

# Medlamelarna razdalja v podevtektoidnih jeklih

UDK: 669.15-194.52  
ASM/SLA: CN-g, M21g

D. Kmetič, F. Vodopivec, J. Žvokelj



Hladna preoblikovalnost in mehanske lastnosti jekel s pretežno perlitno mikrostrukturo so precej odvisne od medlamelarne razdalje v perlitu. Preiskave smo naredili na ogljikovih in malo legiranih jeklih za poboljšanje in vzmetnem jeklu. Po deformaciji je bil avstenit popolnoma ali delno rekristaliziran in deformiran. Vzorce smo izotermno transformirali v svinčevi kopeli. S kontroliranim ohlajanjem lahko jeklu po vroči predelavi zagotovimo boljše lastnosti.

## 1. UVOD

Transformacija  $\gamma \rightarrow \alpha$  ima pri toplotni obdelavi jekel velik praktičen pomen. Eden od dejavnikov, ki vplivajo na mehanske lastnosti, predvsem na mejo plastičnosti in natezno trdnost, je medlamelarna razdalja v perlitu. Drobno lamelarna perlitna mikrostruktura ima tudi boljše hladno preoblikovalnost. Namen naše raziskave je bil ugotoviti vpliv temperature deformacije, izotermne transformacije in legirnih elementov na medlamelarno razdaljo in morfologijo cementitnih lamel ter s tem na mehanske lastnosti jekel.

Pri podevtektoidnih jeklih nastaja na začetku transformacije ferit. Pri tem se zaradi manjše topnosti ogljika v feritu vsebnost ogljika v preostalem avstenitu zvišuje. Ko je avstenit nasičen, se sproži perlitna transfor-

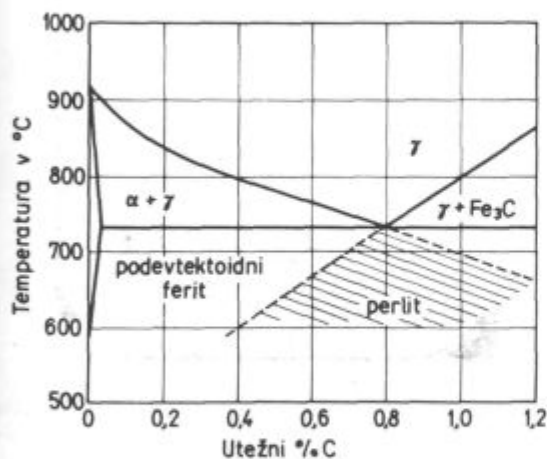
macija, pri kateri istočasno nastajajo feritne in cementitne lamelle. Nasičenost avstenita pri določeni temperaturi in vsebnosti ogljika kaže v Fe-Fe<sub>3</sub>C diagramu Haltgrenova ekstrapolacija (sl. 1). Morfologija ferita je odvisna od nukleacije in termične aktivacije procesa. Pri višjih transformacijskih temperaturah nastaja poligonalen ferit. S padanjem transformacijske temperature se delež ferita v mikrostrukturi manjša in opaža se tendenca nastajanja puščičastega ferita. Tudi za potek perlitne transformacije je potrebna določena inkubacijska doba. Nukleacija se prične po kristalnih mejah in ob nekovinskih vključkih. Zato je kinetika transformacije odvisna od velikosti kristalnih zrn. Pri bolj grobi mikrostrukturi je počasnejša.

Lamelarna oblika cementita je kristallografsko pogojen difuzijski proces in ne predstavlja ravnotežne oblike cementita. Ravnotežno obliko dobimo šele po daljšem času žarjenja, ko nastane zaradi difuzije in površinskih napetosti iz lamel globularen cementit. Domnevamo, da so nukleosi za tvorbo perlita pri podevtektoidnih jeklih feritna zrna, v nadevtektoidnih jeklih pa cementit. Legirni elementi, ki stabilizirajo avstenit in ovirajo difuzijo ogljika, podaljšujejo inkubacijsko dobo perlitne transformacije. Deformacija pospešuje transformacijo avstenita, ker nastajajo nukleosi tudi po deformacijskih linijah in v notranjosti kristalnih zrn na mestih velike gostote dislokacij.

## 2. EKSPERIMENTALNO DELO

Za preiskave smo izbrali jekli za poboljšanje z različno vsebnostjo ogljika (Č. 1530, Č. 1730), jeklo za poboljšanje, legirano z Mn (Č. 3134), in vzmetno jeklo, legirano s Si in Cr (Č. 4230). Kemična sestava jekel je prikazana v tabeli 1. Tako smo lahko ocenili vpliv različne vsebnosti ogljika in legirnih elementov na mikrostrukturo perlita.

Vzorce smo žarili 10 min. pri temperaturi 1150 °C in ohladili na temperaturo deformacije. Deformirali smo jih z enkratnim udarcem padalnega kladiva v temperaturnem področju med 1000 in 750 °C. Redukcija višine vzorcev je bila 25 %. Avstenit je bil po deformaciji popolnoma ali delno rekristaliziran in deformiran. Po deformaciji smo vzorce izotermno transformirali v svinčevi kopeli pri različnih temperaturah (700 do 400 °C), ki smo jih izbrali iz izotermnih TTT diagramov za posamezna jekla. Upoštevati moramo, da poteka transformacija hitreje v jeklu z večjo vsebnostjo deformacijske energije. Časi žarjenja ne smejo biti predolgi, da ne začno potekati procesi sferoidizacije perlita.



Slika 1  
Haltgrenova ekstrapolacija v faznem diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C.  
Fig. 1.  
Haltgren's extrapolation in the phase diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C

Tabela 1: Kemična sestava jekel v procentih

Jeklo	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Al	Sn
Č. 1530	0,44	0,15	0,80	0,017	0,016	0,17	0,16	0,026	0,013
Č. 1730	0,62	0,22	0,74	0,015	0,026	0,11	0,25	0,025	0,014
Č. 3134	0,45	0,33	1,66	0,017	0,029	0,08	0,14	0,040	0,012
Č. 4230	0,62	1,28	0,47	0,016	0,012	0,48	0,33	0,033	0,014

### 3. MEDLAMELARNA RAZDALJA

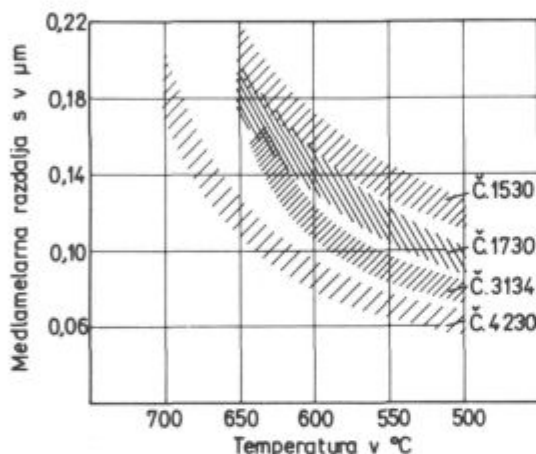
Pri vseh jeklih se delež podevtektoidnega ferita v mikrostrukturi manjša s padajočo temperaturo izotermne transformacije. Ferit nastaja po kristalnih mejah in je njegov delež odvisen od velikosti avstenitnih zrn. Zato vpliva na potek transformacije tudi rekristalizacija. Pomembnejši delež ferita v mikrostrukturi smo izmerili pri jeklu Č. 1530.

Medlamelarno razdaljo v perlitu, to je skupno debelino cementitnih lamel in ferita v perlitu, smo merili v SEM pri povečavi 15 000 ×. Debelino cementitnih la-

mel smo izmerili s pomočjo merilnega okularja na mikrosposnetkih, narejenih pri 10 000 × povečavi. Pri meritvah smo predpostavili, da so lamele pravokotne na površino obrusa na tistih mestih, kjer so najtanjše.

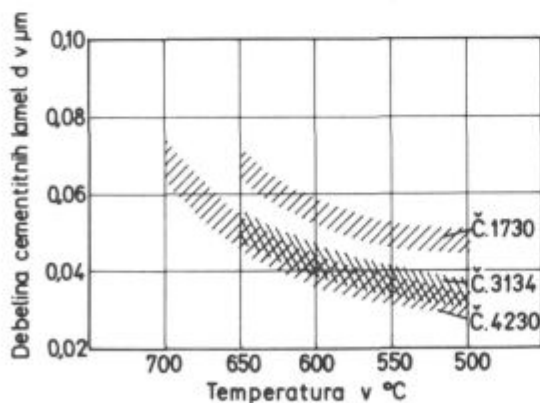
Medlamelarna razdalja in debelina cementitnih lamel se manjšata s padajočo temperaturo izotermne transformacije. Oba parametra sta odvisna od vsebnosti ogljika in se, ko se njegova vsebnost zvišuje, zmanjšujeta.

Legirni elementi Mn, Si in Cr premaknejo celotno področje transformacije v desno. Prav tako vplivajo legirni elementi tudi na medlamelarno razdaljo in debelino cementitnih lamel. Če primerjamo jekli Č. 1530 in Č. 3134, ki se razlikujeta le po vsebnosti Mn, vidimo, da ima jeklo, legirano z Mn, v celotnem področju transformacije manjšo medlamelarno razdaljo in drobnejše cementitne lamele. Podobno odvisnost opazimo tudi pri jeklu Č. 4230, legiranem s Si in Cr, če ga primerjamo z jeklom Č. 1730. Menimo, da vpliva predvsem Cr na zmanjšanje medlamelarne razdalje. Odvisnost medla-



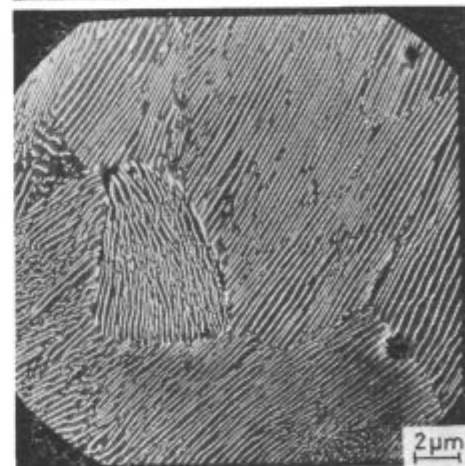
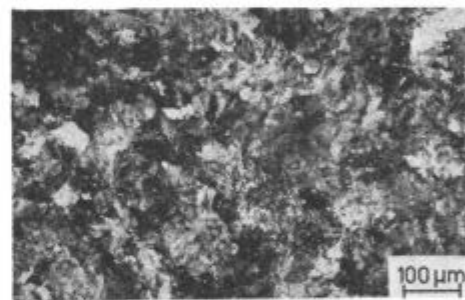
Slika 2  
Vpliv temperature izotermne transformacije na medlamelarno razdaljo v perlitu.

Fig. 2.  
Temperature influence of the isothermal transformation on the interlamellar spacing in the pearlite structure



Slika 3  
Vpliv temperature izotermne transformacije na debelino cementitnih lamel v perlitu.

Fig. 3.  
Temperature influence of the isothermal transformation on the thickness of the cementite lamellae in the pearlite structure



Slika 4a  
Mikrostruktura jekla Č. 4230, posneta v optičnem mikroskopu in v SEM, deformiranega pri 950 °C in izotermno transformiranega pri 700 °C (perlit, s 0,20 μm).

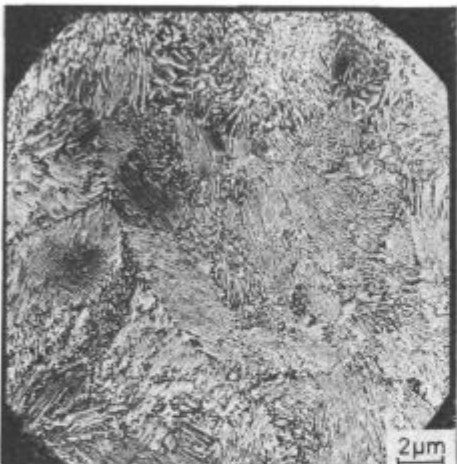
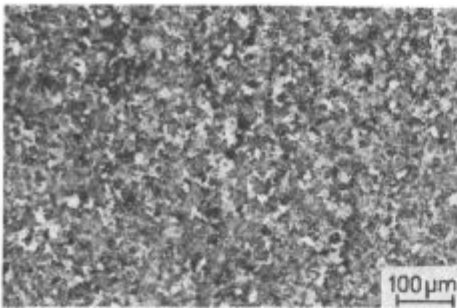
Fig. 4a.  
Microstructure of the steel Č. 4230, seen in the optical microscope and in SEM, deformed at 950 °C and isothermally transformed at 700 °C (pearlite, s 0,20 μm)

melarne razdalje in debeline cementitnih lamel od temperature izotermne transformacije je prikazana v diagramih na slikah 2 in 3.

Medlamelarno razdaljo smo merili tudi v nedeformiranih vzorcih in nismo opazili razlike v primerjavi z deformiranimi vzorci, oz. je ta v mejah merilnih napak. Podobno tudi nismo opazili razlik med rekristaliziranimi in nerekrystaliziranimi zrn. Stanje jekla, nedeformirano, deformirano ali rekristalizirano, vpliva predvsem na kinetiko perlitne transformacije.

#### 4. MORFOLOGIJA CEMENTITNIH LAMEL

Morfološke značilnosti cementitnih lamel so pogojene s temperaturo transformacije in vsebnostjo legirnih elementov. Pri višjih transformacijskih temperaturah so cementitne lamele ravne in potekajo večinoma paralelno preko perlitnih zrn. S padajočo transformacijsko temperaturo je v perlitu vedno več diskontinuirnih in spačenih lamel (sl. 4). Cementitne lamele so najbolj degenerirane v temperaturnem področju transformacije, kjer je mikrostruktura perlitno bainitna. Taka mikrostruktura je prikazana na sliki 5. Pri nižjih temperaturah opazimo, da se je cementit izločil tudi po mejah avstenitnih zrn. Degeneracija cementnih lamel je manj izrazita, čim bolj se vsebnost C približuje eutektoidni sestavi in pri legiranih jeklih.

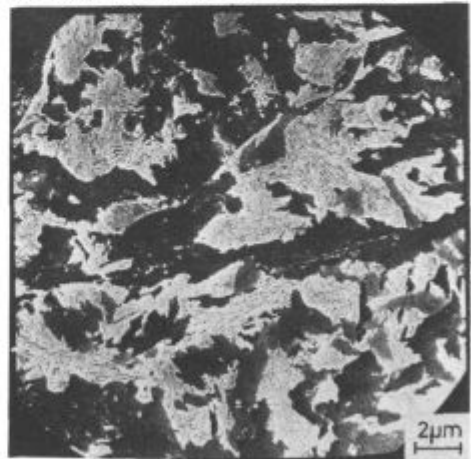
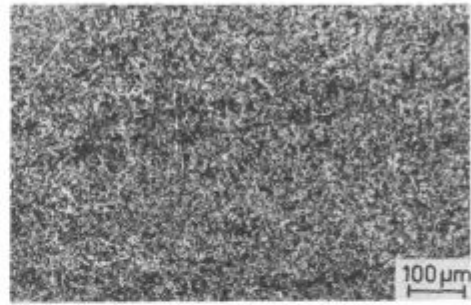


Slika 4b

Mikrostruktura jekla Č. 4230, posneta v optičnem mikroskopu in v SEM, deformiranega pri 950 °C in izotermno transformiranega pri 600 °C (perlit, s 0,09 μm).

Fig. 4b.

Microstructure of the steel Č 4230, seen in the optical microscope and in SEM, deformed at 950 °C and isothermally transformed at 600 °C (pearlite, s 0,09 μm)

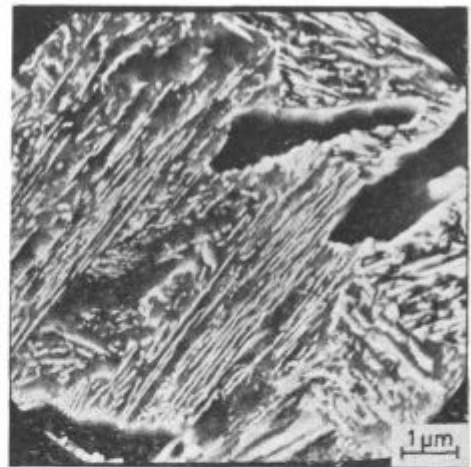


Slika 4c

Mikrostruktura jekla Č. 4230, posneta v optičnem mikroskopu in v SEM, deformiranega pri 950 °C in izotermno transformiranega pri 500 °C (bainit, bainitni ferit, perlit).

Fig. 4c.

Microstructure of the steel Č4230 as seen in the optical microscope and in SEM, deformed at 950 °C and isothermally transformed at 500 °C (bainite, bainitic ferrite, pearlite)



Slika 5

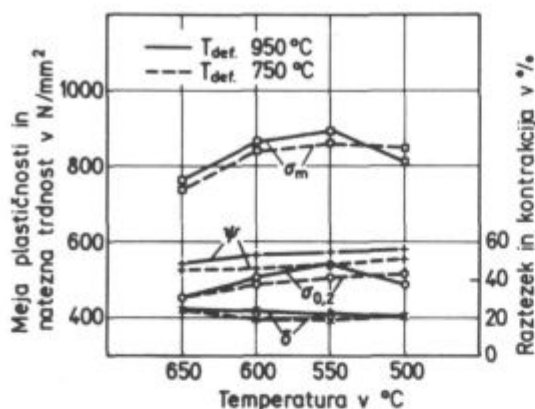
Mikrostruktura jekla Č. 1530, deformiranega pri 820 °C in izotermno transformiranega pri 500 °C (bainit, bainitni ferit, perlit).

Fig. 5.

Microstructure of the steel Č 1530, deformed at 820 °C and isothermally transformed at 500 °C (bainite, bainitic ferrite, pearlite)

#### 5. MEHANSKE LASTNOSTI

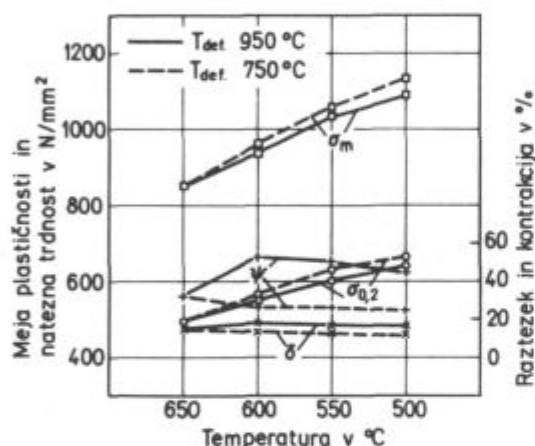
Mehanske lastnosti smo določili z nateznimi preizkusi. Meja plastičnosti in natezna trdnost jekel narašča-



Slika 6  
Vpliv temperature izotermne transformacije na mehanske lastnosti jekla Č. 1530.

Fig. 6.

Temperature influence of the isothermal transformation on the mechanical properties of the steel Č. 1530

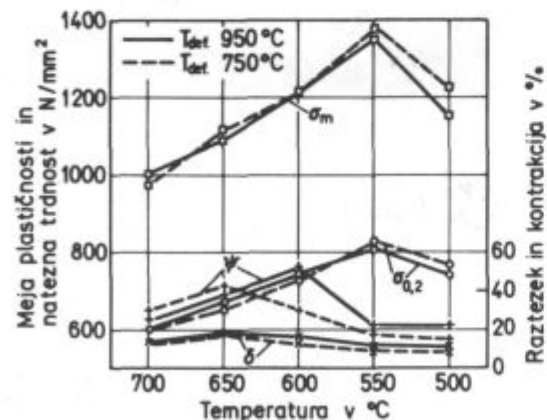


Slika 7

Vpliv temperature izotermne transformacije na mehanske lastnosti jekla Č. 1730.

Fig. 7.

Temperature influence of the isothermal transformation on the mechanical properties of the steel Č. 1730



Slika 8

Vpliv temperature izotermne transformacije na mehanske lastnosti jekla Č. 4230.

Fig. 8.

Temperature influence of the isothermal transformation on the mechanical properties of the steel Č. 4230

ta, ko se zmanjšuje medlamelarna razdalja, to je s padajočo temperaturo izotermne transformacije (sl. 6, 7, 8). V temperaturnem področju, ko dobimo pri transformaciji mešano mikrostrukturo iz perlita z degeneriranimi cementitnimi lamelami in iz grobega zgornjega bainita, meja plastičnosti in natezna trdnost padeta. Raztezek in kontrakcija sta podobno, vendar razen pri jeklu Č. 4230, v manjši meri odvisna od medlamelarne razdalje. Zlasti pri jeklu Č. 1530 je odvisnost neizrazita zaradi večjega deleža ferita v mikrostrukturi.

Pri natezni trdnosti in meji plastičnosti ni opaziti vpliva temperature deformacije, pri kontrakciji in deloma pri raztešku pa se opazi tendenca padanja vrednosti pri vzorcih, deformiranih pri nižjih temperaturah, ko v mikrostrukturi narašča delež nerekrystaliziranih zrn.

Na žilavost medlamelarna razdalja malo vpliva. Pri meritvah žilavosti smo opazili le tendenco, da imajo vzorci z manjšo medlamelarno razdaljo boljšo žilavost. Seveda pa ne smemo pozabiti, da vpliva na mehanske lastnosti tudi velikost kristalnih zrn.

Kar se tiče hladne preoblikovalnosti, se drobne cementitne lamelle lažje preorientirajo in jeklo ima boljšo kontrakcijo. Upoštevati pa moramo tudi mejo plastičnosti. Za dobro hladno predelavo želimo imeti pri dobri plastičnosti čim nižjo mejo plastičnosti, da je delo, potrebno za preoblikovanje, manjše.

## 6. KONTROLIRANO OHLAJANJE VALJANIH VZORCEV

Na osnovi teh preiskav smo vzorce istih jekel in jekla 45M5 (0,45 % C, 0,24 % Si, 1,30 % Mn, 0,02 % Al) zvaljali v več redukcijah v istem temperaturnem intervalu in izotermno transformirali pri enakih temperaturah. Da zagotovimo jeklu drobno lamelarno perlitno mikrostrukturo, moramo vzorce ohladiti na temperaturo izotermne transformacije tako hitro, da ne pride do kontinuirne perlitne transformacije. Pri tem moramo upoštevati, da poteka transformacija v jeklu z večjo deformacijsko energijo hitreje. Zato take pogoje ohlajanja lažje zagotovimo legiranim jeklom, ki imajo daljšo inkubacijsko dobo za pričetek perlitne transformacije. Rezultati teh preiskav so v primerih, ko smo vzorce ohladili na temperaturo izotermne transformacije pred pričetkom kontinuirne transformacije, podobni kot pri predhodnih raziskavah.

## 7. ZAKLJUČKI

Preiskave smo naredili z namenom, da opredelimo vpliv končne temperature deformacije, od katere je odvisno stanje avtenita (rekrystaliziran, delno rekrystaliziran, deformiran) in temperature izotermne transformacije na medlamelarno razdaljo, debelino cementitnih lamel in morfologijo perlita. Industrijsko izdelana jekla smo izbrali glede na kemično sestavo tako, da smo lahko določili tudi vpliv vsebnosti C, Mn in Cr na te parametre. Rezultate laboratorijskih preizkusov smo potrdili s preizkusi kontroliranega ohlajanja vzorcev, zvaljanih v več redukcijah.

Medlamelarna razdalja in debelina cementitnih lamel sta manjši, čim nižja je temperatura izotermne transformacije. Manjši sta tudi pri višji vsebnosti C in jeklih, legiranih z Mn in Cr. S padajočo transformacijsko temperaturo je v perlitu vedno več diskontinuirnih in spačnih lamel. Med popolnoma in delno rekrystaliziranimi in deformiranimi vzorci ter tudi nedeformiranimi vzorci nismo opazili razlik. Perlitna transformacija poteka hitreje v jeklu, ki ima več deformacijske energije. Meja



plastičnosti in natezna trdnost naraščata s padanjem medlamelarne razdalje in debeline cementitnih lamel. Razen pri jeklu Č. 4230 je ta odvisnost pri kontrakciji in raztežku manj izrazita. Opazi se padanje teh dveh parametrov, ko v mikrostrukturi narašča delež nerekrystaliziranih zrn. Mešana mikrostruktura iz degeneriranega perlita in grobega zgornjega bainita ima slabe mehanske lastnosti.

#### Literatura

1. R. W. K. Honeycombe: Transactions ISIJ; 1980, str. 139—146.
2. N. Shimizu, I. Tamura: Transactions ISIJ, 1978, str. 574—578
3. E. Hornbogen: Metallurgical Transactions, aug. 1979, str. 947—972
4. R. W. K. Honeycombe: Metal Science, jun. 1980, str. 201—214
5. J. V. Bee: Metallurgical Transactions, april 1978, str. 587—593
6. P. Pointner, K. Maier, F. Jeglitsch: HTM, 2, 1978, str. 71—83
7. D. J. Walker, R. W. Honeycombe: Metal Science, okt. 1978, str. 445—452
8. D. J. Walker, R. W. Honeycombe: Metal Science, maj 1980, str. 184—188
9. D. Cheetham, N. Ridley: Metal Science, 1975, str. 411—414
10. G. T. Eldis: J. Metals, marec, 1978, str. 5—10
11. H. Weissenberg, E. Hornbogen: Arch. Eisenhüttenwes., nov. 1979, str. 479—483
12. G. Kunze: HTM, 31978, str. 118—124
13. R. Wittek, P. Funke: Stahl und Eisen, 10, 1979, str. 509—513
14. D. Kmetič, F. Vodopivec, J. Žvokelj, K. Hribar: Raziskava perlitne transformacije v srednje in visoko ogljičnih jeklih za hladno vlečenje — I. del, Poročila Metalurškega inštituta v Ljubljani, 1978
15. D. Kmetič, F. Vodopivec, J. Žvokelj, K. Hribar: Raziskava perlitne transformacije v srednje in visoko ogljičnih jeklih za hladno vlečenje — II. del, Poročila Metalurškega inštituta v Ljubljani 1979
16. F. Vodopivec, A. Mežnar, A. Kelvišar: Železarski zbornik, 2, 1975, str. 81—87

### ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Untersuchungen war den Einfluss der Verformungsendtemperatur auf den Austenitzustand (rekristallisiert, teilweise rekristallisiert, verformt) und der Temperatur der isothermen Umwandlung auf die Lamellenentfernung, die Dicke der Zementitlamellen und die Morphologie von Perlit festzustellen. Aus der üblichen Produktion genommene Vergütungsstähle Č. 1530, Č. 1730, Č. 3134, 45M5 und Č. 4230 sind so gewählt worden, dass der Einfluss von C, Mn und Cr auf die erwähnten Parameter bestimmt werden konnte. Die Ergebnisse der laboratorischen Untersuchungen sind durch die Versuche kontrollierter Abkühlung der Proben, ausgewalzt in mehreren Stichen, bestätigt worden.

Die Lamellenentfernung und die Dicke der Zementitlamellen sind um so kleiner je niedriger die Temperatur der isothermen Umwandlung ist. Die sind auch kleiner bei höherem Kohlenstoffgehalt und bei den mit Mn und Cr legierten Stählen.

Mit der fallenden Verformungstemperatur gibt es im Perlit immer mehr unförmige Lamellen. Zwischen der vollkommen und teilweise rekristallisierten und verformten und auch nichtverformten Proben konnten keine Unterschiede beobachtet werden. Die Perlitumwandlung verläuft schneller im Stahl mit höherer Verformungsenergie.

Die Streckgrenze und die Zugfestigkeit steigen bei fallender Lamellenentfernung und der Dicke der Zementitlamellen. Ausser bei dem Stahl Č. 4230 ist diese Abhängigkeit bei der Bruchschärfung und bei der Dehnung weniger ausgeprägt. Ein Fallen dieser zwei Parameter kann beobachtet werden, mit dem wachsenden Anteil der nichtrekristallisierten Körner in der Mikrostruktur. Eine gemischte Mikrostruktur aus degeneriertem Perlit und grobem oberem Bainit besitzt schlechte mechanische Eigenschaften.

### SUMMARY

The investigations were made to determine the influence of final deformation temperature which influences the state of austenite (recrystallized, partially recrystallized, deformed), and of temperature of isothermal transformation on the interlamellar spacing, the thickness of cementite lamellae, and the morphology of pearlite. Industrially manufactured steel Č. 1530, Č. 1730, Č. 3134, 45M5, and Č. 4230 were chosen according to their chemical composition. Thus simultaneously also the influence of C, Mn, and Cr contents on these parameters was determined. The results of laboratory tests were confirmed by the test made on samples which were controlled cooled and rolled in more passes.

The interlamellar spacing and the thickness of cementite lamellae decrease with the decreased temperature of isothermal transformation. They are reduced also at higher carbon

content in steel alloyed with manganese and chromium. The decreasing transformation temperature causes that more and more discontinuous and distorted lamellae appear in pearlite. No differences were observed between the completely and partially recrystallized samples, neither between the deformed and the undeformed ones. Pearlitic transformation is faster in steel with higher deformation energy.

The yield point and the tensile strength increase with the reduced interlamellar spacing and the thickness of cementite lamellae. With the exception of Č. 4230 steel this relationship is less pronounced in contraction and elongation. The reduction of the two parameters can be observed when the portion of not recrystallized grains is increased in the microstructure. The mixed microstructure composed of divorced pearlite and coarse upper bainite has bad mechanical properties.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования выполнены с целью, чтобы определить влияние окончательной темп-ры деформации от которой зависят: состояние аустенита (рекристаллизационное, частично рекристаллизационное, деформированное), температура изотермической трансформации на межпластинчатое расстояние, толщина цементитных ламель и морфология перлита. Стали  $\dot{C}$ . 1530,  $\dot{C}$ . 1730,  $\dot{C}$ . 3134 45 M5 и  $\dot{C}$ . 4230, изготовленные промышленным способом были выбраны, взяв во внимание химический состав, так, что можно было также установить влияние  $C$ ,  $Mn$  и  $Sr$  на эти параметры. Результаты лабораторных опытов были подтверждены исследованием контрольных образцов с несколькими сокращениями.

Межпластинчатое расстояние и толщина ламель цементита тем меньше, чем ниже темп-ра изотермической трансформации.

Ламели также меньше при высшем содержании  $C$  и при сталях, легированных с  $Mn$  и  $Sr$ . С снижением темпе-

ратуры превращения в перлите оказываются все больше прерывных и бесформенных ламель.

Между вполне и частично рекристаллизированных и деформированных, а также недеформированных образцах разниц не было обнаружено. Перлитное превращение протекает быстрее в стали, которое содержит больше энергии деформации.

Предел пластичности и предел прочности при растяжении увеличиваются с снижением межпластинчатого расстояния и толщины ламель цементита. За исключением при стали марки  $\dot{C}$ . 4230 эта зависимость менее выразительна при сокращении и растяжении.

Отмечено падение этих параметров когда в микро-структуре увеличивается доля нерекристаллизированных зёрен. Разнородная микроструктура, состоящая из вырожденно перлита и грубого верхнего бейнита имеет очень плохие механические свойства.