

Mechanické vlastnosti a lomové chování bainitické oceli na odlitky a její využití v srdcovkách výhybek

Klíčová slova: *srdcovka, bainitická ocel na odlitky, lomová houževnatost.*

1. Úvod

Současná etapa rozvoje železniční dopravy je charakterizována zvyšováním rychlosti, růstem nápravového zatížení, zvyšováním ročního přepravovaného objemu a v neposlední řadě požadavkem na prodloužení provozní životnosti kolejnic (trati). V důsledku tohoto trendu se výrazně zvyšují nároky na jakost materiálu kolejnic. Ocel UIC 900A s plně perlitickou strukturou, vyvinutá v 70. letech, se široce uplatnila ve světovém měřítku ve stavbě normálně namáhaných tratí. Pro více namáhané tratě byla vyvinuta jakost 1100 ($R_m > 1075$ MPa), která se osvědčila z hlediska opotřebení jak ve velkých, tak i malých obloucích. Pro extrémně namáhané tratě s vysokým nápravovým zatížením pak byla vyvinuta jakost s pevností v tahu $R_m > 1180$ MPa. I přes tuto vysokou hodnotu zvyšování pevnosti kolejnicových ocelí neskončilo [1-4].

Východiskem pro další vývoj byly oceli s bainitickou strukturou, u nichž lze dosáhnout pevnosti až 1400 MPa, aniž se projeví snížení lomové houževnatosti. Právě ta je podle Muderse a kol. [1] hlavním požadavkem při vývoji nových jakostí vysoce pevných ocelí.

Cílem vývoje bainitických ocelí nové generace bylo zachování pozitivních vlastností bainitu v porovnání s perlitem, zejména houževnatosti, a na druhé straně dosáhnout pevnosti oceli UIC 900A, která se z hlediska odolnosti proti opotřebení v normálním provozu osvědčila. Vyvinutá bainitická ocel (TB900 [1]) vykazovala pevnost v tahu 1020 MPa a tažnost $A_5 = 19 \div 20$ %, čímž výrazně převyšuje oceli s perlitickou strukturou stejné pevnosti. V současné době byly kolejnice této jakosti zabudovány na německých tratích (DB) s nejrůznějšími provozními podmínkami (rychlost, zatížení, oblouky), aby se zjistily vlastnosti při styku kola – kolejnice z hlediska opotřebení a kontaktní únavy.

Singh a kol. [3] po laboratorním vývoji vyrobili dvě tavby a vyválcovali kolejnice s různou bainitickou strukturou. Chemické složení taveb se lišilo v obsahu uhlíku (0,44 % C až 0,37 %), ostatní legující prvky byly prakticky stejné. Základní mechanické vlastnosti

Miloslav Holzmann, Doc. Ing., CSc., nar. 1929. Absolvent VUT Brno, obor strojní inženýrství - materiály. Nyní emeritní pracovník ÚFM AVČR Brno, skupiny Křehký lom.

Ivo Dlouhý, Doc. Ing., CSc., nar. 1955. Absolvent VŠB Ostrava, obor fyzikální metalurgie, vědecká výchova v Ústavu fyzikální metalurgie ČSAV. Nyní vedoucí skupiny Křehký lom Ústavu fyziky materiálů AVČR.

Josef Zbořil, Ing., nar. 1941. Absolvent VUT Brno, obor dopravní stroje a manipulační zařízení. Nyní v DT výhybkárna a mostárna, s.r.o. Prostějov, vedoucí inženýr technického rozvoje.

charakteristiky, nárazová práce, lomová houževnatost a mez únavy této oceli byly porovnávány s perlitickou ocelí jakosti 880. Hodnota pevnosti v tahu u bainitické oceli s obsahem uhlíku 0,44% byla $R_m = 1239 \div 1352$ MPa, u oceli s obsahem 0,37 %C $R_m = 1155 \div 1214$ MPa.

To, co platí o nárocích na jakost materiálu pro kolejnice, platí v dvojnásobné míře o jakosti materiálu na výrobu srdcovek, které jsou nejvíce namáhanou komponentou tratě. Podle Davise a kol. [4] může být dynamické zatížení srdcovek 1,5x až 3x větší než zatížení kolejnice v přímém úseku tratě. V důsledku tohoto dynamického zatížení při současném zvýšení nápravového zatížení a rychlosti, již oceli na odlitky s vysokým obsahem Mn a austenitickou strukturou, doposud široce využívané, nepostačují. Na objednávku AAR (Association of American Railroads) byl před pracovníky výzkumu postaven úkol vyvinout novou ocel s bainitickou strukturou pro tratě s vysokým nápravovým zatížením. Vyvinutá ocel na odlitky s pevností v tahu $R_m = 1560$ MPa vykázala za stejných dynamických podmínek zatížení lepší vlastnosti než austenitická Mn ocel.

Český výrobce srdcovek (DT Výhybkárna a mostárna, spol. s r.o. Prostějov) v rámci svého vývojového programu „Bainitické oceli pro odlitky srdcovek“ navrhl již v roce 1996 vlastní nový materiál s označením Lo8CrNiMo (Zbořil [5]) a pokračuje v jeho testování.

Cílem příspěvku je hodnocení mechanických vlastností a lomového chování nově vyvinuté oceli na odlitky a jejich porovnání s ocelmi na kolejnice používanými podle standardů UIC v Evropě a AREA v USA a Kanadě. Zvláštní pozornost bude přitom věnována vyšetření odolnosti proti křehkému lomu a její porovnání s odolností proti křehkému lomu kolejnice UIC 60, jakosti materiálu 900 A.

2. Materiál, zkušební tělesa a metodiky

Materiál a zkušební tělesa

Jako výchozí materiál byla použita ocel na odlitky (Lo8CrNiMo) s chemickým složením uvedeným v tabulce 1. Z této oceli byla odlita část kolejnice typu UIC 60 o délce 0,75 m. Odlitek byl zpracován tak, aby struktura reprezentovala strukturu odlitých a tepelně zpracovaných srdcovek. Pro porovnání byla použita kolejnicová ocel UIC 60 jakosti 900 A.

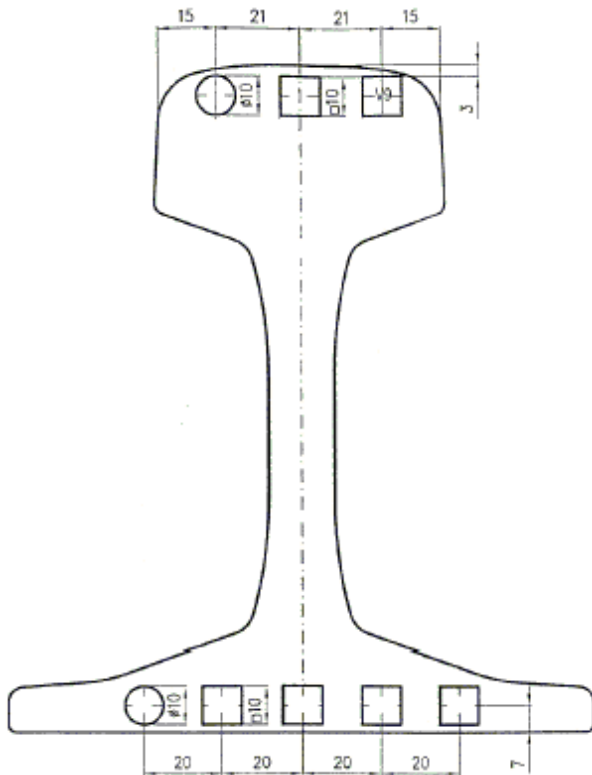
Tabulka 1: Nominální chemické složení bainitické oceli Lo8CrNiMo a oceli jakosti 900A

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Lo8CrNiMo	0,11-0,15	< 0,5	0,5-0,8	< 0,015	< 0,012	1,6-2,0	2,6-3,0	0,4-0,5
900A	0,6-0,8	0,1-0,5	0,8-1,3	< 0,040	< 0,040	-	-	-

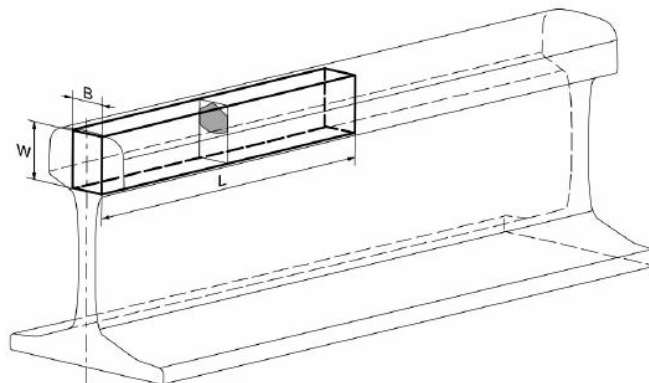
Z výše uvedených částí kolejnic byla vyrobena následující zkušební tělesa:

Pro tahové zkoušky tyče kruhového průřezu $d_0 = 6$ mm, počáteční měřená délka $L_0 = 30$ mm, opatřené závitovými hlavami. Podélná osa zkušebních tyčí byla rovnoběžná s podélnou osou kolejnice. Jak vyplývá z obr. 1, zkušební tyče byly vyrobeny z hlavy i paty.

Zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu podle Charpyho. Místo odběru zkušebních tyčí je rovněž na obr. 1. Podélná osa tyčí byla rovnoběžná s podélnou osou kolejnice. Rovina symetrie V-vrubu byla orientována kolmo k povrchu hlavy (paty) kolejnice. V-vrub byl vyroben ve zkušebních tyčích tak, aby se lom šířil dovnitř tělesa kolejnice.



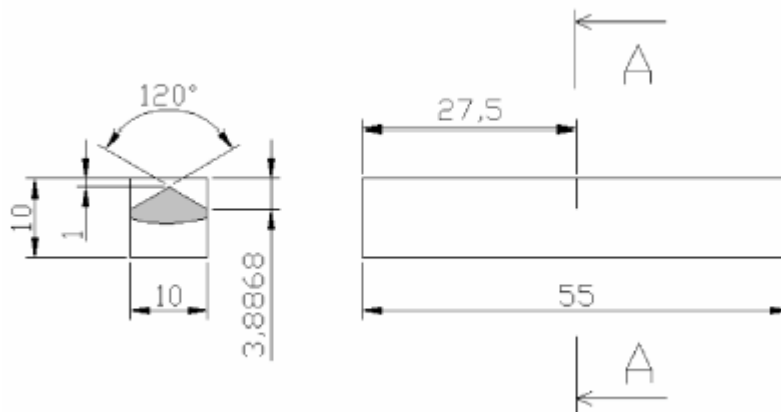
Obr. 1 Schéma odběru zkušebních tyčí pro tahové zkoušky a zkoušky rázem v ohybu



Obr. 2 Zkušební těleso Charpy s únavovou trhlinou.

Pro stanovení lomové houževnatosti byla použita malá zkušební tělesa typu Charpy a velká zkušební tělesa standardních rozměrů.

Zkušební tělesa typu Charpy mají rozměr Charpyho tělesa, ale uprostřed délky je vytvořen zářez (nejčastěji elektrojiskrově), buď rovný anebo ve tvaru „chevron“ (obr. 3), z něhož se pak cyklickým zatěžováním vytváří únavová trhlina. Únavová trhlina byla vytvořena za podmínek, uvedených ve standardech pro měření lomové houževnatosti (viz. např. ČSN EN ISO 12737 [8]). Cyklické zatěžování bylo realizováno na stolním pulsátoru RUMUL. Rovina trhliny byla ve zkušebním tělese orientována tak, aby byla kolmá k povrchu hlavy (paty) kolejnice a lom se šířil směrem dovnitř tělesa kolejnice. Tento typ zkušebních těles byl použit jak pro statické, tak i dynamické zatěžování tříbodovým ohybem.



Obr. 3 Zkušební těleso pro tříbodový ohyb pro zkoušku lomové houževnatosti.

Druhý typ zkušebních těles byla tělesa standardní tloušťky $B = 25$ mm pro zatěžování třibodovým ohybem, často označovaná jako tělesa SE(B)25. Avšak na rozdíl od normovaných těles, která mají šířku $W = 2B$ (viz např. standard [8]) byla šířka těles pouze 45 mm (obr. 3), neboť výška hlavy kolejnice UIC 60 neumožňuje vyrobít těleso s šířkou $W = 50$ mm. Návrh standardu prEN 13674-1 [12] pro měření lomové houževnatosti materiálu kolejnic tuto odchylku od normovaných rozměrů povoluje. Délka $L = 225$ mm pak umožnila vzdálenost „S“ podpor při zkoušce $S = 4W = 180$ mm. Uprostřed délky, rovnoběžné opět s osou kolejnice (obr. 2), byla vytvořena únavová trhлина délky cca $a_0 = 22,5$ mm, takže $a_0/W \approx 0,5$. Rovina trhliny byla kolmá k povrchu kolejnice a trhлина byla vytvořena tak, aby se lom šířil dovnitř tělesa kolejnice. Zkušební tělesa tloušťky 25 mm byla vyrobena pouze z oceli Lo8CrNiMo. Měření lomové houževnatosti kolejnice UIC 60 jakosti 900 A při použití těchto těles, je v práci Adámka [13].

Metodiky zkoušek

Tahové zkoušky byly prováděny v souladu s normou ČSN EN 10002-1. Zkoušky oceli Lo8CrNiMo se prováděly při dvou teplotách $+20^\circ\text{C}$ a -20°C , kolejnicová ocel UIC900A se zkoušela jen při $+20^\circ\text{C}$. Zatěžování zkušebních tyčí bylo prováděno na zkušebním stroji ZWICK při rychlosti pohybu příčnicku 2 mm/min.

Zkoušky rázem v ohybu byly prováděny v souladu s normou ČSN EN 10045-1 [14]. Měření nárazové práce KV bylo prováděno při dvou teplotách $+20^\circ\text{C}$ a -20°C . Instrumentace kyvadlového kladiva umožňuje snímání závislosti síla – průhyb v průběhu rázu. Z těchto závislostí lze získat podrobnější představu o deformačním a lomovém chování vyšetřovaných ocelí a sestavit teplotně – tranzitní diagram zahrnující nejen KV, ale i charakteristické síly a deformace spojené s procesem porušování [15]. Provádění instrumentované rázové zkoušky a vyhodnocování získaných záznamů bylo v souladu s normou ČSN EN ISO 14556 [16].

Lomová houževnatost se určovala při statickém a dynamickém zatěžování při použití zkušebních těles typu Charpy s trhlinou podle obr. 3 a jen při statickém zatěžování zkušebních těles standardní tloušťky podle obr. 2.

Statické zatěžování zkušebních těles podle obr. 3. Postup pro měření lomové houževnatosti při použití malých zkušebních těles není standardizován. Zkušební těleso bylo uloženo na pevných podporách, aby byl zachován způsob zatěžování shodný se zatěžováním na kladivu za účelem získání výsledků za srovnatelných podmínek zatěžování. Pro vyhodnocení získaných záznamů, síla – přemístění (průhyb) byly využity existující standardy pro stanovení lomové houževnatosti [6-10]. Vlastní zkouška se prováděla na zkušebním stroji ZWICK. Při zatěžování byla měřena závislost síla F – přemístění (průhyb) s . Zkoušky při teplotě -20°C se prováděly v kryostatu. Teplota byla měřena termočlánkem přivařeným bodově ke zkušebnímu tělesu a temperována s přesností $\pm 1,5^\circ\text{C}$ po dobu 15 min. Měření bylo realizováno při rychlosti posuvu příčnicku 1 mm/min.

Statické zatěžování zkušebních těles podle obr. 2. Zkušební tělesa byla umístěna v kryostatu, upraveném pro zatěžování těles třibodovým ohybem. Termočlánek pro měření teploty byl umístěn na povrchu tělesa v blízkosti čela trhliny v oblasti vymezené předpisem [12]. Po dosažení žádané teploty -20°C byla tělesa před započatím zatěžování temperována na této teplotě po dobu 20 min s přesností $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Zatěžování zkušebního tělesa bylo prováděno při konstantní rychlosti příčnicku $v = 1$ mm/min. V průběhu zatěžování byla měřena závislost síla F – otevření vrubu na povrchu tělesa V .

Dynamické zatěžování zkušebních těles podle obr. 3. Zkoušky se prováděly na instrumentovaném rázovém kyvadlovém kladivu podle metodických pokynů pracovního návrhu normy ESIS [6]. Pro stanovení dynamické lomové houževnatosti byly opět zvoleny

dvě zkušební teploty, pokojová (20°C) a teplota -20°C. Ochlazování zkušebních tyčí na obě teploty se provádělo v lihové lázni za použití kapalného dusíku. Nastavená teplota zkušebního tělesa kolísala v rozmezí $\pm 1^\circ\text{C}$. Po ochlazení na příslušnou teplotu byla tělesa temperována po dobu min. 15 minut. Vlastní zatěžování zkušebního tělesa s trhlinou se provádělo při rychlosti dopadu břitu kladiva na zkušební tyč v rozmezí 1 ms^{-1} až $1,4\text{ ms}^{-1}$ (tzv. low blow testing technique). V průběhu rázu byla měřena závislost síly F – přemístění břitu s .

Určování lomové houževnatosti

Z naměřených záznamů síla F – přemístění (průhyb) s , byly vyhodnoceny následující lomově – mechanické charakteristiky:

V případě, že záznam $F - s$ při zatěžování těles Charpy s únavovou trhlinou (obr. 3) vykazoval až do porušení lineární průběh, příp. nestabilní křehký lom nastal jen při malé odchylce od počáteční lineární části záznamu, vyhodnocovala se předběžná hodnota lomové houževnatosti K_Q (pro statické zatěžování), případně K_{Qd} (pro dynamické zatěžování), a to podle postupů uvedených v normách [6-10] pro měření lomové houževnatosti. To vše pro případ, že pro vypočtenou hodnotu K_Q , příp. K_{Qd} byly splněny podmínky určené normou, tj. $K_Q = K_{Ic}$ a $K_{Qd} = K_{Id}$. Veličiny K_{Ic} a K_{Id} představují lomovou houževnatost při rovinné deformaci. V případě, že pro určené hodnoty K_Q a K_{Qd} nebyly podmínky platnosti splněny, ale záznam $F - s$ byl až do porušení lineární, byla K_Q označena jako K_c a K_{Qd} jako K_{cd} .

Záznamy síla F – otevření vrubu V získané při zkoušce se zkušebními tělesy tloušťky $B = 25\text{ mm}$ (obr. 2) při teplotě -20°C byly ve shodě se záznamy $F - s$ uvedenými v předpisu [12]. Metodika vyhodnocování záznamů $F - s$ uvedená v předpisu je v souladu s normou ASTM E399-90 [9], navíc však obsahuje některé doplňky (odst. B.5). Výpočet K_{Ic} byl proveden použitím vztahů uvedených v normě E399. Podmínky platnosti byly splněny.

V případě zkušebních těles typu Charpy s trhlinou (podle obr. 3) ukazovaly záznamy síla F – průhyb s na to, že některá zkušební tělesa z oceli Lo8CrNiMo se při zatěžování deformovala elasto-plasticky. Pro hodnocení lomové houževnatosti se tedy musely použít parametry elasto-plastické lomové mechaniky. Ta zavádí kritickou hodnotou J_1 – integrálu J_c , určenou pro okamžik iniciace nestabilního křehkého lomu. Postup určení J_c je uveden, např. v bývalé ČSN 42 0347 [7], příp. v normě ASTM E1820-99a [10], a v návrhu normy ISO/DIS 12135 [18]. Návrh standardu prEN 13674-1 [12] směrnice pro určování J_c neobsahuje.

Aby byla zachována srovnatelnost s lomovou houževnatostí K_{Ic} , zavádí se k lomové houževnatosti J_c jako ekvivalent veličina K_{Jc} v jednotkách součinitele intenzity napětí $[\text{MPa m}^{1/2}]$ daná vztahem

$$K_{Jc} = \left[\frac{EJ_c}{(1 - \nu^2)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

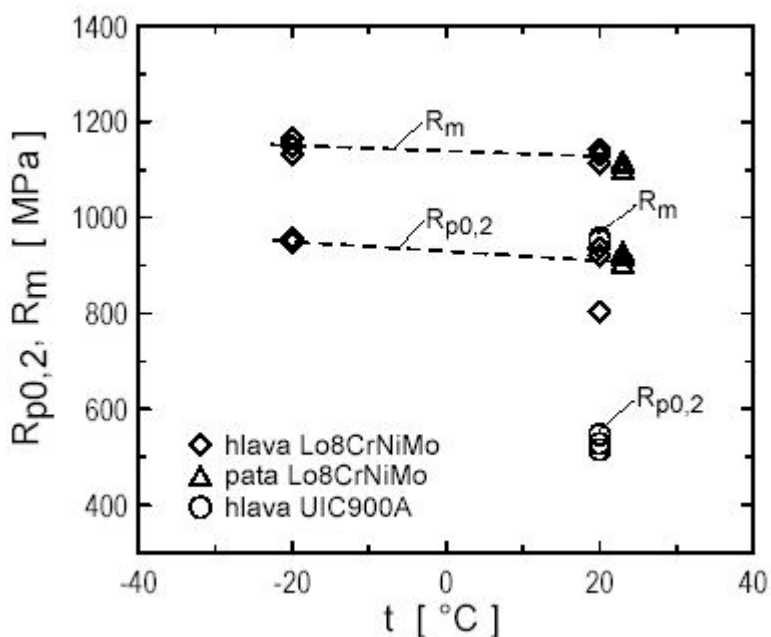
kteřá se nazývá elasticko-plastická lomová houževnatost [19].

3. Výsledky zkoušek, diskuse výsledků

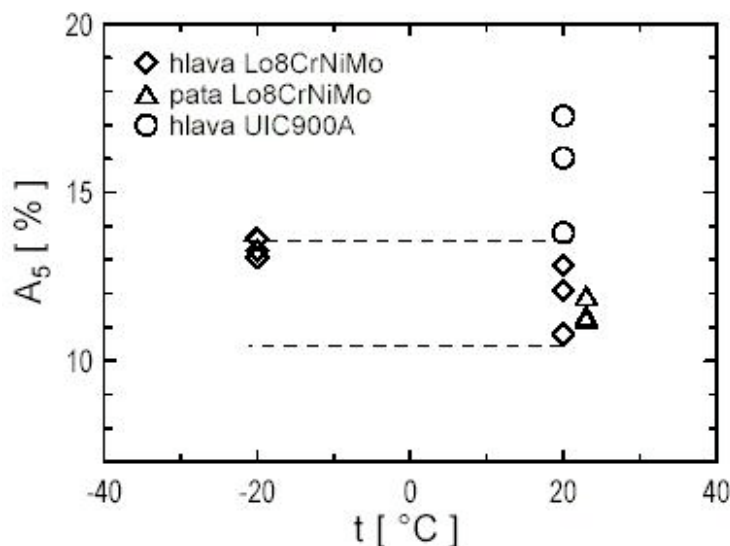
PEVNOSTNÍ A DEFORMAČNÍ CHARAKTERISTIKY

Hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, pevnosti v tahu R_m , tažnosti A_5 a kontrakce Z jsou vyneseny pro ocel Lo8CrNiMo i pro ocel UIC 900A v závislosti na teplotě v diagramech na obr. 4 až obr. 6. U oceli Lo8CrNiMo jsou rozlišeny hodnoty naměřené v místě hlavy a paty kolejnice. Střední hodnoty všech charakteristik (průměr ze tří měření) jsou uvedeny v Tab. 2. V tabulce je uvedena pro ocel Lo8CrNiMo i střední hodnota součtu hodnot naměřených v oblasti hlavy i paty kolejnice. Pro ocel UIC 60 jen hodnoty pro hlavu při teplotě 20° C.

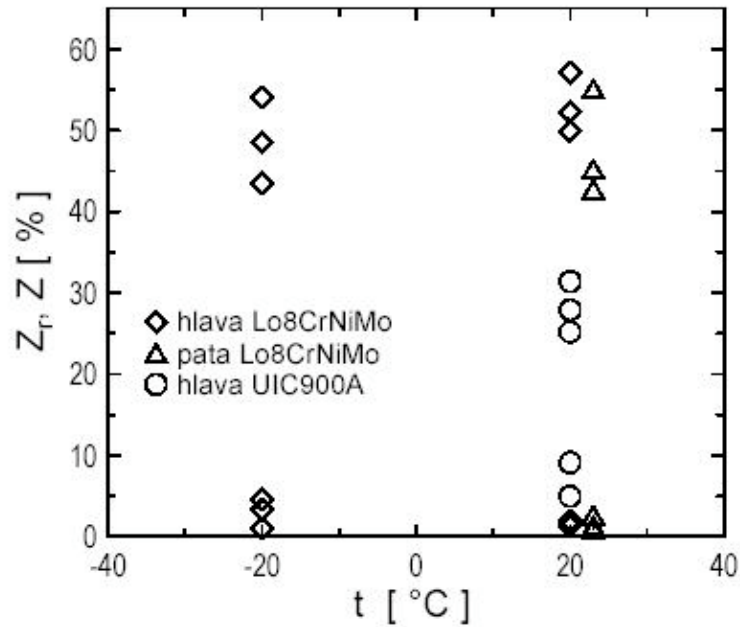
Na obr. 7 a obr. 8 jsou diagramy převzaté z práce Hellera a kol. [20] prezentující současný stav standardních evropských jakostí ocelí na kolejnice podle standardu UIC a amerických jakostí podle standardu AREA (Americký svaz železničních inženýrů).



Obr. 4 Hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a pevnosti v tahu R_m pro hlavu a patu kolejnice z oceli na odlitky Lo8CrNiMo a pro hlavu kolejnice jakosti UIC 900A pro teplotu -20°C a 20°C.



Obr. 5 Hodnoty tažnosti A_5 pro stejná místa odběru jako v obr. 4 a teplotu -20°C a 20°C.

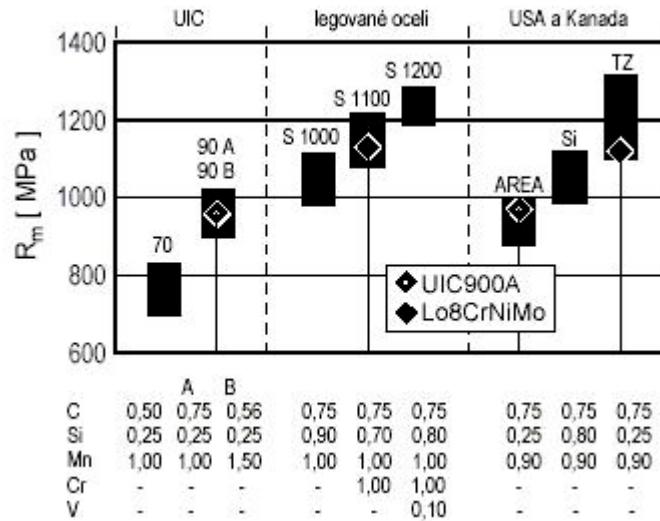


Obr. 6 Hodnoty rovnoměrného zúžení Z_r a kontrakce Z pro stejná místa odběru jako v obr. 4 pro teplotu -20°C a 20°C .

Tabulka 2: Mechanické a deformační charakteristiky sledovaných ocelí

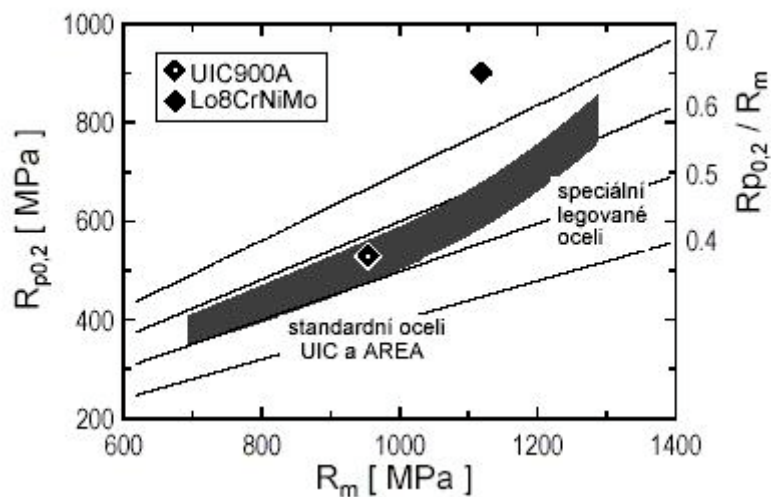
Materiál	Místo odběru	t °C	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A_5 %	Z %	ϵ_{FR} %
Lo8CrNiMo	hlava	20	886,8	1128,5	11,9	53,1	75,8
		-20	950,1	1149,3	13,3	48,7	67,1
	pata	20	918,6	1110,6	11,5	47,7	63,3
	hlava + pata	20	902,7	1119,5	11,7	50,4	69,5
UIC900A	hlava	20	530,2	954,7	15,7	28,2	33,1

Do těchto diagramů byla podle hodnot pevnostních charakteristik vynesena ocel jakosti UIC 900A. Je zřejmé, že vyšetřovaná část kolejnice vykazuje hodnoty, které jsou v souladu s hodnotami požadovanými jak UIC, tak i AREA. Naproti tomu se ocel Lo8CrNiMo podle pevnosti v tahu R_m zařazuje mezi speciálně legované (Si) oceli na kolejnice s perlitickou strukturou (obr. 7). Hned z následujícího diagramu na obr. 8 je však zřejmé, že při stejné pevnosti jako speciálně legované kolejnice s perlitickou strukturou má podstatně vyšší smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Tato kombinace vyšší meze kluzu s vyšší pevností má za následek, že při cyklické plastické deformaci leží cyklická křivka napětí – deformace oceli Lo8CrNiMo výrazně nad toutéž křivkou oceli UIC 900A [21]. Podle Cannona a Pradiera [22] se tato skutečnost projeví ve vyšší odolnosti proti šíření povrchových trhlin iniciovaných kontaktní únavou (head checks). Podle AREA standardu se bainitická ocel Lo8CrNiMo řadí mezi tepelně zpracované, vysoce-pevnostní třídy ocelí na kolejnice.



Obr. 7 Třídy kolejnicových ocelí podle UIC a AREA s vyznačením vyšetřovaných ocelí, (Heller a kol.) [20].

Z obr. 5 vyplývá, že tažnost A_5 oceli na odlitky je poněkud nižší než u oceli UIC 900A. Zdánlivě tedy ocel Lo8CrNiMo snese menší stupeň plastické deformace do porušení. Při posuzování deformačních vlastností, zejména při porovnávání různých materiálů, je však nutno kromě tažnosti A_5 vzít v úvahu i kontrakci Z a rovněž i veličinu ϵ_{FR} , která reprezentuje skutečnou poměrnou deformaci (true fracture strain, $\epsilon_{FR} = 2 \ln d_0 / d_u$, kde d_u je průměr průřezu v místě přetržení zkušební tyče [23]), při níž nastává vlastní proces porušování daného materiálu v místě lokální kontrakce (krčku). Na základě této skutečné deformace do lomu ϵ_{FR} lze získat zcela jiný obraz o vlastnostech vyšetřovaných ocelí (Tab. 2), kdy hodnota ϵ_{FR} je pro ocel Lo8CrNiMo téměř dvojnásobná ve srovnání s ϵ_{FR} oceli UIC 900A. Poněvadž iniciace tvárného lomu je spojována s částicemi sekundárních fází v matici (vměstky, shluky vměstků, karbidy) dá se očekávat, že se vyšší hodnota ϵ_{FR} u bainitické struktury může pozitivně projevit i při cyklickém zatěžování [24].



Obr. 8 Závislost meze kluzu $R_{p0,2}$ na pevnosti v tahu R_m pro kolejnicové oceli

NÁRAZOVÁ PRÁCE

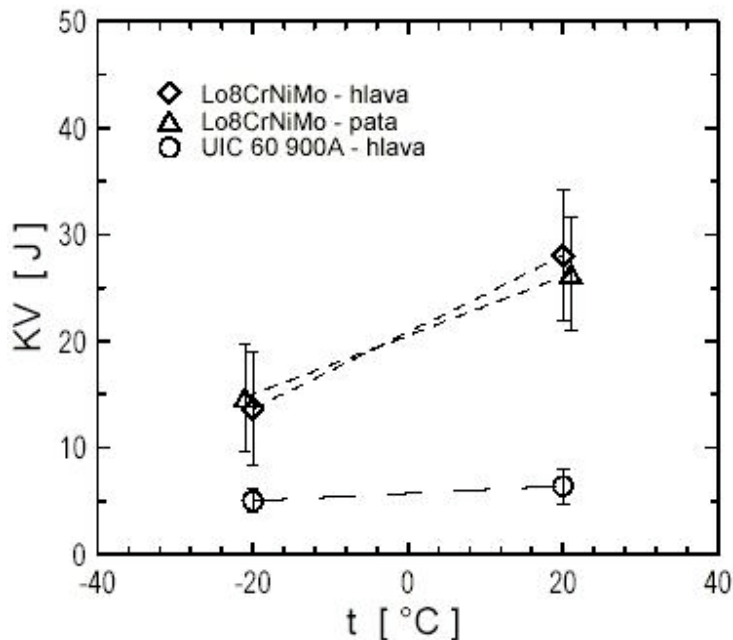
Hodnoty KV v závislosti na teplotě pro ocel Lo8CrNiMo i pro ocel UIC 900A jsou uvedeny v diagramu na obr. 9. Vyneseny jsou střední hodnoty KV, úsečky vymezují interval mezi nejvyšší a nejnižší měřenou hodnotou KV. Jednotlivé hodnoty nárazové práce a charakteristických sil odečtených ze záznamů síla – průhyb jsou ve zprávě [25]. Na základě dosažených výsledků lze dospět k následujícímu hodnocení houževnatosti sledovaných ocelí:

Ocel na odlitky Lo8CrNiMo

Nárazová práce KV při 20°C reprezentuje elasto-plastické křehké lomy. Lomové chování oceli se nachází pod tranzitní oblastí. S poklesem teploty se KV snížila, některá zkušební tělesa se porušila podobně jako při 20°C (hodnoty KV se nacházejí v horní části úsečky KV v obr. 9). Jiná tělesa se porušila křehce bez podílu plastické práce (hodnoty KV se nacházejí ve spodní části úsečky). Rozptyl hodnot KV je dán velikostí plastického průhybu do lomu.

Ocel UIC 900A

Podle záznamu síla F – průhyb s odpovídají nízké hodnoty KV při 20° C i -20° C křehkému lomu se zanedbatelným podílem plastické práce. Další pokles teploty nemá již prakticky vliv na lomové chování. U této oceli, viz obr. 9, lze proto pozorovat prakticky nezávislost KV na teplotě. Tranzitní oblast KV oceli UIC 900A je posunuta k výrazně vyšším teplotám.



Obr. 9 Nárazová práce pro hlavu a patu kolejnice oceli Lo8CrNiMo a hlavu kolejnice oceli UIC 900A při -20° C a 20° C.

Porovnání ocelí Lo8CrNiMo a UIC 900A

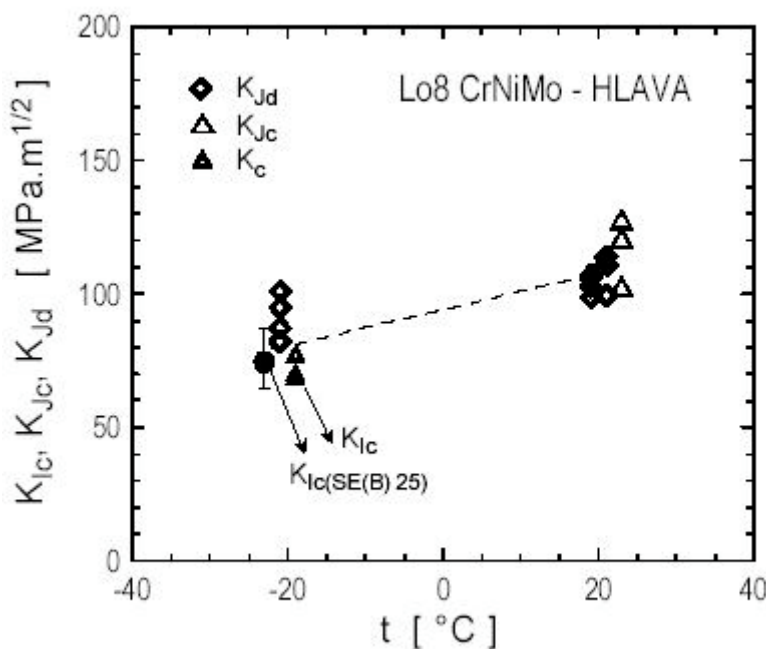
U oceli Lo8CrNiMo lze očekávat, zejména při 20° C, výrazně vyšší odolnost proti vzniku křehkých lomů z případných defektů, ve srovnání s jakostí materiálu 900A. Při teplotě -20° C odolnost proti vzniku křehkých lomů oceli Lo8CrNiMo poklesla, ale je stále vyšší, než u oceli UIC 900A. Pro objektivní kvantitativní posouzení odolnosti proti vzniku lomu z defektů je nutno použít materiálové charakteristiky zavedené teorií lomové mechaniky.

LOMOVÁ HOUŽEVNATOST

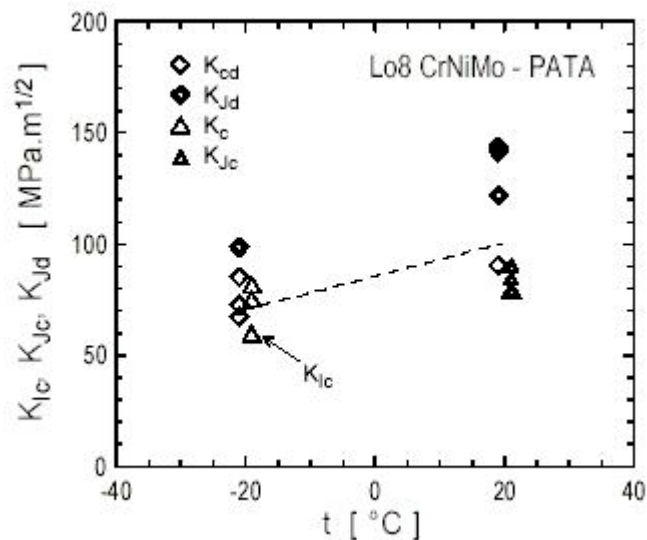
Bylo provedeno celkem 60 měření na tělesech s únavovou trhlinou. Lomová houževnatost je nejen neobjektivnější materiálovou charakteristikou při porovnávání odolnosti různých materiálů proti vzniku křehkých lomů, ale současně umožňuje výpočet kritického defektu při posuzování integrity kolejnic (jako příklad viz práci Valenty a kol. [26]). Dále je možno např. určit přípustné zatížení kolejnice do další defektoskopické kontroly (inspekční interval, Edel [27], Orringer a kol [28], Orringer a Stelle [29], Edel a kol. [30]). Stanovení lomové houževnatosti lze provádět jak při použití malých zkušebních těles typu Charpy s únavovou trhlinou, tak i při použití normovaných zkušebních těles, např. tloušťky $B = 25$ mm, což je nejčastější používané těleso.

Ocel Lo8CrNiMo

Zkušební tělesa typu Charpy s únavovou trhlinou (dle obr. 3). Hodnoty elasto-plastické lomové houževnatosti K_{Jc} při statickém a K_{Jd} při dynamickém zatěžování, jsou pro oblast hlavy vyneseny na obr. 10 a pro oblast paty na obr. 11. Dále jsou vyneseny hodnoty K_{Ic} , K_c , K_{Id} a K_{Cd} (ozn. v obrázcích) určené podle již uvedené metodiky.



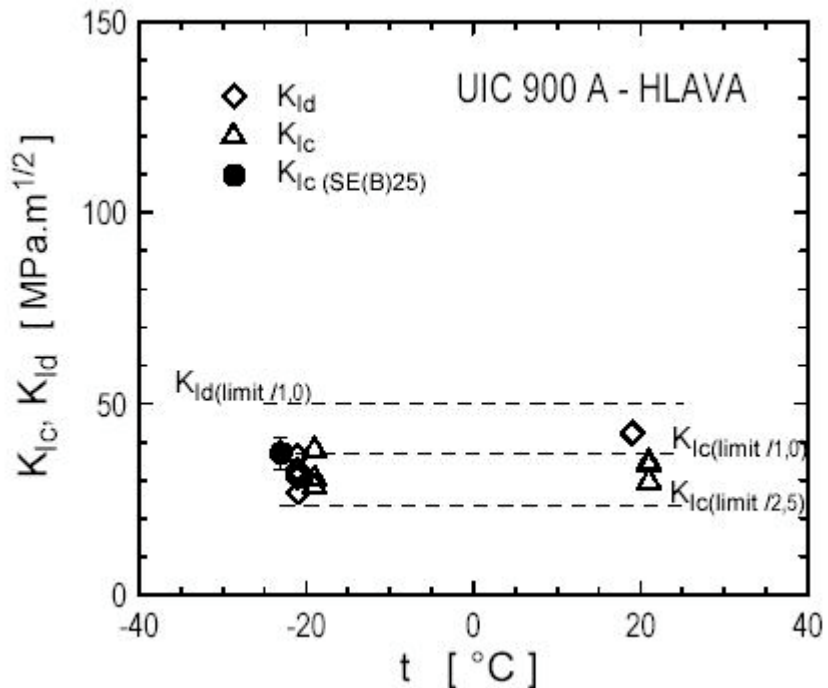
Obr. 10 Lomová houževnatost, při statickém a dynamickém zatěžování při teplotě -20°C a 20°C.



Obr. 11 Lomová houževnatost, při statickém a dynamickém zatěžování při teplotě -20°C a 20°C.

Z obr. 10 a obr. 11 vyplývá:

- při 20 ° C je lomová houževnatost reprezentována elasto-plastickou lomovou houževnatostí a to jak při statickém, tak i dynamickém zatěžování. Poněvadž při 20° C lze určovat pouze elasto-plastickou lomovou houževnatost je lomová houževnatost určena při teplotě -20° C důkazem vysoké odolnosti oceli Lo8CrNiMo proti iniciaci křehkých lomů.



Obr. 12 Lomová houževnatost, při statickém a dynamickém zatěžování při teplotě -20°C a 20°C.

- s poklesem teploty lomová houževnatost klesá a při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lze určené hodnoty stále považovat za poměrně vysoké (viz dále srovnání s ocelí UIC 900A).
- lomová houževnatost je prakticky stejná při statickém i dynamickém zatěžování. Toto zjištění je v souladu s experimentálními výsledky jiných autorů (Barsom a Rolfe [31]), z nichž vyplývá, že pro oceli se smluvní mezí kluzu $R_{p0,2}$ vyšší než $900 \div 1000\text{ MPa}$ nemá již rychlost zatěžování vliv na hodnoty (pokles) lomové houževnatosti,
- není prakticky pozorován rozdíl v lomové houževnatosti pro patu a hlavu kolejnice. Při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ však oblast paty vykazuje větší rozptyl.

Zkušební těleso pro tříbodový ohyb; $B = 25\text{ mm}$. Lomová houževnatost se určovala při teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ podle předpisu [12], avšak s uvážením norem [8,9]. Všechny získané hodnoty představují lomovou houževnatost K_{Ic} při rovinné deformaci. Pro srovnání s výsledky lomové houževnatosti zjištěnými na tělesech Charpy s únavovou trhlinou, jsou naměřené hodnoty vyneseny do diagramu na obr. 10 jako úsečka označená $K_{Ic(SE(B)25)}$, znázorňující rozpětí lomové houževnatosti od nejnižší po nejvyšší hodnotu; dále je uvedena i střední hodnota. Pozorujeme velmi dobrý souhlas s hodnotami K_{Ic} z malých zkušebních těles.

Ocel UIC 900A

Hodnoty lomové houževnatosti měřené na zkušebních tělesech Charpy s únavovou trhlinou jsou vyneseny pro teplotu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na obr. 12. Pro ocel na kolejnici této jakosti, vedly závislosti síla – průhyb s k určením lomové houževnatosti podle norem pro určování lomové houževnatosti při rovinné deformaci [8,9,12]. V obrázku je vynesena přímka (označená čárkovaně) vyznačující podmínku platnosti lomové houževnatosti $K_{Ic(limit/2,5)}$ pro Charpy těleso s trhlinou podle vztahu uvedeného v normě E399 [9] a pr EN13674-1 [12]. Hodnoty lomové houževnatosti zjištěné při použití malých těles s trhlinou tuto podmínku nesplňují (leží nad $K_{Ic(limit/2,5)}$). Avšak v obr. 12 je z práce Adámka [13] vynesena střední hodnota lomové houževnatosti ozn. $K_{Ic(SE(B)25)}$, zjištěná z 13 taveb při použití těles tloušťky $B = 25\text{ mm}$, která podmínku platnosti pro K_{Ic} splňovala. Hodnota K_{Ic} je prakticky totožná s hodnotami zjištěnými při použití malých těles Charpy s trhlinou. Tato shoda dokazuje, že lomové houževnatosti určené při použití malých těles představují lomovou houževnatost K_{Ic} při rovinné deformaci. Vysvětlení této skutečnosti lze nalézt v práci McCabe a kol. [32], kteří na základě práce Merkla [33] uvádí, že pro štěpně iniciované křehké lomy ocelí, v podmínce pro platně určené K_{Ic} , měla být konstanta 1. Podmínka platnosti s konstantou 1 je v obr. 12 vyznačena čárkovanou přímkou ozn. $K_{Ic(limit/1,0)}$ pro statické a $K_{Id(limit/1,0)}$ pro dynamické zatěžování. Hodnoty lomové houževnatosti, zjištěné při použití malých těles, jsou platnými hodnotami K_{Ic} , poněvadž leží na, nebo pod těmito přímkami.

Porovnání ocelí Lo8CrNiMo a UIC 900A na základě hodnot lomové houževnatosti

Odolnost proti iniciaci křehkého lomu z defektů vyjádřená lomovou houževnatostí je u oceli na odlitky Lo8CrNiMo podstatně vyšší než u oceli UIC 900A. Ocel Lo8CrNiMo se podle hodnot lomové houževnatosti nachází ve spodní tranzitní oblasti teplotně - tranzitní křivky lomové houževnatosti [34]. V této oblasti je lomová houževnatost závislá na teplotě. Naproti tomu se ocel UIC 900A podle hodnot lomové houževnatosti nachází ve spodní prahové oblasti teplotně - tranzitní křivky lomové houževnatosti. V oblasti spodních prahových hodnot lomová houževnatost nabývá nejnižších hodnot a je jen slabě závislá na teplotě. Nejzřetelněji vystupují rozdíly v lomové houževnatosti při porovnání středních hodnot lomové houževnatosti K_{Ic} určených při použití těles tloušťky 25 mm při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Střední hodnota oceli Lo8CrNiMo $K_{Icstř} = 74\text{ MPa m}^{1/2}$, oceli UIC 900A $K_{Icstř} = 37\text{ MPa m}^{1/2}$. Jestliže

je kritický rozměr defektu vedoucí ke křehkému lomu obecně úměrný K_{Ic}^2 , potom u oceli na odlitky Lo8CrNiMo bude velikost a_{kr} 4krát větší než a_{kr} u kolejnic jakosti UIC 900A při stejném působícím napětí σ . Samozřejmě, že se při posuzování integrity kolejnic či srdcovek s defektem nebude brát střední, ale přiměřeně nižší hodnota K_{Ic} určená pro požadovanou pravděpodobnost porušení (Edel [27], Edel a kol. [30]).

Ocel Lo8CrNiMo v porovnání s bainitickými oceli podle prací [3, 4]

Práce *Singha a kol.* [3], kolejnice s bainitickou strukturou. Kromě pevnostních vlastností uvedených v úvodu příspěvku zmíníme následující charakteristiky odolnosti proti křehkému porušení (KV , K_{Ic}) při pokojové teplotě: tavba s 0,44 %C: $KV = (14-19)$ J, $K_{Ic} = (63-66)$ MPam^{1/2}; tavba s 0,37 %C: $KV = (16-18)$ J, $K_{Ic} = (56-60)$ MPam^{1/2}.

Práce *Davise a kol.* [4] – ocel na odlitky srdcovek s bainitickou strukturou pro tratě s extrémně vysokým nápravovým zatížením. Vyvinutá ocel na odlitky měla následující chemické složení (hm.%): 0,26C, 1,85 Mn, 3,0 Ni, 1,75 Si, 0,5 Mo, 0,004B. Dosažené mechanické vlastnosti: $R_m = 1560$ MPa, $R_{p0,2} = 1019,6$ MPa, $A_5 = 4,2$ %, HB 450. Nárazová práce $KV = 34,5$ J (20°C), 23,5 J (-40°C). Laboratorní zkoušky z hlediska svařitelnosti, opotřebení a odolnosti proti deformaci vykázaly velice příznivé výsledky ve srovnání s Mn ocelí na odlitky (1,2%C, 13%Mn, 0,5%Si). Byl proto odlit zkušební kus kolejnice s bainitickou strukturou a zkušební kus z Mn oceli. Zkušební kus s bainitickou strukturou vykázal menší opotřebení pojezdové hrany hlavy kolejnice než Mn ocel a to po 140.000 přejezdech (ekvivalentní zatížení 18 mgt). Zkouška byla uspořádána tak, aby bylo vyvozeno na zkušební kus dynamické zatížení ekvivalentní zatížení, které vzniká při přejezdu železničního vozu s kolovým zatížením 147 kN (14,7 t) přes dvojitou, 90° srdcovku, rychlostí 64 km/h. Překvapivá je hodnota nárazové práce $KV = 34,5$ J při 20 °C. Při hodnotě tažnosti $A_5 = 4,2\%$ se nám tato hodnota jeví jako téměř nemožná. Objasnění by mohl podat diagram síla – průhyb s z instrumentované rázové zkoušky. Autoři neuvádějí úroveň lomové houževnatosti, která jako jediná udává skutečnou odolnost proti porušení křehkým lomem z defektů.

Porovnáme-li hodnoty KV a K_{Ic} dosažené u oceli LoCrNiMo s výše uvedenými výsledky, zjišťujeme, že hodnota nárazové práce KV při 20° C je o 50% vyšší, než hodnoty KV zjištěné Singhem a spol. [3]. Ve srovnání s hodnotou KV uváděnou Davisem a kol. [4] je KV oceli Lo8CrNiMo poněkud nižší. K hodnotě KV stanovené Davisem a kol však viz diskusi výše.

Nejdůležitější je však porovnání hodnot lomové houževnatosti. U oceli Lo8CrNiMo jsou její hodnoty vyšší (obr. 10 a 11) než hodnoty dosažené Singhem a kol. [3]. Zejména je třeba vyzvednout hodnotu K_{Ic} při -20 °C, $K_{Ic} = 74$ MPam^{1/2}, která je vyšší než hodnoty K_{Ic} obou bainitů [3] zjištěné při pokojové teplotě a navíc je u bainitu ojedinělou hodnotou, která v dostupné literatuře o kolejnicových ocelích s bainitickou strukturou nebyla zaznamenána. Rovněž zjištění, že dynamická lomová houževnatost je prakticky shodná se statickou lomovou houževnatostí (není nižší), představuje výsledek, který by se dal očekávat s ohledem na úroveň smluvní meze kluzu, ale není nám známo, že by doposud pro kolejnice s bainitickou strukturou byl prokázán. Toto zjištění je zejména důležité z hlediska odolnosti srdcovek proti křehkému porušení, poněvadž srdcovky výhybek jsou podle práce [4] výrazně dynamicky namáhány.

První odlitá srdcovka byla zabudována do koridorové tratě v ŽST Modřice v r. 1998. Dalších 200 vyrobených srdcovek bylo zabudováno do koridorových tratí ČD.

4. Závěr

Hlavní výsledky vyšetřování mechanických charakteristik a lomového chování bainitické oceli na odlitky Lo8CrNiMo a jejich porovnání s mechanickými charakteristikami perlitické oceli UIC 900A, případně s bainitickými oceli na kolejnice, lze shrnout následovně:

- pevnostní charakteristiky $R_{p0,2}$ a R_m oceli na odlitky při poklesu teploty s 20°C na -20°C se mírně zvyšují. Tažnost A_5 a kontrakce Z v rámci rozptylu se s poklesem teploty nemění.
- při 20°C je střední hodnota nárazové práce KV u oceli Lo8CrNiMo 27,2 J, u oceli UIC 900A KV = 6,4 J. S poklesem teploty na -20°C u oceli Lo8CrNiMo KV pokleslo na 14,2J, u oceli UIC 900A na 5,0J (u této oceli KV prakticky nezávisí na teplotě). U středně uhlíkové bainitické oceli na kolejnice [3] bylo KV při pokojové teplotě (14 – 19)J.
- lomová houževnatost při statickém a dynamickém zatěžování oceli Lo8CrNiMo stanovená při 20°C a při použití Charpy těles s únavovou trhlinou, představovala elasto-plastickou lomovou houževnatost s hodnotou K_{Jc} (K_{Jd}) kolem $100\text{ MPam}^{1/2}$. U oceli UIC 900A byla při téže teplotě a stejném tělese určena lomová houževnatost při rovinné deformaci K_{Ic} (K_{Id}) $\cong 37,5\text{ MPam}^{1/2}$.
- s poklesem teploty na -20°C lomová houževnatost u oceli Lo8CrNiMo klesla na hodnotu kolem $80\text{ MPam}^{1/2}$, což podle lomového chování ukazuje, že se tato ocel nachází v rozmezí teplot 20°C až -20°C v tranzitní oblasti teplotně-tranzitní křivky lomové houževnatosti. Naproti tomu u oceli UIC 900A se K_{Ic} (K_{Id}) prakticky se snížením teploty nezměnilo, což znamená, že lomové chování této oceli se v uvedeném rozmezí teplot nachází v oblasti spodních prahových hodnot teplotně – tranzitní křivky lomové houževnatosti.
- při použití zkušebního tělesa normovaných rozměrů tloušťky $B = 25\text{ mm}$ namáhaných třibodovým ohybem při -20°C byla u oceli na odlitky Lo8CrNiMo zjištěna střední hodnota lomové houževnatosti při rovinné deformaci $K_{Ic} = 74\text{ MPam}^{1/2}$ u oceli UIC 900A pak střední hodnota $K_{Ic} = 37\text{ MPam}^{1/2}$. Uvážíme-li, že kritický rozměr planárního defektu je při daném napětí σ roven obecně K_{Ic}^2 , potom u oceli na odlitky Lo8CrNiMo bude tento kritický rozměr 4x větší. Samozřejmě, že při posuzování integrity kolejnic či srdcovek s defektem nebude vzhledem k rozptylu hodnot lomové houževnatosti brána střední hodnota K_{Ic} , ale hodnota určená pro požadovanou pravděpodobnost porušení.

Poděkování

Experimentální práce a práce na příspěvku byly umožněny díky finanční podpoře Grantové agentury České republiky v rámci grantu GAČR č. 106/02/0745 a projektu na podporu cíleného výzkumu Grantové agentury Akademie věd č. S2041001.

Literatura:

1. L. Muders, N. Rotthäuser, A. Zimmermann, Ansprüche on moderne Schienen – Werkstoffe, v Tagungsbericht: Internationales Symposium „Schienenfehler“ November 2000, Hochschulforum, BRANDENBURGER TAGUNGSBERICHTE, Vortrag 8.
2. E. Karczmarczyk, T. Kufa, P. Matušek, Hutnické listy, 1994, č. 7 – 8, s. 34.
3. U. P. Singh, B. Roy, S. Jha, S. K. Bhattacharyya, Materials Science and Technology, 2001, Vol. 17, s. 33.
4. D. Davis, M. Scholl, H. Schitoglu, Railway, Track and Structures, December, 1997, s. 14.
5. J. Zbořil, Využití bainitické oceli v srdcovkách výhybek. In: Vědeckotechnický sborník Českých drah, č. 11, Praha 2001, s. 63.
6. Proposed standard methods for instrumented pre-cracked Charpy impact testing of steels, Draft 12, Sept. 2000.
7. ČSN 42 0347, Lomová húževnatosť kovov pri statickom zaťažení, 1991.
8. ČSN EN ISO 12737 Kovové materiály – Určení lomové houževnatosti při rovinné deformaci, srpen 2000.
9. Standard ASTM E399-90, Test Method for Plane – Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, (Reapproved 1997).
10. Standard ASTM E1820-99a, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
11. J. Man, M. Holzmann, B. Vlach, ZVÁRANIE 1987, Roč. 36, No. 10, s. 291, No. 11, s. 223, No. 12, s. 355.
12. Final Draft prEN-13674-1: 2002 (E), Annex B Standard test method for determination of plane strain fracture toughness K_{Ic} of rails.
13. A. Adámek, Diplomová práce: Hodnocení vybraných mechanických vlastností kolejnic. VUT Brno, Fakulta strojní, 1997.
14. ČSN EN 10045-1, Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho – Část I.: Zkušební metoda (V a U vruby).
15. M. Holzmann, I. Dlouhý, ZVÁRANIE – SVAŘOVÁNÍ, Roč. 49, 2000, s. 256.
16. ČSN EN ISO 14556, Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu, tyčí Charpy s V – vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda, červen 2001.
17. B. Vlach, M. Holzmann, J. Man, Kovové materiály 1986, Vol. 24, s. 654.
18. Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, Draft Inter. Standard ISO/DIS 12135.
19. K. Wallin, Validity of Small Specimen Fracture Toughness Estimates Neglecting Constraint Corrections, ASTM STP 1244, Constraint Effects in Fracture, ASTM Philadelphia 1995, s. 519.
20. W. Heller, R. Schweitzer, L. Weber, Canadian Metallurgical Quarterly, 1982, Vol. 21, s. 1.
21. J. Polák, interní sdělení z probíhajících experimentů
22. D. F. Cannon, H. Pradier, Wear, 1996, Vol. 191, s. 1.
23. R. O. Ritchie, W. L. Server, R. A. Wullaert, Metallurg. Trans. A, 1979, Vol. 10A, s. 1557.

24. S. K. Dhua, A. Ray, M. S. Prasad, K. B. Mishra, S. Jha, *Journ. Materials Engineering and Performance*, 2000, Vol. 9, s. 700.
25. Posouzení mechanických vlastností a lomového chování bainitické oceli Lo8CrNiMo, Výzkumná zpráva ÚFM VZ 890/1037 a ÚFM VZ 891/1038 (M. Holzmann, I. Dlouhý, Z. Chlup), Brno, září a listopad 2000.
26. G. Valenta, T. Varga, F. Loibnegger, Untersuchungen von Schienenbrüchen bei der Wiener U-Bahn and Massnahmen zu deren Verringerung, *Ibid* jako [1], Vortrag 7.
27. K.-O. Edel, Bruchmechanische Analysen und Bewertungen für Risse in Eisenbahnschienen, *Ibid* jako [1], Vortrag 13.
28. O. Orringer, J. M. Morris, D. Y. Jeong, *Theoretical and Applied Fract. Mechanics*, 1986, Vol. 5, s. 63.
29. O. Orringer, R. K. Steele, *Structural Integrity of Rail in Railroad Track in the United States*, v ASTM STP 969, *Fracture Mechanics: Nineteenth Symposium*, Philadelphia, 1988, s. 260.
30. K.-O. Edel, G. Boudnitski, Th. Schnitzer, Schienenfehler und ihre Bruchmechanische Behandlung, *Berichts Band der 33. Tagung DVM – Arbeitskreises Bruchvorgänge: Anwendung der Bruch – und Schädigungsmechanik*, Februar 2001, Padehorn, Deutscher Verband für Materialforschung und – Prüfung.
31. M. Barsom, S. T. Rolfe, *Fracture and Fatigue Control in Structures, Applications of Fracture Mechanics*, ASTM Stock Number MNL 41, West. Conshocken, USA 1999 (kniha).
32. D. E. McCabe, J. G. Merkle, R. K. Nanstad, *A Perspective on Transition Temperature and K_{Jc} Data Characterization*, ASTM STP 1207, *Fract. Mechanics: Twenty – Forth Volume*, Philadelphia 1994, USA, s. 217.
33. J. G. Merkle, *An Examination of the Size Effects and Data Scatter Observed in Small – Specimen Cleavage Fracture Toughness Testing*, NUREG/CR-3672, U. S. Nuclear Regulatory Commission, April 1994.
34. M. Holzmann, I. Dlouhý, V. Kozák, *ZVÁRANIE-SVAŘOVÁNÍ*, 48 (1999) č. 10, s. 221-225.

V Brně, září 2003

Lektoroval: Doc. Ing. Jan Kout, CSc.
Výzkumný ústav železniční Praha