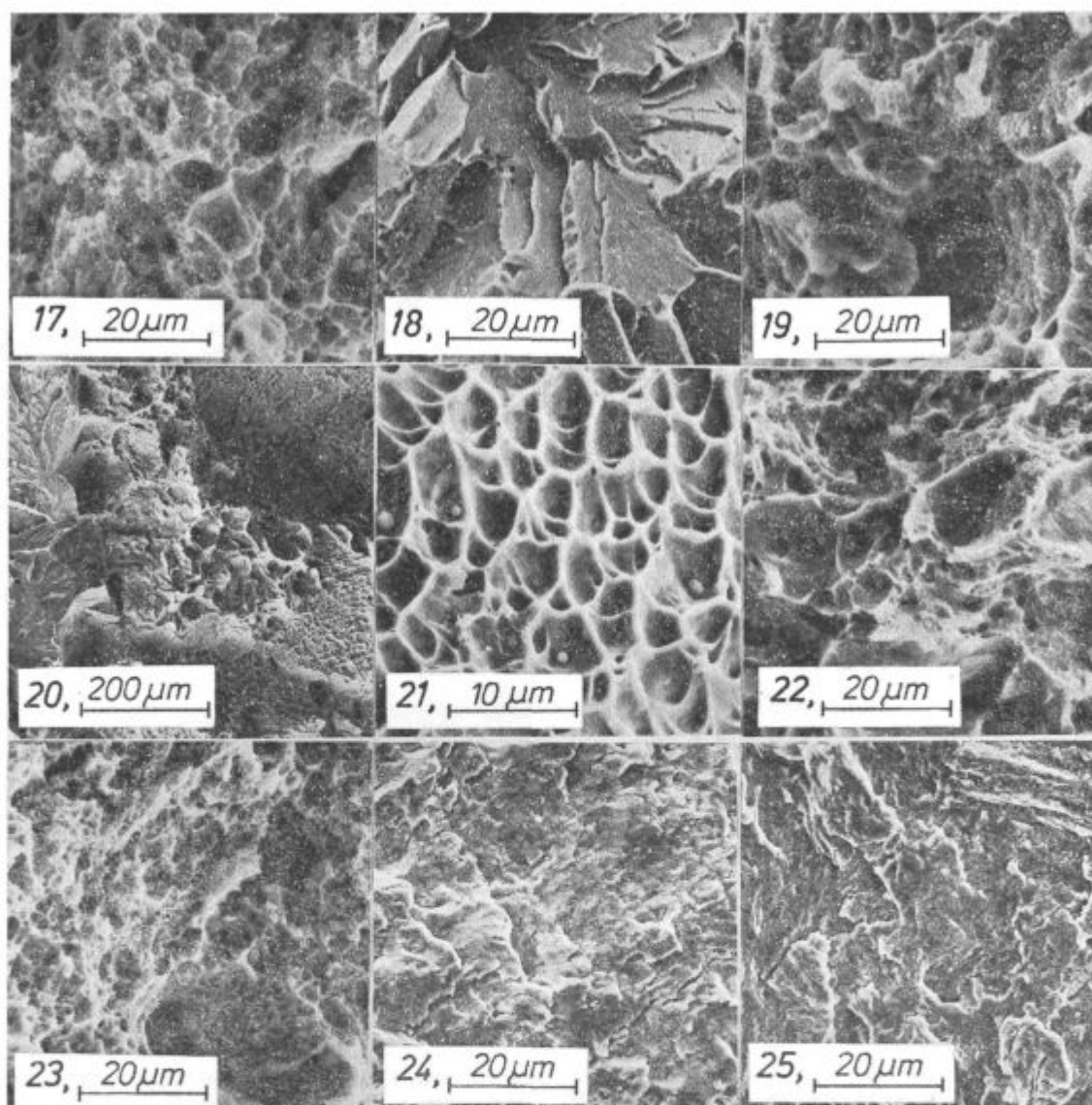


Slika 15  
Vpliv naraščanja števila obremenitev na odpornost preizkusnih (ES) ojníc iz jekla A in primerjalnih ojníc (CS) iz jekla B proti izmenični obremenitvi nateg tlak

Fig. 15  
Influence of the increased number of loads on the fatigue of tested shafts (ES) made of steel A, and the reference shafts (CS) made of steel B against the alternating compression-tension load

od časovne trdnosti primerjalnih ojníc iz tekoče proizvodnje, kar je blizu razliki v trdnosti. Razlika je mnogo večja pri večji amplitudi obremenitve in je blizu razliki v meji plastičnosti, ki znaša 60 % v korist poboljšanih ojníc. Pri zmanjšanju amplitude število obremenitev do zloma hitreje pada pri poboljšanih ojníc in je razlika pri  $2 \cdot 10^6$  nihajev že v intervalu trosenja rezultatov. Torej se jeklo s perlitno mikrostrukturo s približevanjem trajni trdnosti pri izmenični obremenitvi nateg — tlak (Wöhlerjevi trdnosti) obnaša tako, kot bi bila za odpornost proti utrujenosti odločilna trdnost jekla in ne njegova meja plastičnosti. To potrjuje rezultate preizkusov rotacijskega upogiba preizkušancev s homogenim AZ po preseku.

Opis in razpravo o mehanskih lastnostih lahko končamo z ugotovitvijo, da so utrujenostne lastnosti jekla s perlitno mikrostrukturo v primerjavi z jeklom s poboljšano mikrostrukturo podobne razmerju trdnosti jekla, ne pa razmerju meje plastičnosti ali duktilnosti obeh jekel. Dalje lahko ugotovimo, da s stališča odpornosti jekla proti utrujenosti perlitna mikrostruktura relativno malo zaostaja za poboljšano mikrostrukturo, kar seveda daje termomehničnemu kovanju uporabno perspektivo. Ni izključeno, da bi z optimalno ohlaiditvijo jekla po kovanju dosegli celo mikrostrukturo, ki bi bila po lastnostih popolnoma enakovredna poboljšani mikrostrukturi s podobno trdoto.



Slika 17  
 Žilavi transkristalni prelom poboljšane jekla s slike 16  
 Slika 18  
 Krhki transkristalni prelom normaliziranega jekla s sl. 16  
 Slika 19  
 Žilavi intrakristalni prelom normaliziranega jekla s sl. 16  
 Slika 20  
 Prelom preizkušanca na sliki 16, ki je bil deformiran pri 1250 °C  
 Slika 21  
 Isti vzorec kot slika 20. Drobnojamičasta intrakristalna površina preloma  
 Slika 22  
 Raztržna žilava transkristalna prelomna površina preizkusne ojnice iz jekla A  
 Slika 23  
 Raztržna žilava transkristalna prelomna površina iz primerjalne ojnice iz poboljšane jekla B  
 Slika 24  
 Utrujenostna prelomna površina iz preizkusne ojnice iz jekla A  
 Slika 25  
 Utrujenostna prelomna površina primerjalne ojnice iz jekla B

Fig. 17  
 Tough transcrystalline fracture of quenched and tempered steel in Fig. 16  
 Fig. 18  
 Brittle transcrystalline fracture of normalized steel in Fig. 16  
 Fig. 19  
 Tough intracrystalline fracture of normalized steel in Fig. 16  
 Fig. 20  
 Fracture of test piece in Fig. 16 being deformed at 1250 °C  
 Fig. 21  
 The same sample as in Fig. 20. Fine-pitted intracrystalline surface of the fracture  
 Fig. 22  
 Torn tough transcrystalline fracture surface of the tested shaft made of steel A  
 Fig. 23  
 Torn tough transcrystalline fracture surface of the reference shaft made of quenched and tempered steel B  
 Fig. 24  
 Fatigue fracture surface of the tested shaft made of steel A  
 Fig. 25  
 Fatigue fracture surface of the reference shaft made of steel B

#### 4.2. Mikrofraktofske preiskave

Slika 16 prikazuje prelome žilavostnih preizkušancev. Na sliki vidimo, da se že po makroskopskem videzu razlikuje prelom poboljšane jekla od prelomov normaliziranega jekla in jekla deformiranega do 1150 °C, od prelomov jekla, ki je bilo deformirano pri 1250 °C in višje, oziroma je bilo samo ogrevano pri 1300 °C. Opazovanje v raster-elektronskem mikroskopu natančneje pokaže naravo teh razlik. Pobiljšano jeklo ima drobno jamičasti transkristalen žilav prelom (sl. 17). Normalizirano jeklo ima mešan žilav krhek transkristalen prelom (sl. 18 in 19). Del žilave dekohezije se je izvršil čez lamelaren perlit, tako da razločimo lamelarno mikrostrukturo na primerno orientiranih površinah večjih jamic. Zelo je podoben prelom jekla, ki je bilo deformirano pri 1050 °C. Na prelomu jekla, ki je bilo deformirano pri 1150 °C, opazimo poleg žilavega in krhkega transkristalnega preloma tudi otočke interkristalnega preloma. Ta oblika preloma prevladuje pri jeklu, ki je bilo deformirano pri 1250 °C in višje (sl. 20). Razvila se je na račun zmanjšanja žilave transkristalne površine. Večja povečava pokaže, da so interkristalne površine drobno jamičaste, torej žilave (sl. 21). Zanimivo je, da imajo jamice podobno velikost kot na prelomu poboljšane ali normaliziranega jekla. Natančneje opazovanje je pokazalo posamične dele prelomne površine s specifičnimi oblikami preloma, ki bodo posebej opisane.

Primerjava mikrostrukture in preloma pokaže, da je deformacija ob konici razpoke v grobozrnatem jeklu s perlitno mikrostrukturo omejena na feritni sloj po mejah. Jamičasta površina se razvije, če je debelina feritnega sloja zadostna. Če ferita ni ali je sloj ferita pretanek, se razvijejo degenerirane oblike preloma. Če je geometrija mikrostrukture ob konici razpoke primerna, se razpoka lahko širi krhko transkristalno ali redkeje žilavo transkristalno.

Raztržni prelomi preizkusnih ojníc so bili žilavi in transkristalni (sl. 22). Opazili nismo nobene razlike v velikosti jamic, ki bi ustrezala različni velikosti AZ po preseku ojnice. Prelomi primerjalnih poboljšanih ojníc so bili tudi žilavi in transkristalni (sl. 23).

Pregledali smo tudi prelome preizkušancev, ki so se prelomili pri preizkusu rotacijskega upogiba, in prelome, nastale pri nateznotlačnem izmeničnem trajnem preizkušanju ojníc. Prelomi ene in druge vrste so bili podobni. Na njih nismo opazili nobenih znamenj razlik v velikosti AZ in le nepomembno razliko zaradi razlike v mikrostrukturi jekla. Podobno velja za prelome ojníc. Prelomna površina je bila v vseh primerih transkristalna, imela je značilne brazde, ki kažejo na napredovanje razpoke v korakih (sl. 24 in 25) in številne razpoke, pravokotne na glavno ravnino preloma. Te razpoke so bile večinoma tudi pravokotne na smer napredovanja razpoke. Usmerjenost brazd ni

bila tako izrazita in je bila često različna na sosednjih področjih. Sodeč po tem, da so ta področja podobno velika v poboljšanem jeklu in v jeklu s perlitno mikrostrukturo, lahko zaključimo, da na prelomu ni znakov, katere bi lahko povezali z velikostjo avstenitnih zrn.

#### 5. ANALIZA REZULTATOV

V jeklu z mikrostrukturo iz zrn lamelnega perlita, obdanih s feritno opno, spremlja rast v velikosti AZ pomembno zmanjšanje žilavosti in duktilnosti, trdnostne lastnosti in trdota rahlo rastejo, spremeni se narava preloma, odpornost proti izmenični obremenitvi nateg-tlak in obremenitvi z rotacijskim upogibom pa se spremeni za največ 10 %. Torej obstaja neposredna zveza med duktilnostjo in naravo preloma, obe lastnosti jekla pa sta bolj povezani z mikrostrukturo, ali pravilneje povedano, z velikostjo AZ kot trdnostne lastnosti in odpornost jekla proti utrujanju. Te ugotovitve se ujemajo s podatki, ki smo jih našli v nekaterih virih, ki obravnavajo vpliv pregretja na nekatere lastnosti jekel.<sup>5, 6, 7</sup>

Za odvisnost med velikostjo AZ in duktilnostjo jekla predlagamo naslednjo razlago. Ferit je mehkejši od perlita, zato je razumna predpostavka, da prenaša večino deformacije med raztegovanjem, dokler se ne začne prelom jekla. V jeklu z majhnimi AZ je več ferita, pred nastankom preloma je večja deformacija, ki se kaže v večjem raztezu. Ferit se pri tej deformaciji utrdi in ob prelomu se usmerja napredovanje razpoke v transkristalno pot. Prelom je delno žilav, znak močne hladne deformacije tik ob konici napredujoče razpoke, ali pa krhek, torej brez deformacije ob konici razpoke. Ali se razvije ena ali druga vrsta preloma, je odvisno od orientacije mikrostrukture v posamičnih zrnih pred konico napredujoče razpoke. Sodeč po sedanjih opazovanjih, se krhka dekohezija pojavi tam, kjer lamele v perlitu ležijo v ravnini napredujočega preloma ali blizu nje.

V jeklu z velikimi AZ je manj ferita, zato je manjši raztezek pred prelomom in temu primerno manjša utrditev ferita s hladno deformacijo pred prelomom. Zato se prelomna razpoka širi interkristalno po najbolj šibki komponenti mikrostrukture. Deformacija ob konici razpoke je omejena na feritni sloj, zato dekohezija lahko degenerira v netipično obliko, če je ta sloj pretanek ali ga ni. Če so pogoji ob konici razpoke primerni, se prelom lahko širi tudi krhko intrakristalno ali redkeje žilavo, podobno, kot velja za jeklo z majhnimi AZ.

Pri širjenju prelomne razpoke v korakih, ki je značilno za izmenično obremenitev jekla, velikost zrn ne prihaja do izraza. Prelom napreduje izrazito transkristalno v korakih, katerih širina je odvisna od realne napetosti v jeklu, torej je tem večja, čim manjši je preostali del preloma.

Obnašanje jekla pri trajni izmenični obremenitvi je odvisno od odpornosti proti nastanku začetne razpoke, ki se lahko razširi preko celega preseka preizkušanca, in od odpornosti jekla proti širjenju te razpoke pri nadaljevanju obremenitve. Na osnovi rezultatov mehanskih preizkusov je bila izražena domneva, da je zmanjšanje izmenične trdnosti jekla zaradi naraščanja AZ iskati v tem, da se s povečanjem AZ olajša nukleacija kritične razpoke. Razmislimo o tem nekoliko bolj podrobno: Trajna izmenična trdnost eksperimentalnih ojnic je pri veliki amplitudi obremenitve mnogo manjša kot izmenična trdnost primerjalnih ojnic. Pri velikih amplitudah obremenitve je razlika med obema vrstama ojnic blizu razlike v meji plastičnosti; pri majhnih amplitudah, ki so blizu trajni izmenični trdnosti (Wöhlerjevi trdnosti) pa je razlika med obema vrstama ojnic mnogo manjša in primerjavna z razliko v trdnosti. Lahko bi rekli, da se jeklo z mikrostrukturo iz zrn perlita, obdanih s feritno opno, pri velikih amplitudah obremenitve obnaša kvazi statično in da prihaja do utrujenostnega obnašanja šele pri manjših amplitudah.

V obliki prelomne površine ni razlike med jeklom s perlitno mikrostrukturo in jeklom s poglobljeno mikrostrukturo, da bi razložila razliko med obema vrstama ojnic pri veliki amplitudi obremenitve. Mikrostruktura obeh vrst ojnic je sestavljena iz istih komponent, feritne matrice in cementita, ki pa je krogličast v poglobljenih ojnicah in lamelaren v preizkusnih ojnicah, kar je vzrok za veliko razliko v meji plastičnosti in mnogo manjšo razliko v trdnosti. Ker je pri prelomu pomembna predvsem trdnost, lahko podobnost v obliki prelomne površine vzamemo za znak, da imata obe mikrostrukturi podobno odpornost proti širjenju transkristalne razpoke pri nadaljevanju izmenične obremenitve. To potrjuje tudi dejstvo, da ni pomembne razlike v širini koraka utrujenostne razpoke med obema vrstama ojnic pri enaki amplitudi obremenitve. Zato se nam zdi logično, da je razlika med obema vrstama ojnic posledica različne odpornosti jekla proti začetnemu širjenju razpoke. Površina obeh vrst ojnic je bila obdelana s peskanjem, zato jo lahko izključimo kot vplivni dejavnik. Istočasno pa so poškodbe površine od peskanja tolikšne, da lahko v procesu preloma zanemarimo nukleacijo razpoke, ki je pri idealni površini prva stopnja nastanka utrujenostnega preloma.

Poglobljena mikrostruktura je v mikroskopskem merilu bolj homogena kot perlitna. V tej mikrostrukturi je feritna opna okoli perlitnih zrn šibkejša komponenta in pričakovati je, da se bo v začetni fazi preloma razpoka razvila v feritni opni po kristalnih mejah, preden se preusmeri na transkristalno pot. Na ojnici, ki se je prelomila pri veliki amplitudi, smo našli detajl površine s poligonalno obliko, kar je znak, da je interkristalne narave. Ta del smo našli na mestu, kjer je bilo

po drugih značilnostih sklepati, da se je prelom začel. Na drugih ojnicah je bilo ob začetku preloma opaziti dele površine, ki so po obliki odstopali od transkristalne površine, vendar so bili preveč mehansko poškodovani, da bi se dalo opredeliti njihovo naravo. Oblika interkristalne površine ni podobna tisti, ki je nastala pri udarnem prelomu jekla. Na njej opazimo malo izrazito periodičnost, ki kaže, da je razpoka napredovala vzdolž meje v korakih. Oblika prelomne površine torej kaže, da je lahko razlika v trajni trdnosti obeh vrst ojnic pri veliki amplitudi obremenitve posledica feritne opne po mejah perlitnih zrn. Na meji, ki je primerno usmerjena glede na smer sile, se površinska poškodba razvije v razpoko, ki raste v notranjost jekla, dokler zaradi geometrije mikrostrukture ali globine razpoke niso dani pogoji za transkristalno napredovanje, ki privede do končnega zloma.

Trajna trdnost pri rotacijskem upogibu se zmanjšuje, ko raste velikost AZ. To kaže, da pri razvoju začetne razpoke ni pomembna samo usmeritev kristalnih mej glede na smer obremenitve. Takih mej je gotovo več v drobnozrnatem kot v fino-zrnatem jeklu. Kazalo bi torej, da je pomembnejši drugi dejavnik, to je lokalna koncentracija napetosti. Pričakovati je, da je koncentracija napetosti večja v grobozrnatih mikrostrukturah predvsem zato, ker se v ciklu ponavljajoče se obremenitve gibanje dislokacij, ki jo spremlja,<sup>8</sup> omejeno na manj številne točke. To ustvarja na teh mestih tem večje napetosti, čim bolj je mikrostruktura jekla heterogena, torej čim večja so perlitna zrna in meje, ki jih obdajajo.

Jeklo s poglobljeno mikrostrukturo presega v žilavosti in v meji plastičnosti za več kot 50 % jeklo s perlitno mikrostrukturo, ki je nastala pri kontroliranem ohlajanju, medtem ko je razlika v raztržni trdnosti največ 10 % in podobna razliki v trajni izmenični trdnosti jekla. Če vzamemo to kot osnovo za oceno uporabnosti jekla, potem je utemeljen sklep, da je pri vrednotenju uporabne lastnosti jekla s perlitno mikrostrukturo pomembnejša raztržna trdnost kot meja plastičnosti. To se tudi ujema s teoretičnimi predvidevanji, da je trajna trdnost odvisna od trdnosti in kontrakcije jekla,<sup>8</sup> ki pa v tem delu ni popolnoma potrjena.

Rezultati tega dela kažejo, da je mogoče na osnovi lastnosti preizkušancev, ki imajo enakomerna AZ po preseku in katere je mogoče razmeroma enostavno pripraviti v laboratoriju, realno soditi tudi o lastnostih izkovkov, ki imajo neenakomerna AZ po preseku. Končno kažejo rezultati da so lastnosti termomehانيčno skovanih ojnic take, da opravičujejo nadaljevanje dela. Cilj je uveljaviti ta postopek v industrijski rabi. Pred tem pa je potrebno izvršiti še dodatne raziskave, da bi našli najprimernejše jeklo ter ugotovili take pogoje ohlajanja izkovkov po kovanju, da bodo dosežene optimalne lastnosti jekla s perlitno mikrostrukturo.



## 6. SKLEPI

Raziskavo smo izvršili s ciljem, da ugotovimo kako velikost avstenitnih zrn vpliva na lastnosti jekla, ki ima mikrostrukturo iz zrn lamelnariga perlita, obdanih s feritno opno. Preizkuse in preiskave smo izvršili na preizkušancih, ki so bili pripravljene v laboratoriju in so imeli po preseku enakomerna zrna, in na industrijsko skovanih ojnica, ki so imele po preseku neenakomerna avstenitna zrna. Kot primerjavo smo uporabili boljše preizkušance in ojnice iz tekoče industrijske proizvodnje. Rezultati dela omogočajo naslednje sklepe:

— z naraščanjem temperature deformacije eksponentialno raste velikost avstenitnih zrn, ki nastanejo s statično rekristalizacijo avstenita;

— s povečanjem avstenitnih zrn se pomembno zmanjšujeta žilavost in duktilnost jekla s perlitno mikrostrukturo; spreminja se narava preloma, ki nastane pri raztržnem in udarnem preizkusu, rahlo zrastejo trdnostne lastnosti in trdota, nekoliko se zmanjša trajna trdnost pri izmenični obremenitvi, ne spremeni pa se narava preloma pri tej obremenitvi;

— meja plastičnosti in žilavost jekla sta za več kot 50 % večji v popoljšanem stanju kot v kontrolirano ohlajenem stanju, raztržna trdnost in trajna trdnost pri izmenični obremenitvi pa zaostajata največ za 10 %;

— rezultati dosedanjega dela kažejo, da lahko da termomehnično utopno kovanje ojnica (kovanje pri določeni temperaturi s kontroliranim ohlajanjem) jeklu lastnosti, ki ne zaostajajo pomembno za lastnostmi popoljšanega jekla. Zato lahko iščemo v tej smeri možnost za racionalizacijo izdelave lahkih izkrokov z utopnim kovanjem.

Sredstva za izvršitev tega dela je prispevala RS Slovenije. Preiskave v raster mikroskopu je izvršila M. Jakupovič, preizkuse ojnica pa B. Arzenšek.

## Literatura

1. F. Vodopivec: Opredelitev parametrov za perlitno kovanje, Poročilo Metalurškega inštituta Ljubljana, september 1978.
2. F. Vodopivec, S. Jurca, F. Filipov in K. Kuzman: Raziskave rekristalizacije in premene vroče deformiranega jekla, Poročilo Metalurškega inštituta Ljubljana, avgust 1978.
3. F. Vodopivec, S. Jurca, J. Zvokelj, F. Filipov in K. Kuzman: Sheffield International Conference on hot working and forming processes, Sheffield, 1979.
4. R. A. Petkovič, M. J. Luton in J. J. Jonas: Canadian Metallurgical Quarterly 14, 137, 1975.
5. D. Frodl, A. Ramdak in K. Vetter: Härterei Technische Mitteilungen 29, 169, 1974.
6. D. S. Mc Darmaid: Metals Technology 5, 7, 1978.
7. R. W. Gardiner: Metals Technology 4, 536, 1977.
8. G. E. Dieter: Mechanical Metallurgy, Mc Graw Hill, 1976.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel werden die Eigenschaften des Stahles und der gesenkgeschmiedeten Pleulstangen mit dem Gefüge aus lamelarem Perlit und Ferrit behandelt und mit den Eigenschaften des Stahles und der Pleulstangen aus vergütetem Mikrogefüge verglichen. Die gesenkgeschmiedeten Pleulstangen haben über den Querschnitt verschiedene Austenitkorngrösse (AKG) die mit der Schmiedetemperatur zunimmt. Die Stahlproben mit 0,48 % C und 1,2 % Mn sind durch Schmieden des Stahles im Temperaturintervall von 1050 bis 1300 °C und kontrollierter Abkühlung des Mikrogefüges aus lamelarem Perlit und Ferrit und der Austenitkorngrösse im Intervall von ca 6 Klassen nach ASTM vorbereitet worden. Durch die Vergrösserung der AKG im Stahl mit perlitischem Mikrogefüge vermindert sich die Zähigkeit, die Verformbarkeit und die Festigkeit, die Härte und die Streckgrenze werden geringfügig grösser.

Die Verminderung der Zähigkeit und der Verformbarkeit ist nicht gleichmässig, sondern wird grösser, wenn die Verformungstemperatur 1200° überschreitet. Auch bei der grössten AKG wird die Verminderung der Festigkeit des Stahles beim Rotationsbiegeversuch nicht grösser als 10% im Vergleich mit dem Vergüteten Stahl ähnlicher

Härte und bei der Vergrösserung der Grösse der AKG für ca 6 ASTM Klassen. Das ist sehr nahe der Festigkeitsdifferenz und viel weniger von der Differenz in der Streckgrenze. Mit grösser werdender AKG ändert sich die Natur des Bruchgefüges und zwar entsteht auf die Kosten der transkristallinen zähen Stahloberfläche eine interkristalline zähe Oberfläche. Unter den Bedingungen die eine maximale AKG zusicherten sind die Versuchskurbelwellen mit einem Mikrogefüge aus Perlit und Ferrit geschmiedet worden und deren Eigenschaften mit den Eigenschaften der Pleulstangen aus der laufenden Produktion verglichen worden. Es hat sich gezeigt, dass die Versuchspulelstangen ein viel kleinere Streckgrenze und nur geringfügig kleinere Festigkeit und Wechselfestigkeit als die Pleulstangen aus der fließenden Produktion besitzen. Es gibt keinen nennenswerten Unterschied in der Bruchform, welcher durch die Wechselbeanspruchung der beiden Pleulstangensorten entsteht. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass durch das Termomechanische Schmieden, Pleulstangen hergestellt werden können, die nach der statischen Schwingungsfestigkeit und nahe der vergüteten Pleulstangen aus der konventionellen Produktion sind.

## SUMMARY

The paper discusses the steel characteristics and the die forging of shafts with the microstructure composed of lamellar pearlite and ferrite and compare it with the steel and the shafts where the microstructure was obtained by quenching and tempering. Die forged shafts contain various sizes of austenite grains across the cross section, and they increase with the increased temperature of forging. Steel samples with 0.48% C and 1.2% Mn were forged between 1050 and 1300 °C and cooled under the controlled conditions. Their microstructure consisted of lamellar pearlite and ferrite while size of austenite grains varied in the interval of 6 grades according to ASTM. The increased austenite grain size in steel with pearlitic microstructure reduces the toughness, plasticity, and the fatigue strength while the tensile strength, hardness, and yield point are slightly higher. Toughness and plasticity reduction is not uniform but it is greater if the deformation temperature exceeds 1200 °C. Even with the greatest size of austenitic grains the reduction of steel fatigue strength in rotary

bending is not greater than 10% compared with that of the quenched and tempered steel of a similar hardness. Difference in fatigue strength is thus close to the difference of tensile strength, but the difference in strength is difference in yield point is substantial. The increased size of austenite grains changes the characteristics of the fracture since instead of transcrystalline tough surface an intercrystalline tough surface appears. Under the conditions when the maximal size of austenite grain was limited, the test shafts with pearlite-ferrite microstructure were forged and their properties compared with those taken from the regular production process. The test shafts had much lower yield point and slightly lower strength and fatigue strength than the shafts in the regular production cycle. Fracture appearance did not show any essential difference in fatigue tests. The investigation results show that the thermomechanical forging of shafts gives shafts which tensile and fatigue strengths are close to those from a conventional manufacturing process being quenched and tempered.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены свойства стали и ковка в штампах шатунов с микроструктурой из слоистого перлита и феррита. Приведено сравнение с сталью и шатунами с улучшенной микроструктурой. Шатуны изготовленные ковкой в штампах имеет по сечению различную величину аустенитных зерен. С повышением температурыковки их величина увеличивается. При ковке стали между 1050 и 1300 °C были приготовлены образцы стали с 0,48 % C и 1,2 % марганца, с микроструктурой из слоистого перлита и феррита контролируя охлаждение и с величиной аустенитных зерен прибл. в 6-ти классах по ASTM.

С увеличением величины аустенитных зерен в стали с микроструктурой уменьшается вязкость, пластичность и усталостная прочность при нагрузке с симметричным циклом, а слегка увеличивается прочность, твердость и предел пластичности. Уменьшение вязкости и пластичности неравномерное и увеличивается как только температура деформации превышает прибл. 1200 °C. Также при самой большой величине аустенитных зерен уменьшение прочности стали при вращательном изгибе не пре-

вышает 10% сравнивая эту сталь с подобной сталью в улучшенном состоянии что касается твердости и увеличения аустенитных зерен на прибл. 6 классов по ASTM. В отношении на прочность это ближе разницы, но гораздо меньше разницы предела пластичности. С увеличением величины аустенитных зерен изменяться вид излома стали как следствие транскристаллизации вязкой поверхности — получается межкристаллическая вязкая поверхность. В условиях, которые обозначили ограниченную максимальную величину аустенитных зерен приготовлены опытные шатуны с микроструктурой из перлита и феррита, и их свойства сравнены с свойствами шатунов из серийного производства. Оказалось, что предел пластичности этих опытных шатунов гораздо ниже, также немного меньше прочность и усталостная прочность при сравнении с шатунами серийного производства. На излому, полученном при переменной нагрузке обоих видов шатунов разница не отмечена. Результаты исследования показали, что с термомеханической ковкой можно изготовить шатуны, которые по статической и длительной усталостной прочности не отстают от шатунов традиционного производства.