

MIKROSTRUKTURA A MECHANICKÉ VLASTNOSTI LEGOVANÝCH KOLEJNICOVÝCH OCELÍ

Libor BENEŠ ^{a)}, Rudolf FORET ^{b)}, Ervín KARZMARCZYK ^{c)}, Jaroslav PINDOR ^{c)}

^{a)} Katedra dopravních prostředků, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice

^{b)} Ústav materiálového inženýrství, VUT Brno

^{c)} Třinecké železárně a.s., Výzkumný ústav, Třinec

ÚVOD

Zlepšení mechanických vlastností kolejnicových ocelí, vyráběných v Třineckých železárnách, je zaměřeno především na zlepšení otěruvzdornosti (odolnosti proti opotřebení kluzným a valivým třením), zvýšení únosnosti profilu (odolnosti proti zploštění hlavy profilu) a zvýšení odolnosti materiálu proti vzniku únavových a křehkých lomů. Doposud realizované práce ukázaly, že požadovaných parametrů lze dosáhnout současným zvýšením meze kluzu a meze pevnosti v tahu, zlepšením makro- a mikročistoty (včetně snížení obsahů síry a fosforu), zjemněním austenitického zrna a snížením obsahu proeutektoidního feritu.

Kvalitu kolejnicových ocelí lze podle [1] zvyšovat třemi následujícími způsoby:

- a) snížením obsahů prvků, jejichž přítomnost zhoršuje čistotu oceli (jedná se především o snahu minimalizovat výskyt oxidických vměstků),
- b) zvýšením pevnostních a plastických vlastností stávajících uhlíkových ocelí s perlitickou mikrostrukturou buď aplikací tepelného zpracování hlavy kolejnice, s cílem dosáhnout hodnot $R_m \sim 1200$ MPa, nebo legováním Cr,

Si, Mo, V (popřípadě kombinací těchto legujících prvků), které vede rovněž k hodnotám $R_m \sim 1200$ MPa, ovšem bez dalšího tepelného zpracování,

- c) zvýšením pevnostních a plastických vlastností (meze pevnosti v tahu ~ 1400 MPa, tažnosti $\sim 40\%$) legováním Cr, Mo, Si a tepelným zpracováním za vzniku bainitické mikrostruktury.

V příspěvku je řešena problematika ad b) - konkrétně byl studován vliv legování Cr a kombinacemi Cr-V a Cr-Mo na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti perlitické kolejnicové oceli.

1. MATERIÁL A EXPERIMENTÁLNÍ METODY

2.1 Chemické složení

Chemické složení materiálů studovaných kolejnic je uvedeno v Tab.1.

Tab. 1 Chemické složení zkoušených kolejnic v hmotnostních %

Č.kolej.	C	Mn	Si	P	S	Cr	Al _c	Pozn.
1	0.74	0.93	0.36	0.021	0.010	0.11	0.003	Mn ocel
2	0.80	1.14	0.42	0.019	0.013	1.11	0.003	MnCr ocel
3	0.79	1.16	0.40	0.019	0.015	1.08	0.003	MnCr ocel
4	0.78	1.02	0.33	0.014	0.010	1.12	0.010	MnCrMo ocel
5	0.72	1.12	0.41	0.012	0.016	1.09	0.006	MnCrV ocel
6	0.74	1.12	0.41	0.016	0.009	1.12	0.008	MnCrV ocel
7	0.63	1.04	0.38	0.014	0.012	0.88	0.009	MnCrMo ocel
8	0.69	1.11	0.36	0.012	0.010	1.07	0.007	MnCrV ocel
9	0.65	1.10	0.37	0.016	0.011	0.91	0.009	MnCrMo ocel

Podle chemického složení lze analyzované oceli rozdělit na tyto typy :

- ♦ 1) Mn ocel - 0.74C/0.9Mn, kolejnice č. 1
- ♦ 2) MnCr ocel - 0.80C/1.2Mn/1.1Cr, kolejnice č. 2, 3
- ♦ 3) MnCrV ocel - 0.70C/1.2Mn/1.1Cr/0.06 až 0.15V, kolejnice č. 5, 6, 8
- ♦ 4) MnCrMo ocel - 0.78C/1.0Mn/1.1Cr/0.16Mo, kolejnice č. 4
- ♦ 5) MnCrMo ocel - 0.65C/1.0Mn/0.9Cr/0.14Mo, kolejnice č. 7, 9

2.2 Rozbor mikrostruktury

Mikročistota byla hodnocena podle DIN 50 602-M, tj. stanovením nejvyššího pozorovaného charakteristického stupně znečištění.

Hranice původních austenitických zrn (dále AZ) byly vyvolány leptadlem o složení 10 g kyseliny pikrové, 100 ml ethylalkoholu, 1000 ml destilované vody a 50 ml smáčedla (Citowal), při teplotě asi 70°C. Velikost AZ byla hodnocena podle ČSN 42 0463 metodou počítání zrn. Mezilamelární vzdálenost perlitu (dále MLVP) byla hodnocena tzv. zdánlivou mezilamelární vzdáleností "s", jak je definována v práci [2], a to ze snímků perlitu pořízených při 10.000-násobném zvětšení v SEM.

2.3 Zkoušky mechanických vlastností

Zkušební tělesa pro zkoušky mechanických vlastností byla vyrobena z hlavových částí kolejnic tak, že podélné osy zkušebních tyčí byly orientovány rovnoběžně s podélnou osou kolejnic.

Tahové zkoušky byly provedeny na tyčích ϕ 6-30 mm. Zkoušky rázem v ohybu byly provedeny na tyčích dle ČSN 420381 (KCU2) v intervalu teplot -30 až 300 °C v souladu s ČSN 420381 a 420383. Zkoušky rázem v ohybu byly doplněny o fraktografický rozbor v SEM.

Lomová houževnatost byla měřena na tělesech A/12.5 ČSN 420347.1; k jejímu hodnocení bylo použito buď kritické hodnoty K_{IC} nebo tzv. informativní hodnoty K_C v těch případech, kdy hodnoty meze kluzu byly nižší než 500 MPa.

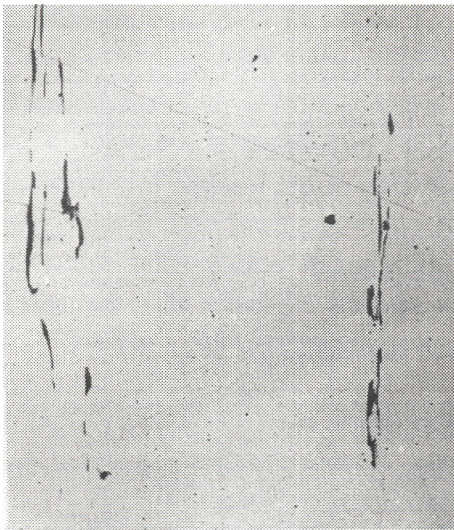
3. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

3.1 Rozbor mikrostruktury

V materiálu hodnocených kolejnic převládaly protvářené sulfidy manganu II. typu (ozn. SS), jejichž plošný obsah byl značně proměnlivý a lokálně dosahoval až stupně 6 (Obr. 1). Komplexní oxidy (ozn. OA) se vyskytovaly v podstatně menším rozsahu. Maximální zjištěné stupně znečištění jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Velikost zrna austenitu, mezilamelární vzdálenosti perlitu a vyhodnocení mikročistoty

Č. kolejnice	Velikost zrna austenitu (AZ)	Mezilamelární vzdálenost perlitu (MLVP)	Mikročistota DIN 50 602-M	
	D[μm] N	s [μm]	SS	OA
1	48 \pm 3 5 - 6	0.36 \pm 0.09	3	2
2	47 \pm 5 5 - 6	0.25 \pm 0.06	5	3
3	58 \pm 5 5	0.24 \pm 0.09	5	3
5	47 \pm 3 5 - 6	0.34 \pm 0.15	4	2
6	49 \pm 3 5 - 6	0.27 \pm 0.09	3 - 4	3
8	46 \pm 5 5 - 6	0.34 \pm 0.11	5	3
4	51 \pm 6 5 - 6	0.57 \pm 0.17	3	3
7	43 \pm 5 6	0.28 \pm 0.10	5	3
9	46 \pm 5 5 - 6	0.33 \pm 0.15	3	2



Obr. 1

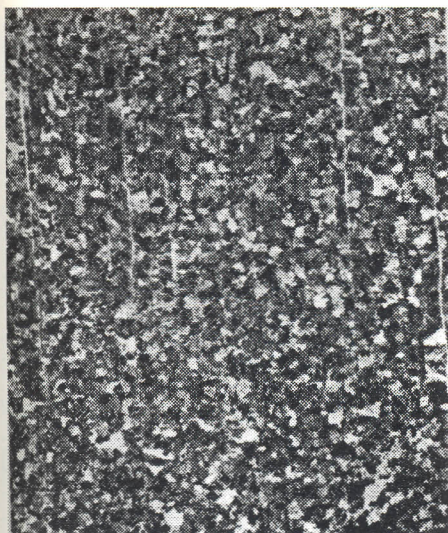


Obr. 2

Obr. 1 Typické pruhy sulfidických vměstků, kolejnice č. 1, zv. 80x.

Obr. 2 Mikrostruktura perlitu, kolejnice č. 2, zv. 150x.

Čistě perlitická mikrostruktura byla pozorována v materiálu kolejnic vyrobených z ocelí typu Mn, MnCr a MnCrV. Tato mikrostruktura byla v Mn oceli homogenní (Obr. 2), v případě kolejnic z MnCr a MnCrV ocelí bylo možné pozorovat značnou heterogenitu ve velikosti perlitických kolonií (Obr. 3). V ocelích MnCrMo (kolejnice 4, 7 a 9) rovněž převládal perlit, avšak bylo zde možné pozorovat i více či méně souvislé řádky proeutektoidního feritu, často v koexistenci se sulfidy manganu (Obr. 4).



Obr. 3



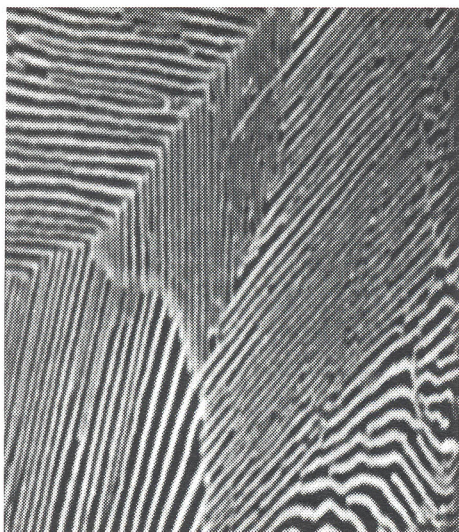
Obr. 4

Obr. 3 Perlit a souvislé linie proeutektoidního feritu, kolejnice č.7, zv.12x.

Obr. 4 Detail z obr. 3, zv.150x.

Hodnoty MLVP jsou uvedeny v Tab. 2, lamelární morfologie perlitu je patrná z Obr. 5. Tab. 2 rovněž obsahuje informaci o velikosti AZ. Morfologie AZ je zřejmá z Obr. 6, Obr. 7 a Obr. 8. Nutno připustit, že údaje o velikosti AZ mohou být zkresleny současným leptáním i některých hranic perlitických kolonií.

Použitý způsob leptání hranic zrn většinou vedl k nerovnoměrnému naleptání, intenzivnější leptání hranic zrn bylo možné pozorovat v oblastech s výskytem sulfidů manganu II. typu, tedy v původních mezidendritických prostorech. Použité leptadlo přednostně naleptává oblasti obohacené o fosfor, z čehož lze nepřímo usuzovat, že intenzivněji naleptané oblasti mají zvýšenou koncentraci nejen legur, ale i fosforu, popřípadě i dalších povrchově aktivních prvků. Zvýšená koncentrace C, Mn, Cr a Mo v oblastech se snadnější leptatelností hranic zrn byla prokázána v práci [3]. AZ měla silně nepravidelný tvar. S výjimkou Mn oceli (Obr. 5) je velikost AZ značně heterogenní (Obr. 6, Obr. 7).



Obr. 5

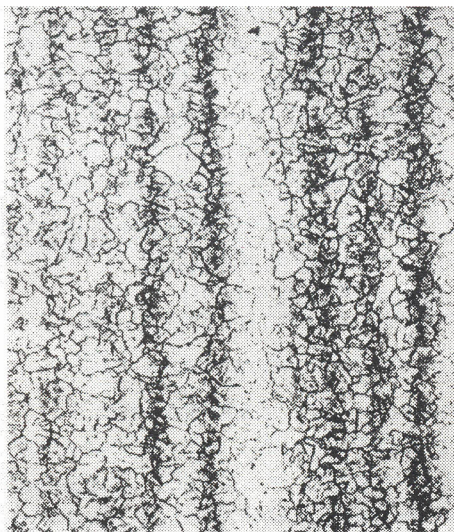


Obr. 6

Obr. 5 Lamelární morfologie perlitu, kolejnice č. 3, zv. 5000x.

Obr. 6 Morfologie austenitických zrn, kolejnice č. 1, zv. 100x.

Pásovitost struktury, dokumentovaná např. na Obr. 7 a Obr. 8, byla způsobena rozdílnou leptatelností a velikostí AZ a byla pozorována na všech typech studovaných ocelí, zejména pak u kolejnic z MnCrV a MnCrMo ocelí.



Obr. 7



Obr. 8

Obr. 7 Morfologie austenitických zrn, kolejnice č. 2, zv. 50x.

Obr. 8 Morfologie austenitických zrn, kolejnice č. 7, zv. 100x

3.2 Zkoušky mechanických vlastností

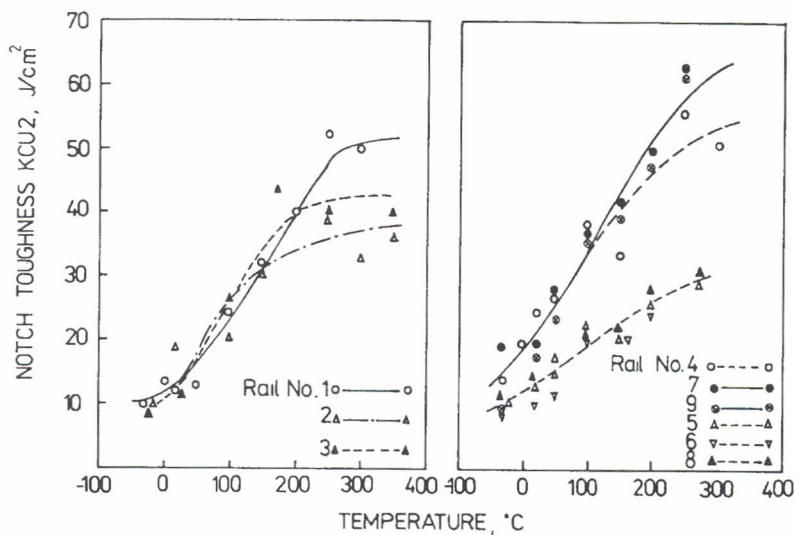
Z výsledků zkoušek tahem, uvedených v Tab.3, vyplývají tyto závěry:

- a) legování chromem vedlo k současnému zvýšení maximálních hodnot meze kluzu až o 300 MPa a hodnot pevnosti v tahu o 250 MPa při stejné nebo jen mírně zvýšené úrovni hodnot tažnosti a kontrakce,
- b) mikrolegování MnCr oceli vanadem za současného snížení obsahu uhlíku o 0.08 hm.% vedlo ke zmenšení rozptylu hodnot meze kluzu a k jejich zvýšení asi o 100 MPa, za současného mírného poklesu hodnot kontrakce,
- c) náhrada vanadu molybdenem a další snížení obsahu uhlíku mělo za následek mírné zpevnění a zvýšení hodnot tažnosti a zejména kontrakce.

Tab. 3 Naměřené hodnoty parametrů mechanických vlastností

Č.kolejnice	Mez kluzu R_e [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost [%]	Kontrakce [%]	Lomová houževnatost [Mpa·m ^{0.5}]	
					K_{Ic}	K_C
1	479±80	929±18	12.5±0.4	26.8±3.6		38±1
2	552±160	1133±4	10.9±1.8	19.1±9.2		40±3
3	605±226	1194±52	14.2±0.4	30.5±7.3	36±6	
4	615±1	1048±9	7.0±0.2	21.6±0.3		46±8
5	774±81	1155±16	8.0±1.7	15.7±1.4	35±2	
6	771±85	1168±31	9.5±0.4	16.8±2.7		37±2
7	841±27	1176±40	13.5±1.2	37.9±1.2		
8	718±15	1136±19	11.1±1.7	23.6±7.4	36±2	
9	801±6	1180±21	14.1±8.9	41.2±8.9	41±1	

Vliv zkušebních teplot na hodnoty vrubové houževnatosti KCU2 je patrný z Obr. 9.



Obr. 9 Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti KCU 2 v závislosti na teplotě.

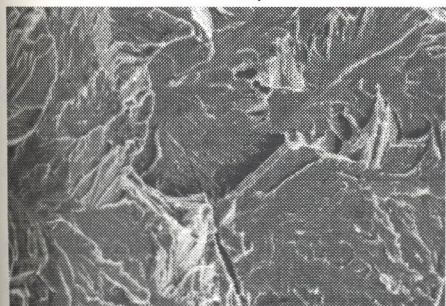
Tyto závislosti byly pro jednotlivé typy ocelí v podstatě shodné. Minimální hodnoty KCU2 pro jednotlivé zkušební teploty vykazovala MnCrV ocel; naopak maximálních hodnot bylo dosaženo na MnCrMo ocelích. V Tab. 4 jsou pak uvedeny hodnoty tranzitních teplot T_{25} a T_{35} (teploty odpovídající hodnotám vrubové houževnatosti 25 a 35 Jcm⁻²) a tranzitní teploty T_i (teplota spojená se změnou mechanismu porušování v oblasti iniciace z transkrystalického štěpení TŠ na transkrystalický lom tvárný TT).

Tab. 4 Naměřené hodnoty tranzitních teplot

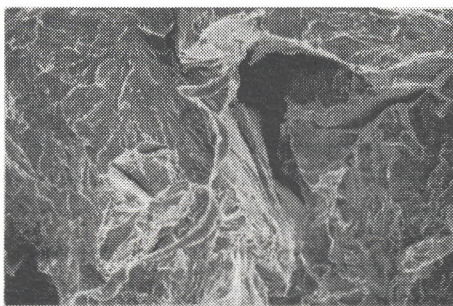
Č. kolejnice	Typ oceli	Tranzitní teploty [°C]		
		T_{25}	T_{35}	T_i
1	Mn	120	180	100 - 150
2, 3	MnCr	80 - 120	120 - 220	~100
5, 6, 8	MnCrV	130	250	100 - 150
4	MnCrMo	40	90	~20
7, 9	MnCrMo	15	65	~20

Výrazně nejnižších tranzitních teplot bylo dosaženo pro případ zkoušení MnCrMo ocelí, které se mohou vyskytovat v semikřehkém stavu již při teplotě 20°C, zatímco ostatní oceli vykazovaly křehké chování do teplot 100 až 150°C.

Z Tab. 3 je patrné, že MnCrMo oceli současně vykazovaly i nejvyšší hodnoty lomové houževnatosti K_{IC} a K_{IC} ; rozdíly mezi jednotlivými typy ocelí však nejsou významné. Zkoušky rázem v ohybu byly doplněny o podrobný fraktografický rozbor lomových ploch v SEM. V intervalu použitých zkušebních teplot se vyskytovalo křehké a semikřehké porušení studovaných typů ocelí. V případě křehkého porušení se v oblastech bezprostředně pod vrubem uplatňovalo pouze TŠ porušení, a to až do teplot T_j . Na největší části lomové plochy (vzhledem k její velikosti), která korespondovala s oblastí nestabilního šíření, se uplatňoval především TŠ spolu s TT mechanismem porušování. Jamková morfologie TT porušování se objevovala převážně pouze na stupních spojujících štěpné fazety. Na lomových plochách bylo dále možné pozorovat četné sekundární, patrně interkrystalické trhliny, Obr. 10a. V případě MnCr a MnCrV ocelí byl dále zaznamenán výskyt interkrystalických fazet, které sledovaly hranice zrn původního austenitu nebo kolonií perlitu, Obr. 10b.



Obr. 10a



Obr. 10b

Obr. 10 Ukázka lomových ploch vzorků ze zkoušky rázem v ohybu, na kterých lze identifikovat sekundární interkrystalické trhliny (a) a interkrystalické fazety (b).

4. ROZBOR VÝSLEDKŮ

Legování "základní" Mn oceli chromem vedlo k výraznému zvýšení meze kluzu a pevnosti v tahu; ostatní hodnoty charakteristik mechanických vlastností přitom zůstaly nezměněny. Mikrolegování MnCr oceli vanadem nemělo výrazný vliv na pevnostní charakteristiky, došlo však ke snížení hodnot tvárnosti a houževnatosti, zejména hodnot KCU2. Legování MnCr oceli molybdenem se projevilo mírným zvýšením pevnosti v tahu téměř na úroveň 1200 MPa, za současného zvýšení hodnot tažnosti, kontrakce (až na hodnotu téměř 40%) a vrubové houževnatosti. Současně u této MnCrMo oceli došlo ke snížení tranzitní teploty T_i přibližně o 80°C.

Všeobecně je přijímáno (např. [4] až [6]), že mez kluzu, pevnost v tahu a tažnost jsou určovány především velikostí MLVP, zatímco vrubová a lomová houževnatost jsou inverzní funkcí velikosti AZ.

Mikulec [6] studoval mj. vliv legování Cr, Mn, Ni, Si a mikrolegování molybdenem na MLVP v perlitických ocelích při izotermické transformaci v oblasti perlitu. Autor práce [6] zjistil, že přísada Cr vede ke zjemnění MLVP, zatímco přítomnost Mo má za následek zvětšení mezilamelární vzdálenosti. Při legování Mn se vliv na MLVP nijak výrazněji neprojevil. Účinek vanadu závisí na formě jeho výskytu; pokud je vázán na karbidy nerozpuštěné v austenitu, které se podílejí na zjemnění AZ, pak mikrolegování vanadem může mít vliv na zvětšení MLVP.

Z Tab. 2 je zřejmé, že velikost AZ jednotlivých typů ocelí je v mezích rozptýlu shodná, nicméně minimální střední hodnoty "d" byly naměřeny pro MnCrMo oceli. Legování chromem vedlo ke zmenšení MLVP z hodnoty 0.36 μm na hodnotu 0.2 μm . Mikrolegování V a Mo vedlo v případě MnCr ocelí jen k mírnému zvětšení hodnot MLVP s výjimkou kolejnice č.4, kde toto zvýšení bylo dosti výrazné. Pozorované změny MLVP jsou v kvalitativní shodě s poznatky Mikulce [6].

V souladu s názory autorů práce [4] je možno se domnívat, že pozorované změny mechanických vlastností v důsledku legování Cr, případně kombinací CrMo, souvisejí především s ovlivněním vlastností feritu a až následně s pozitivním vlivem zjemnění velikosti AZ a MLVP.

Autoři práce [7] mj. ukázali, že v případě kolejnicové oceli se složením 0.5-0.6 C; 1.0-1.3 Mn; 0.5-0.7 Cr vedlo mikrolegování vanadem v rozsahu 0.05-0.20 % ke zvýšení hodnot pevnosti a odolnosti proti opotřebení v důsledku zmenšení velikosti perlitických kolonií a MLVP. Mikrolegování vanadem v daném případě vedlo k rozdrobení síťoví sekundárního cementitu v nadeutektoidní oceli s pozitivním vlivem na její mechanické vlastnosti. Pozorované zkřehnutí studované MnCrV oceli patrně souvisí s mezifázovou precipitací karbidu vanadu v perlitickém feritu; tento předpoklad by však bylo nutné ověřit.

Na lomových plochách vzorků po zkouškách rázem v ohybu byly v případě MnCr a MnCrV ocelí pozorovány interkrystalické fazety, které sledovaly hranice AZ a kolonií perlitu. Tento interkrystalický průběh byl potvrzen v práci [3] na příčných metalografických výbrusech. Lze předpokládat, že příčinu tohoto defektního mechanismu porušování je nutné hledat v segregaci fosforu a dalších povrchově aktivních prvků. Tento degradační mechanismus se bude výrazněji uplatňovat s rostoucí hladinou pevnosti a s rostoucím obsahem některých legur, tzv. kosegregace.

5. ZÁVĚR

Provedné experimentální práce potvrdily představu o možnosti zlepšení mechanických vlastností kolejnicových ocelí s perlitickou strukturou legováním chromem a zejména kombinací chrom-molybden. Použití kombinace chrom-vanad se jeví jako neperspektivní vzhledem k nevyhovujícím křehkolomovým vlastnostem.

S rostoucí úrovní pevnosti a obsahu legur se i u ocelí s perlitickou mikrostrukturou mohou začít výrazně uplatňovat degradační mechanismy obvyklé u zušlechťených ocelí, jako jsou segregace povrchově aktivních prvků a anizotropie mechanických vlastností v důsledku chemické a s tím související strukturní heterogenity.

Lektoroval: Doc. Ing. Jiří Švejcar, CSc.

Předloženo v listopadu 1996.

LITERATURA

- [1] Karczmarczyk, E. - Kufa, T. - Matušek, P. : Material Level of TŽ Rails in Comparison with Rails of Prominent European Producers. *Hutnické listy* 49, 1994, 7-8, p. 34.
- [2] Luštik, J. - Pelikán, K. - Ševčík, A. : In. *Metallographic Symposium. High Tatras 1986*, p. 36.
- [3] Foret, R. - Hudec, R. - Janová, D. : Contribution to Elucidate Reasons of the Brittleness of Rails. Part II. Res. Rep., Tech. Univ. Brno, 1995.
- [4] Nakase, K. - Bernstein, I.M. : The Effects of Alloying and Micro structure on the Strength and Fracture Resistance of Pearlitic Steel. *Met. Trans.* 19A, 1988, p. 2819.
- [5] Lewandowskij, J. - Thompson, J.V. : Effects of the Prior Austenite Grain Size on the Ductility of Fully Pearlitic Eutektoid Steel. *Met. Trans.* 17A, 1986, p. 461.
- [6] Mikulec, Z. : New Materials for Steel Production. *Hutnické aktuality* 25, 1984, No. 7.
- [7] Sing, U.P. - SING, R. - JHA, S. : Influence of Microalloying on Fracture Toughness and Wear Resistance of Rail Steel. *Scan.J.Met.* 24, 1995, p. 1280.
- [8] Han, K. et al. : Effect of Vanadium on Microstructure and Hardness of Hypereutektoid Pearlitic Steels. *Mat. Sci. Eng. A190*, 1995, p. 207.

Resumé

MIKROSTRUKTURA A MECHANICKÉ VLASTNOSTI LEGOVANÝCH KOLEJNICOVÝCH OCELÍ

Libor BENEŠ, Rudolf FORET, Ervín KARCZMARCZYK, Jaroslav PINDOR

V příspěvku jsou uvedeny výsledky studia vlivu legování perlitické kolejnicové oceli UIC 900A chromem a kombinacemi chrom-vanad a chrom-molybden na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti, a to při zachování perlitické mikrostruktury. Nejvyšších hodnot charakteristik pevnosti, tvárnosti a zejména houževnatosti bylo dosaženo pro legování kombinací chrom-molybden.

Summary

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOYED PEARLITIC STEELS FOR RAILS

Libor BENEŠ, Rudolf FORET, Ervín KARCZMARCZYK, Jaroslav PINDOR

In this paper results of studies concerning the influence of alloying elements in pearlitic steel used for rails UIC 900A are presented, when alloyed with chromium, and with combinations of chromium-vanadium and chromium-molybdenum, on the microstructure and mechanical properties, preserving pearlitic microstructure. The highest rates of strength, ductility, and especially toughness were reached for combination of chromium-molybdenum alloying.

Zusammenfassung

MICROSTRUCTUR UND MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DER LEGIERTEN SCHIENENSTÄHLE

Libor BENEŠ, Rudolf FORET, Ervín KARCZMARCZYK, Jaroslav PINDOR

In diesem Beitrag werden Studiumsergebnisse des Einflusses der durch Chrom, Chrom-Vanadium und Chrom-Molybdän Kombinationen durchgeführten Legierung eines perlitischen Schienenstahls UIC 900A auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften angeführt, und zwar unter der Beibehaltung der perlitischen Mikrostruktur. Die höchsten Werte der Festigkeit, Verformbarkeit und vorzugsweise der Zähigkeit wurden durch eine Legierungskombination Chrom Molybdän erreicht.