

Nekonvenční materiálové vlastnosti kolejnic dle evropských standardů

Unconventional Material Properties of Railway Rails According to European Standards

Ing. Ladislav Kander, Ph.D.; Ing. Petr Čížek, Ph.D.

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s. r. o., Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

V článku jsou shrnuty a porovnány výsledky zkoušek nekonvenčních vlastností vyžadované při kvalifikaci kolejnic na základě zkušebních metod uvedených v evropských standardech. Laboratoř únavových a křehkolomových vlastností společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s. r. o. disponuje mnohaletými zkušenostmi s testováním nekonvenčních vlastností materiálů kolejnic, které zahrnují únavové zkoušky při konstantní amplitudě deformace, měření lomové houževnatosti a rychlosti šíření trhliny. Tyto užité vlastnosti byly v minulosti zjišťovány na nelegovaných C-Mn ocelích pro výrobu kolejnic zahraničních výrobců. Zkoušené značky ocelí R260, R350HT a R350LHT vykazují odlišné pevnostní charakteristiky. Stejně zkoušky byly provedeny i u kolejnic z materiálu IH350 z produkce TRINECKÝCH ŽELEZÁREN, a. s. za účelem porovnání výsledků se zahraničními výrobci.

Klíčová slova: Vignolovy kolejnice; lomová houževnatost; rychlost šíření únavové trhliny

Paper summarizes methodology for qualification of railway rails on the base of test method prescribed in European standards. Laboratory of fatigue and fracture behavior of MATERIAL AND METALLURGICAL RESEARCH Ltd. has a long-term experience with testing of unconventional properties of materials used for the production of railway rails, namely fatigue test at constant strain amplitude, measurement of fracture toughness and measurement of fatigue crack growth rate. These properties were tested in the past on railway rails of foreign producers made of R260, R350HT and R350LHT steels. Subsequently, the same test methods were applied to railway rails made of IH 350 steel in TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a. s. Fatigue tests confirmed sufficient fatigue lifetime of all materials for qualification according to European standards. In the case of fracture toughness measurement only a small decrease in stress intensity factor was observed between room temperature and -20 °C. Fracture toughness at -20 °C is comparable with all studied materials. Finally, the fatigue crack growth rate determined on railway rails made of IH350 for two levels of stress intensity factor amplitude is also comparable with values of other materials. All unconventional properties were in accordance with the requests prescribed in EN 13674-1 standard for railway applications. Macrostructure analysis revealed central segregation located in rail web. This fact seems to be the only difference in comparison with other materials. However, it is necessary to note that the area of this segregation is small enough to meet the requests prescribed by CN 12-16D for this type of railway rail.

Key words: Vignole rails; fracture toughness; fatigue crack growth rate

V současné době jsme svědky neustále rostoucích technických požadavků na užité vlastnosti značné části produkce hutních a strojírenských podniků. Tlak na užité vlastnosti a současně i na cenu působí v celé řadě průmyslových segmentů, zejména od automotive až po energetické strojírenství, a projevuje se i v segmentu hutní výroby, do níž patří produkce kolejnic.

Požadavky na vysoké užité vlastnosti, charakterizované nekonvenčními materiálovými charakteristikami, jako jsou únavové vlastnosti, kinetika růstu trhlín, křehkolomové vlastnosti, jsou odběrateli významně akcentovány a nepochybně souvisí i s aplikacemi výrobků typu kolejnic v takzvaných severních drahách v regionu severoamerického kontinentu a Skandinávie, kde jsou samozřejmě vyžadovány vyšší požadavky na jejich užité vlastnosti, a to zejména na křehkolomové vlastnosti.

Protože srovnání pouhých základních mechanických vlastností a základní metalografické rozbory již rozhodně nemohou s relevantní určitostí stanovit kvalifikaci daného výrobce kolejnic z pohledu požadavků drážních inspekčních orgánů, jsou výrobci kolejnic nuceni k prokázání způsobilosti zejména v oblasti tzv. nekonvenčních materiálových vlastností provádět úpravy technologie výroby tak, aby těchto nekonvenčních vlastností bylo dosaženo.

Základní požadavky drážních orgánů jsou shrnuty v několika obecně platných standardech těchto výrobků [1, 2], které se v současné době posouvají do kvalifikace zejména únavových a křehkolomových vlastností. Ty jsou charakterizovány jak minimální lomovou houževnatostí a rovněž minimálním požadavkem na únavové vlastnosti, tak také požadavky na maximální rychlost růstu únavové trhliny.

Tento článek sumarizuje výsledky měření nekonvenčních charakteristik. Tato měření byla provedena na řešitelském pracovišti společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s. r. o. v minulých letech na výrobcích typu kolejnic, produkovaných různými evropskými výrobci. Článek shrnuje výsledky dosažené v období cca 3 let při systematické práci na výše uvedené téma. Největší pozornost byla v rámci této práce věnována především hodnocení křehkolomových vlastností charakterizovaných hodnotou lomové houževnatosti.

1. Experimentální materiál a zkušební metody

Zkušebním materiálem byly kolejnice z devíti taveb oceli IH350 profilu 136RE z produkce Třineckých železáren, a. s. (TŽ, a.s.). Jedná se o nízkolegovanou eutektoidní ocel s přibližným obsahem 0,8 % uhlíku, 1 % manganu a 0,7 % chromu. Zkouškou tahem byla naměřena mez pevnosti v rozmezí 1183–1258 MPa a mez kluzu v poměrně širokém intervalu 629–782 MPa. Ověření křehkolomových vlastností těchto kolejnic bylo provedeno dle standardu ČSN EN 13674-1 [1] předepisujícího požadavky na provozní vlastnosti Vignolových železnič-

ních kolejnic pro 9 tříd nelegovaných ocelí tepelně zpracovaných i nezpracovaných. V laboratoři únavových a křehkolomových vlastností MMV byly rovněž v minulosti dle tohoto standardu zkoušeny kolejnice z materiálů R260, R350HT a R350LHT produkované dalšími evropskými výrobci. Dosažené výsledky jsou navzájem porovnány.

Hodnocení materiálových vlastností kolejnic zahrnovalo zejména následující zkušební metody:

- hodnocení makrostruktury a mikrostruktury kolejnice,
- zkouška únavy s konstantní amplitudou deformace,
- měření statické lomové houževnatosti za pokojové teploty i za teploty $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- měření rychlosti růstu únavové trhliny.

2. Výsledky zkoušek a jejich diskuse

Makrostrukturní rozbor byl proveden na příčném řezu kolejnic. Makrostruktura byla vyvolána leptáním v 10 % roztoku HNO_3 . Ve všech případech byla ve středu stojiny kolejnice pozorována středová segregace (obr. 1) [3].



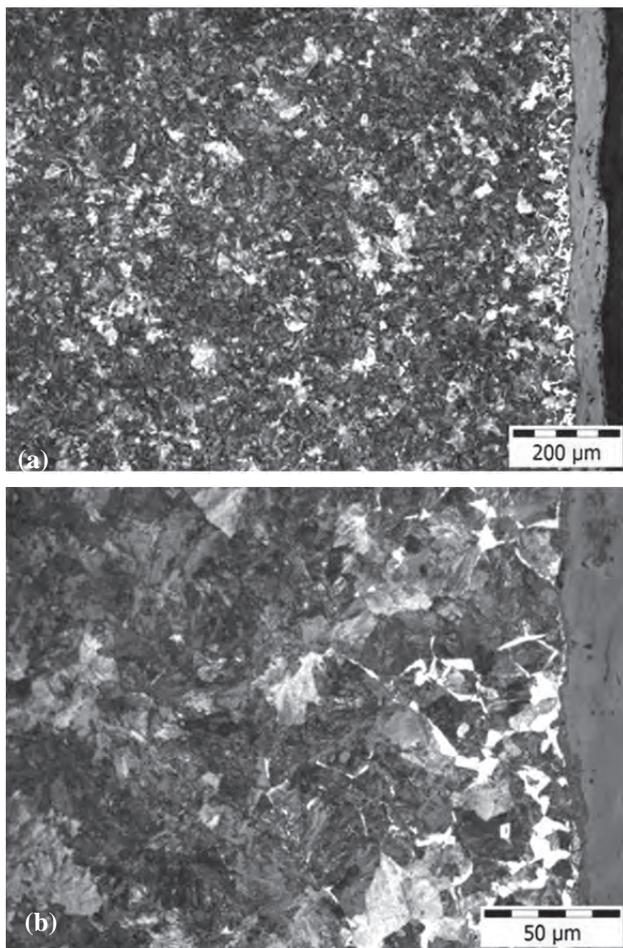
Obr. 1 Středové segregace ve stojině kolejnic
Fig. 1 Central segregation in rail webs



Specifikace CN 12-16D [4] předepisuje maximální délku této stojinové páskovitosti 2,5 inch. Ani v jednom případě studovaných kolejnic nebylo této kritické délky dosaženo. Při porovnání s dalšími materiály pro výrobu kolejnic (R260, R350LHT) však byly středové segregace pozorovány jen v kolejnicích z materiálu IH 350 vyrobených v TŽ.

Mikrostrukturní rozbor stojiny kolejnice prokázal ve všech případech výskyt perlitické struktury s lokálně přítomnými ostrůvky či tenkým filmem světlého kontrastu, u nichž nelze s jistotou určit, zda se jedná o ferit, či sekundární cementit. Zároveň bylo prokázáno částečné oduhličení na obou protilehlých površích stojiny v hloubce cca 100 μm . Oduhličení o podobné hloubce

bylo pozorováno i u kolejnic zahraniční provenience (obr. 2) [3].



Obr. 2 Oduhličení na povrchu stojiny při zvětšení (a) 100×, (b) 500×
Fig. 2 Decarburization on the surface at (a) magn. 100×, (b) magn. 500×

Zkoušky únavy při konstantní amplitudě deformace byly provedeny dle ČSN ISO 1099 [5] na servohydraulickém zkušebním zařízení SHIMADZU Servopulser 250 kN užitím hladkých válcových zkušebních těles o průměru 7 mm, odebraných v podélném směru z hlavy kolejnice v souladu s předpisy [1, 2]. Tělesa byla zatěžována střídavým tvarem cyklu (součinitel asymetrie cyklu $R = -1$) o amplitudě deformace 0,135 % a s frekvencí 17 Hz. Kvalifikačním kritériem pro splnění požadavku na únavovou životnost materiálu kolejnice dle ČSN ISO 13674-1 je dosažení počtu $5 \cdot 10^6$ únavových cyklů bez porušení zkušebního tělesa [1]. Materiály kolejnic ze všech taveb tuto podmínku splnily. Stejně tak tomu bylo i u materiálů R260, R350LHT a R350HT zahraničních výrobců.

Měření statické lomové houževnatosti musí být dle [1] prováděno na tělesech typu SE(B) tloušťky $B = 25$ mm a šířky $W = 40$ mm zatěžovaných v trojbodovém ohybu. Zkušební tělesa byla odebrána ze středu hlavy kolejnice, v hloubce 2 mm pod její pojezdovou plochou. Do nich pak byla následně únavovým zatížením nacyklována počáteční únavová trhлина tak, aby finální hodnota faktoru

intenzity napětí v konečném stádiu přípravy únavové trhliny nepřevyšovala hodnotu $22 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Vlastní měření lomové houževnatosti bylo provedeno při dvou teplotách dle standardu ASTM E399 [6]. Ze sady tří zkušebních těles z každé kolejnice byly dvě zkoušky provedeny při pokojové teplotě, třetí těleso bylo zkoušeno při teplotě -20 °C za účelem porovnání s ostatními testovanými materiály. Dle normy ČSN EN 13674-1 [1] je měření lomové houževnatosti předepsáno pouze pro teplotu -20 °C. Pro měření bylo využito servohydraulické zkušební zařízení MTS 500 kN. Tělesa byla zatěžována rychlostí pohybu příčnicku $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Rozevření vrubu bylo měřeno sponovým snímačem. U zkoušek za snížené teploty byla teplota měřena NiCr-Ni termočlánekem přibodovaným na zkušebním tělese v blízkosti trhliny. Zkušební těleso bylo chlazeno v lihové lázni a ponecháno na teplotě zkoušení po dobu 30 minut.

Prvotním výsledkem měření lomové houževnatosti je záznam síla-rozevření vrubu (obr. 3), z něhož se určí tzv. předběžná hodnota faktoru intenzity napětí K_Q . Při splnění podmínek rovinné deformace, tvaru trhliny a dalších zatěžovacích parametrů lze tuto hodnotu považovat za hodnotu lomové houževnatosti K_{IC} . Srovnání výsledných předběžných hodnot faktoru intenzity napětí K_Q kolejnic z materiálu IH350 s materiály R260, R350LHT a R350LT zahraničních výrobců při teplotě -20 °C je uvedeno v tab. 1. V tab. 1 jsou uvedeny průměrné hodnoty K_Q spolu se směrodatnou odchylkou z 9 vzorků z materiálu IH350 reprezentujících 9 taveb, a 15 vzorků z materiálů kolejnic zahraničních výrobců. Naměřené hodnoty K_Q nelze považovat za K_{IC} z důvodu nesplnění požadavku zkušebního standardu, podle kterého poměr mezi maximální silou P_{max} a silou P_Q použitou pro výpočet předběžné hodnoty faktoru intenzity napětí nesmí překročit hodnotu 1,10.

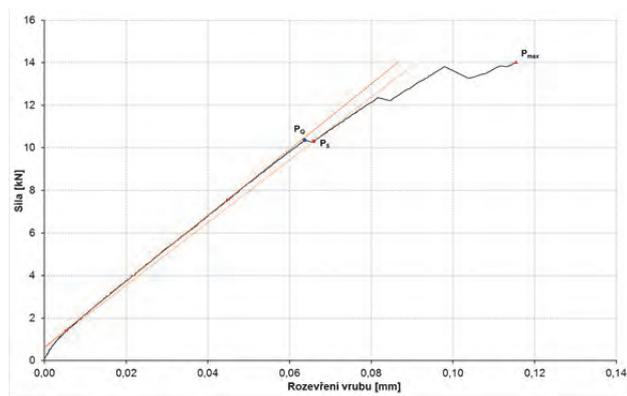
Tab. 1 Porovnání lomové houževnatosti kolejnic z materiálu IH350 s dalšími materiály pro výrobu kolejnic při zkušební teplotě -20 °C

Tab. 1 Comparison of fracture toughness of railway rails made of IH350 steels with other railway rail materials

Zkušební materiál	K_Q při teplotě -20 °C	K_Q při teplotě $+20$ °C	Minimální požadovaná hodnota K_Q při teplotě -20 °C
	(MPa·m ^{1/2})		
IH350	$30,7 \pm 3,2$	$36,3 \pm 2,7$	26,0
R260	$39,5 \pm 1,3$	-	
R350LHT	$32,7 \pm 1,3$	-	
R350HT	$33,4 \pm 2,0$	-	30,0

V tab. 1 jsou rovněž uvedeny požadavky na minimální hodnotu K_Q při teplotě -20 °C dle normy ČSN EN 13674-1 [1]. Z této tabulky je rovněž patrné, že všechny hodnocené kolejnice různých výrobců splňují s velkou rezervou požadavky na úroveň lomové houževnatosti a že z pohledu odolnosti vůči náhlému nestabilnímu lomu jsou kolejnice z materiálu IH350 vyrobené v TŽ, a. s. zcela rovnocenné s kolejnicemi dalších evropských výrobců.

Kromě zkušební teploty $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ předepisované normou [1] bylo rovněž provedeno měření lomové houževnatosti při pokojové teplotě. Dosažené výsledky na 18 vzorcích z 9 taveb, shrnuté rovněž v tab. 1, prokázaly, že při snížení teploty na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází jen k nepatrnému snížení lomové houževnatosti, což svědčí o tom, že lomová houževnatost v tomto teplotním intervalu odpovídá úrovni spodních prahových hodnot. V některých případech byla dokonce lomová houževnatost při snížené teplotě uvnitř rozptylu hodnot při pokojové teplotě. V záznamu síla vs. rozevření vrubu lze za obou zkušebních teplot rovněž pozorovat výskyt nestabilního lomového chování, které se projevuje tzv. pop-iny svědčícími o lokálním výskytu kritických částic spouštějících štěpení. Grafický záznam zkoušky s výskytem pop-inů je uveden na obr. 3.



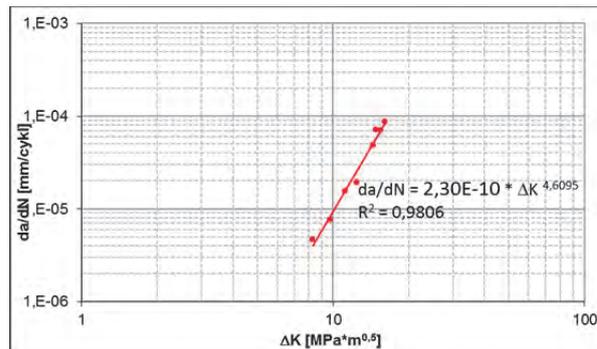
Obr. 3 Grafický záznam síla vs. rozevření vrubu v ose zatěžování
Fig. 3 Test record force vs. load line displacement

Další významnou nekonvenční charakteristikou, která je významným faktorem při kvalifikaci kolejnic, je rychlost šíření únavové trhliny, která má být stanovena v předepsaném intervalu rozkmitu faktoru intenzity napětí. Zkušební metoda stanovena normou ČSN EN 13674-1 [1] předepisuje cyklické zatěžování vzorku typu SEN(B) o tloušťce $B = 20\text{ mm}$ a šířce $W = 45\text{ mm}$ v trojbodovém ohybu při pokojové teplotě a součiniteli asymetrie cyklu $R = 0,5$. Zkouška je standardně prováděna v rozsahu rozkmitu faktoru intenzity napětí cca $8 - 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Z naměřených výsledků je sestavena mocninná závislost rychlosti šíření únavové trhliny da/dN na faktoru intenzity napětí ΔK dle Parisova vztahu, v němž je N počet zatěžovacích cyklů a a je délka trhliny. Kolejnice je vyhovující, jestliže změřená rychlost šíření únavové trhliny nedosahuje předepsaných maximálních přípustných hodnot při dvou hodnotách rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK , a to 10 a $13,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Zkoušení se provádělo na servohydraulickém zkušebním zařízení MTS 500 kN dle ČSN ISO 12108 [7] v režimu řízení síly. Přírůstky trhliny byly měřeny na optickém měřicím mikroskopu na obou površích zkušebního tělesa. Zatěžovací hladiny síly byly voleny tak, aby bylo možné sestavit mocninnou křivku závislosti rychlosti šíření trhliny na rozkmitu faktoru intenzity napětí ve tvaru Parisova zákona. Z ní byla následně vypočítána rychlost růstu trhliny pro oba sledované faktory intenzity napětí.

Aproximovaná mocninná křivka sestavená na jednom zkušebním tělese z materiálu IH 350 je pro ilustraci uvedena na obr. 4.



Obr. 4 Příklad stanovení závislosti rychlosti šíření únavové trhliny na rozkmitu faktoru intenzity napětí v oblasti Parisova vztahu na materiálu IH 350

Fig. 4 Example of determination of fatigue crack growth rate dependence as a function of stress intensity factor range according to the Paris law on IH 350 steel

Naměřené rychlosti růstu únavové trhliny pro předepsané rozkmitu faktoru intenzity napětí a jejich porovnání s hodnotami kolejnic z materiálů R260, R350LHT a R350HT jsou uvedeny v tab. 2 a tab. 3. Hodnoty rychlostí růstu únavové trhliny v tab. 2 a tab. 3 jsou vypočítány jako průměrné hodnoty z 9 zkušebních těles z materiálu IH350, reprezentujících 9 taveb, a dále 3 zkušebních těles z 1 tavby z ostatních materiálů zahraničních výrobců. V tabulkách jsou rovněž uvedeny maximální přípustné rychlosti šíření. Na obr. 5 je uvedeno porovnání rychlostí růstu únavové trhliny pro kolejnice z 9 taveb z materiálu IH350 z produkce TŽ a výše uvedených materiálů kolejnic zahraničních výrobců.

Tab. 2 Rychlost růstu únavové trhliny při $\Delta K = 10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

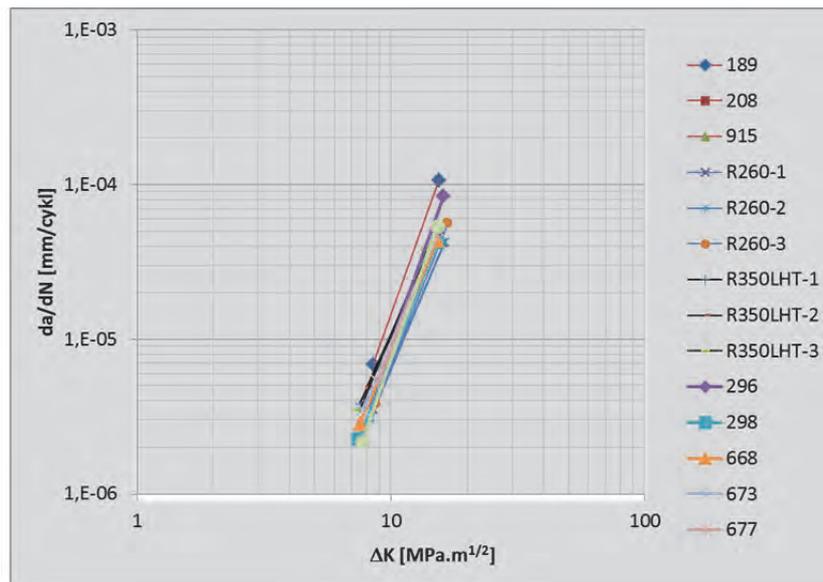
Tab. 2 Fatigue crack growth rate at $\Delta K = 10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

Zkušební materiál	da/dN při $\Delta K = 10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	Maximální přípustná da/dN při $\Delta K = 10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
	m/10 ⁹ cyklů	
IH350	9,19	17,0
R260	6,64	
R350LHT	10,48	
R350HT	8,97	

Tab. 3 Rychlost růstu únavové trhliny při $\Delta K = 13,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

Tab. 3 Fatigue crack growth rate at $\Delta K = 13,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

Zkušební materiál	da/dN při $\Delta K = 13,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	Maximální přípustná da/dN při $\Delta K = 13,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
	m/10 ⁹ cyklů	
IH350	32,11	55,0
R260	21,90	
R350LHT	31,10	
R350HT	30,22	



Obr. 5 Rychlost růstu únavové trhliny pro různé materiály kolejnic
Fig. 5 Fatigue crack growth rate for different railway rails materials

Z tab. 2 a 3 a obr. 5 je patrná srovnatelnost odolnosti materiálů kolejnice vůči šíření únavové trhliny. Rovněž je z tab. 2 a 3 zřejmé, že všechny zkoušené materiály splňují podmínku pro maximální rychlost šíření trhliny. Z výsledků měření kinetiky růstu trhlín je rovněž patrné, že při obou hodnocených úrovních rozkmitu faktoru intenzity napětí vykazuje nejnižší hodnoty rychlosti růstu kolejnice R260; hodnota je cca o 30 % nižší než u ostatních hodnocených kolejnic.

Závěr

Článek shrnuje postup pro stanovení užitečných vlastností materiálů pro výrobu kolejnic dle evropského standardu ČSN EN 13674-1 [1] a porovnává získané výsledky nekonvenčních vlastností (lomové houževnatosti, vysokocyklové únavy a kinetiky růstu únavových trhlín) jednotlivých kolejnic pocházejících od různých evropských výrobců. Na kolejnicích z materiálu IH350 z produkce TŽ, a.s. bylo provedeno hodnocení makrostruktury i mikrostruktury a následně realizovány zkoušky nekonvenčních únavových vlastností, jmenovitě únavová zkouška při konstantní amplitudě deformace, měření lomové houževnatosti a měření rychlosti růstu únavové trhliny.

Hodnocení makrostruktury na kolejnicích z materiálu IH350 odhalilo středové segregace vyskytující se na stojinách všech testovaných kolejnic. Délka stojinové páskovitosti však u žádné kolejnice nepřesáhla maximální povolenou délku 2,5 inch. Mikrostrukturním rozбором kolejnic bylo pozorováno částečné oduhličení na obou protilehlých površích stojiny o hloubce přibližně 100 μm . Podobné oduhličení však bylo rovněž pozorováno i u kolejnic z jiných sledovaných materiálů.

Při únavové zkoušce s amplitudou celkové deformace 0,135 % nedošlo k porušení zkušebního tělesa ani při

$5 \cdot 10^6$ cyklů, a to u žádné hodnocené kolejnice. Byl pozorován pouze nepatrný pokles lomové houževnatosti při snížení teploty zkoušení na -20°C . Při porovnání se zahraničními kolejnicemi z materiálů R260, R350LHT a R350HT, které byly zkoušeny dle ČSN EN 13674-1 [1] pouze při -20°C , bylo dosaženo podobných hodnot lomové houževnatosti, které s rezervou splňují požadované minimální hodnoty.

Rychlost růstu únavové trhliny je pro všechny studované kolejnice z materiálu IH350 dostatečně nízká, aby splnila požadavky stanovené v normě [1]. Zároveň bylo zjištěno, že odolnost materiálu IH350 vůči šíření únavové trhliny je srovnatelná s dalšími zkoušenými kolejnicemi zahraniční provenience z materiálů R260, R350LHT a R350HT.

Výsledky zkoušení křehkolomových vlastností lze tedy shrnout do závěru, že výrobky tuzemského producenta dosahují požadovaných úrovní nekonvenčních vlastností a jsou z tohoto pohledu naprosto srovnatelné s dalšími evropskými výrobci.

Literatura

- [1] ČSN EN 13674-1: Železniční aplikace - Kolej - Kolejnice - Část 1: Vignolovy železniční kolejnice o hmotnosti 46 kg/m a větší, 2017.
- [2] IRST-12-2009: Indian Railway Standard Specification for Flat Bottom Rails, 2011.
- [3] Čížek P. *Hodnocení materiálových vlastností kolejnic profilu 136RE z oceli IH350*. (Technická zpráva T-37/2018) Ostrava: MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s. r. o., říjen 2018.
- [4] CN 12-16D: CN Specification for the Manufacture of Steel Rail, 2006.
- [5] ČSN ISO 1099:2018: Kovové materiály - Zkouška únavy - Metoda řízení osové síly, 2018.
- [6] ASTM E399-17: Standard Test Method for Linear-Elastic Plain-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials, Annual Book of Standards, Sec. 3, Vol. 03.01, 2018.
- [7] ČSN EN ISO 12108: Kovové materiály - Zkoušení únavy - Metoda růstu únavové trhliny, 2013.