

ANALÝZA PŘÍČIN DEFEKTŮ V NÁVARECH TRAMVAJOVÝCH KOLEJNIC

Eva SCHMIDOVÁ, Libor BENEŠ

Katedra dopravních prostředků

1. SPECIFIKACE PROBLÉMU

Projekt zvyšování užitečných vlastností kolejnicových materiálů navařením exponovaných úseků pojezdových hran (kolejnic a výhybek) ještě před jejich prvním uložením do tratě lze označit jako jednu z perspektivních cest řešení otázky odolnosti kolejového svršku v provozu.

Z řady výchozích experimentů pro jmenovitý okruh provozního použití byla jako přídatný materiál pro navaření kolejnicového materiálu vybrána elektroda na bázi austenitické slitiny CrNiMn (18/8/6). Uvedený návarový materiál je charakteristický vysokou úrovní deformačního zpevnění, poměrně vysokou houževnatostí a odolností proti výskytu defektů ve svarovém kovu. Byla navržena technologie automaticky pod tavidlem bez předeřevu s použitím drátu Wegusta 1.4370, $\phi = 2,4$ mm, a tavidla typu 1 díl SA v kombinaci s 3 díly FX 860, na tramvajových žlábkových kolejnicích s jakostí a profily podle **Tab. 1**. Návary byly provedeny do vyfrézované drážky rozměrů 12 až 14 x 6 mm (podle hloubky žlábků příslušné kolejnice) na křižovatce v celistvé délce v závislosti na části vyráběného bloku v rozmezí 2,5 až 5,9 m. K vyplnění drážky v místech styků jednotlivých dílů bloku křižovatky se pak aplikovalo ruční navařování elektrodou odpovídajícího složení.

Po vyhotovení návarů po celé předepsané délce se v místech přechodu kořenové housenky do dna žlábků objevily praskliny, kopírující návar po délce kolejnice. Kapilární zkouškou byly rozlišeny dva základní typy porušení :

- podélné trhliny
- příčné trhliny.

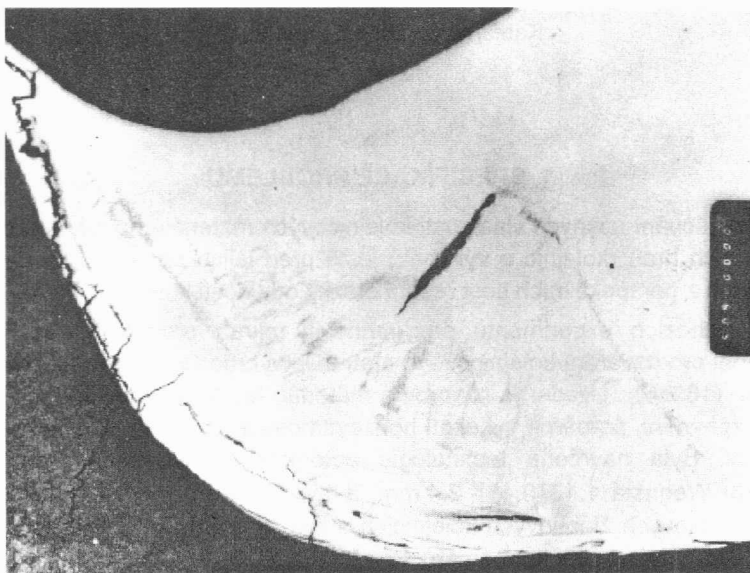
Oba druhy mapovaných defektů se vyskytovaly zpravidla současně v souvislých pásmech na přechodu kořenové housenky do základního materiálu. Příčné trhliny pak procházely z uvedeného místa především do materiálu návaru v délce cca 3-5 mm. Nebyl pozorován podstatný rozdíl porušení v souvislosti s hloubkou navařované drážky.

Tab. 1 Chemická složení navařovaných kolejnic (hmotnostní %)

	C	Si	Mn	P	S
Bloková kolejnice BL 180/260 Náběžná kolejnice D 180/105 (jakost 800)	0,60-0,61	0,25 -0,26	1,01-1,07	0,012-0,019	0,013-0,015
Kolejnice BA 75	0,53 - 0,57	0,27 -0,32	0,99 - 1,04	0,013-0,017	0,014-0,017
Kolejnice Ri 60/10 (S 800)	0,59	0,27	1,0	0,030	0,023

2. ROZBOR SLEDOVANÝCH DEFEKTŮ

Z dodaného vzorku byly zhotoveny metalografické výbrusy v řezech, směřovaných do míst zkoumaných defektů. Všechny vyskytující se defekty globálně dokumentuje snímek z oblasti kořene návaru (*obr. 1*).



Obr. 1

zv. 16x

Bylo sledováno několik typů porušení v základním materiálu i v návaru :

1) **Dutiny v promíšením neovlivněné oblasti austenického materiálu návaru.** Při bližším pozorování morfologie a umístění, spolu s posouzením mikrostruktury a tvrdosti okolní matrice lze tyto defekty označit jako dutiny, vzniklé nedostatečným provařením kladených housenek. S výjimkou dutin tohoto typu, zasahujících do kořenové housenky nemají podstatnější vliv na jakost návaru. Míra způsobeného poklesu únosnosti je dána pouze

odpovídajícímu zmenšení nosných průřezů. Povrch uvedených defektů byl nezoxidován, a existuje zde proto i možnost dodatečného svaření pod zatížením.

2) **Trhliny v kořenové housence kopírující hranici tavení** ve vzdálenosti cca 0,1-0,2 mm. Jednalo se o projev defektu, pozorovaného na volném povrchu jako podélné trhliny na přechodu základní materiál – návar. Po délce trhliny byly sledovány příčné větve, svědčící o víceosém stavu napjatosti materiálu v místě návaru.

3) **Trhliny pozorované v základním materiálu** probíhaly kolmo k hranici tavení, tj. ve směru tepelného gradientu.

V závislosti na usuzovaném původu defektů bylo možno rozlišit následující projevy porušení :

- **příčné trhliny protínající kolmo linii propojení návaru a základního materiálu** a zasahující obě sousedící strukturní oblasti. Z pozorování jejich umístění a průběhu byla zřejmá souvislost s příčnými trhlínami na volném povrchu dna drážky. Délka trhlín souvisela se strukturními změnami vlivem tepelného cyklu navařovacího procesu na straně návaru i základního materiálu.

V oblasti původně austenitické struktury probíhalo porušení zkřehlou vrstvou martenzitu, vyskytujícího se v promíšeném materiálu návaru. Okamžik ukončení postupující trhliny v objemu housenky, a tedy její délka ze strany návaru byla dána podmínkou dostatečné relaxace tahových složek smršťovacích napětí vytvořením volného povrchu odpovídající velikosti.

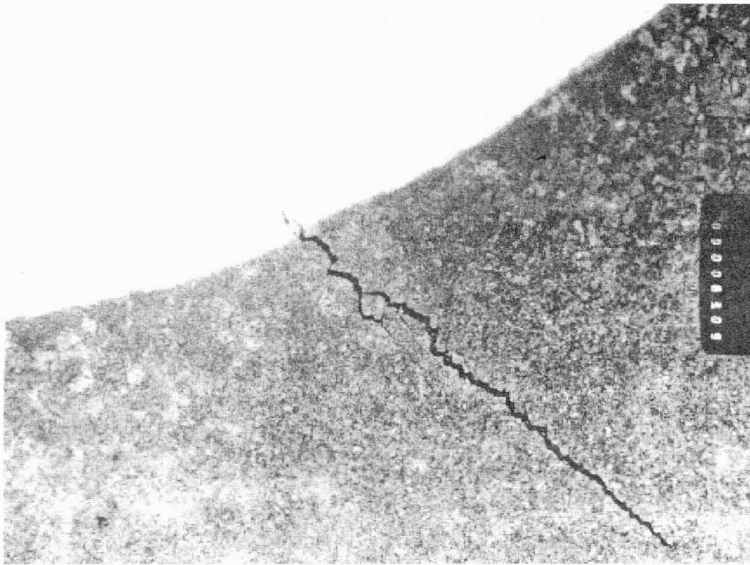
Ze strany základního materiálu měly pozorované příčné trhliny interkrystalický průběh a končily zpravidla na hranici tepelně ovlivněné zóny. Svědčilo to o částečné ztrátě houževnatosti, převažující nad příznivým efektem zjemnění zrna v této oblasti.

- **trhliny vycházející zpod linie ztavení do materiálu kolejnice** (obr. 2). Podle jejich identifikovaného směru a rozevření bylo možno usuzovat na důsledek dále uvedených porušení celistvosti navařované plochy drážky. Trhlinky opracovaného základního materiálu byly zřejmě rozevřeny žíhacím efektem tepelného působení po sobě kladených housenek. Následné částečné nebo úplné uzavření tlakovým působením tuhnoucího návaru je silně ovlivněno lokálními rozdíly jednak ztráty houževnatosti kořenové housenky, jednak neutralizujícího spolupůsobení složek napětí stejného směru a opačné orientace.

- **krátké transkrystalické trhliny v základním materiálu**, tzn. za hranicí ovlivnění struktury tepelným cyklem navařování. Svou orientací (převážně kolmo na linii propojení materiálu kolejnice a návaru) a původem se řadily k příčným opožděným trhlínám. Výrazné rozdíly v porovnání s výše popsanými defekty stejného druhu je možno připsat na konto značně rozdílné mikrostruktury nosných oblastí, tj. teplem ovlivněné zóny a neovlivněného základního materiálu. U původní perliticko-feritické stavby pravděpodobně souvislé feritické síťové omezilo přednostní šíření trhlín po hranicích zrn [1].

Za účelem ověření a případného upřesnění původu, jakož i odhadu celkového rozsahu a působení jednotlivých popsaných defektů následovala řada dalších laboratorních vyhodnocení:

- podrobnější rozbor mikrostruktur a jejich změn v důsledku aplikované technologie,
- vyhodnocení průběhů mikrotvrdostí v oblastech kritických z hlediska jakosti návaru, popřípadě z hlediska bližšího rozlišení sporných strukturních oblastí,
- analýzy chemického složení problémových a srovnávacích oblastí.



Obr. 2

zv. 63x

Dále byly pro potřeby celkového posouzení aplikovány kapilární zkoušky na ploše dna vyhoblované drážky. Prokázalo se značné porušení celistvosti povrchové vrstvy již ve stavu před navařováním ve formě příčných nerovností, přecházejících v trhliny do materiálu kolejnice. Orientace sledovaných trhlín byla kolmá na směr odběru třísky, hloubku jejich průniku do navařovaného materiálu nebylo možno stanovit bez podrobnějšího fraktografického rozboru na vhodně vedených řezech.

3. HODNOCENÍ MIKROSTRUKTURY

Pro detailnější studium strukturního vstupu do souboru vlivů na výsledný stav návaru byly vzorky naleptány a zdokumentovány při větším zvětšení spornějších oblastí v okolí pozorovaných defektů.

V materiálu návaru se analýzy zaměřily na oblasti, pozorované na metalografickém výbrusu jako tmavší pásma v kořenové housence. Byly zaznamenány značné rozdíly v jejich rozsahu a průběhu v porovnání s odpovídajícími projevy, pozorovanými při předcházejících zkouškách a obvyklými pro materiál použitý k navařování (souběžně s linií tavení, nezasahující hlouběji do objemu návaru) [2]. U analyzovaného vzorku se tyto projevy zvýšeného promíšení objevily v celém objemu kořenové housenky a zasahovaly částečně i do vrstvy po ní následující. Přitom zde byla zjevná zvýšená hloubka průvaru do dna drážky kolejnice. V určité vzdálenosti od linie tavení se pak odlišně leptatelná pásma promíšení odkláněla od původního směru sledujícího přibližně profil dna průvaru ve směru krystalizační fronty.

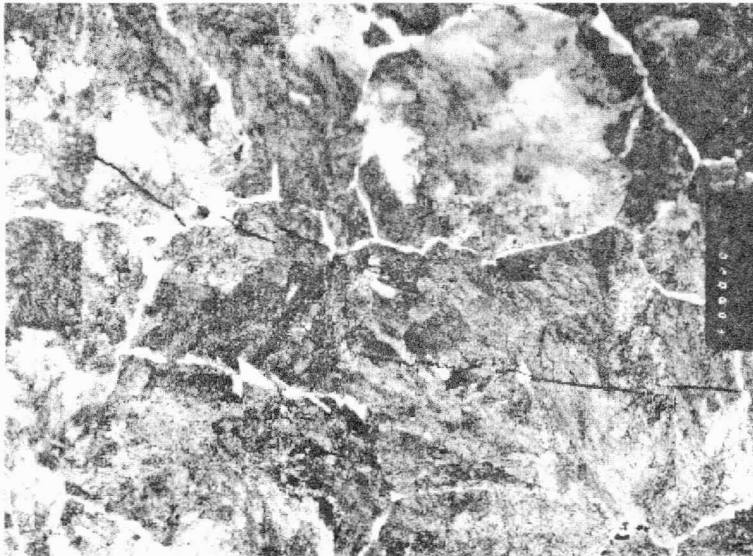
Bližší pohled na morfologii této oblasti prokázal čitelnou martensitickou strukturu, svým rozmístěním vykreslující stavbu původního austenitického zrna (**obr.3**). V okolních oblastech bylo pozorovatelné odpovídající dendritické větvení, se značně rozdílnou leptatelností.



Obr. 3

zv. 400x

V teplem ovlivněné oblasti základního materiálu byly sledovány lokality částečně popuštěného martensitu v převážně zjemněné perlitické struktuře. Za pásmem tepelného ovlivnění byla zkoumána možnost vazby průběhu pozorovaných jemných trhlin na mikrostrukturu (obr. 4), popřípadě ve vztahu k mikročistotě materiálu kolejnice. Tato závislost nebyla v rozhodující míře prokázána s výjimkou ojediněle nakumulovaných nečistot, které mohou působit jako iniciátory porušení s omezeným dopadem na dominantní polohy či směry trhlinek.



Obr. 4

zv. 200x

4. MĚŘENÍ TVRDOSTI

Pro podporu výsledku předešlých hodnocení se ukázalo jako směřodatné zjištění dosažených tvrdostí v promíšené zóně návaru a ze strany základního materiálu v teplem ovlivněné oblasti i v neovlivněném materiálu přednostně v okolí vyskytujících se defektů.

Z řad, po kterých byla prováděná dílčí měření, byl sestaven reprezentativní průběh změn mikrotvrdoti ve směru kolmo k linii tavení (Tab. 2). Obsahuje hodnoty tvrdosti, vycházející z promíšením nezasaženého materiálu návaru směrem do teplem ovlivněné oblasti, procházející do neovlivněného materiálu kolejnice.

Tab. 2 Průběh mikrotvrdoti [HVm] ve směru kolmo k linii tavení

- 8,00	- 7,50	- 7,00	- 6,00	- 5,00	- 3,80	- 1,60	- 1,40	- 1,20	- 1,10	- 1,00	- 0,90	
254	274	251	303	289	440	445	526	471	509	462	446	
- 0,80	- 0,70	- 0,63	- 0,5	- 0,40	- 0,30	- 0,20	- 0,12	- 0,07	0,03	0,14	0,30	
438	470	491	435	438	388	491	180	532	244	285	332	
0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80		
448	470	452	457	459	485	476	429	398	359	211		

použité koordináty: 0,00 hranice tavení
 -x směr do návaru
 +x směr do teplem ovlivněné oblasti.

Zjištěné hodnoty mikrotvrdoti v oblasti návaru odpovídaly výsledkům metalografických rozborů, tj. potvrdily výskyt martensitické struktury. Sledované zvýšené promíšení podle souřadnic měřených bodů zasahovalo do vzdálenosti cca 5 mm od hranice tavení a představovalo hodnoty místy přesahující až 500 HVm. Poměrně vyrovnaná hladina tvrdosti pak prokazuje převažující existenci křehkých strukturních složek v celé této oblasti.

V materiálu kolejnice jsou hodnoty tvrdosti pod úrovní 350 HVm, která představuje potřebnou rezervu houževnatosti struktury, pouze těsně pod rozhraním kolejnice – návar. Dále po šířce teplem ovlivněné oblasti přesahují hodnoty 450 HVm, což odpovídá částečnému popuštěnému martensitu, pozorovanému na metalografickém výbrusu. Za hranicí teplem ovlivněné oblasti naměřená tvrdost odpovídala hodnotám neovlivněného základního materiálu. Takto zjištěné rozdíly houževnatosti dokreslují vlivy, způsobující rozdíly morfologie a průběhu (transkrystalický versus interkrystalický průběh) defektů sousedících oblastí.

5. ELEKTRONOVÁ MIKROANALÝZA

Úroveň promíšení byla rovněž doložena výsledky provedených bodových EDS – analýz v linii přes hranici tavení. Hodnocení bylo směřováno do oblastí první housenky a základního materiálu ve vzdálenosti cca 0,5 mm (v obou směrech) od hranice tavení s krokem 50 μm (celkem 20 bodů) (Tab. 3).

Získané výsledky dokládají výrazné odchýlení od rovnovážné koncentrace navařovaného materiálu právě v oblasti první housenky zejména v porovnání s dalšími vrstvami nanášených housenek v důsledku již diskutovaného nadměrného promíšení. Zjištěné změny chemického složení, vztážené k posunu souřadnic (ekvivalent chromu, resp. niklu) v Schaefflerově diagramu pak odpovídají změně austenitické struktury na strukturu martensitickou.

Tab. 3 Bodová EDS - analýza v linii přes hranici tavení (hodnoty se znaménkem „+“ se vztahují k základnímu materiálu, hodnoty se znaménkem „-“ k návaru, hodnota „0“ pak odpovídá hranici tavení)

bod č.	vzdálenost od rozhraní	Hmotnostní % prvků :				
		Cr	Ni	Mn	Si	Fe
1	- 475 μm	6,7	3,0	3,1	0,5	86,7
2	- 425 μm	7,1	2,8	3,1	0,5	86,2
3	- 375 μm	7,8	3,6	3,5	0,6	84,3
4	- 325 μm	5,2	2,3	2,1	0,4	89,8
5	- 275 μm	9,2	4,2	3,8	0,6	81,8
6	- 225 μm	6,7	3,3	3,0	0,5	86,4
7	- 175 μm	7,0	3,2	3,3	0,6	85,8
8	- 125 μm	7,0	3,1	3,0	0,5	86,3
9	- 75 μm	6,1	3,0	2,7	0,5	87,4
10	- 25 μm	6,5	2,7	2,7	0,5	87,4
11	+ 25 μm	0,6	-	1,2	0,4	97,8
12	+ 75 μm	-	-	1,1	0,4	98,3
13	+ 125 μm	-	-	0,9	0,4	98,3
14	+ 175 μm	-	-	0,9	0,3	98,4
15	+ 225 μm	-	-	1,1	0,4	98,0
16	+ 275 μm	-	-	0,7	0,4	98,6
17	+ 325 μm	-	-	0,8	0,4	98,6
18	+ 375 μm	-	-	1,0	0,3	98,2
19	+ 425 μm	-	-	1,1	0,4	98,1
20	+ 475 μm	-	-	1,2	0,4	98,2

6. ZÁVĚREČNÉ POSOUZENÍ

Zjištěné defekty byly na základě provedených analýz klasifikovány jako trhliny opožděné (zbrzděné, za studena). Jedná se o trhliny typické pro oceli se sklonem k zakalení. Lze obecně říci, že se začínají tvořit za nízkých teplot (nižších než 250°C), s jistou časovou prodlevou po vychladnutí housenky a mohou se pozvolna šířit několik hodin až dní [3]. Jejich morfologie, místo iniciace i poloha vůči svarové housence závisí hlavně na plasticitě struktury a na hladině i orientaci napětí. Směr šíření je přibližně kolmý na směr nejvyššího tahového napětí, eventuální odchylky souvisí s místním oslabením např. hranic zrn.

Podle Čabelky [4] se vznik trhlín ve zředěné tavné oblasti návaru vyskytuje poměrně zřídka, a to právě pouze při svařování (resp. navařování) základního materiálu austenitickými přídavnými materiály.

V tomto případě pak uvedené defekty obvykle sledují izotermy „kritické náchylnosti“ ke vzniku opožděných trhlín, neboť mají snahu umístit se v oblasti martensitu pocházejícího z nejvyšších austenizačních teplot s maximálním podílem martensitu nejvyšších rozměrů zrn, tzn. původně přehřátého austenitu.

Ve vyhodnocované navařené kolejnici se tento předpoklad lokalizace opožděných trhlín (austenitický přídavný materiál) také potvrdil – řádky trhlín se v austenitu vyskytovaly ve vzdálenosti cca 0,1 – 0,2 mm od hranice tavení a sledovaly přibližně profil vyhoblované drážky, což souhlasí s austenitickými izotermami v přechodové oblasti návaru.

Jako stěžejní problém při navařování austenitického materiálu na kolejnicovou ocel s použitím technologie „drát pod tavidlem“ se zde proto prokázalo nadměrné provaření

a následné promíšení spojovaných materiálů. Nadměrné promíšení souvisí s příliš hlubokým závarem, který je dán jednak úrovní nastavených technologických parametrů procesu navařování (zejména svařovacím proudem, rychlostí navařování a sklonem svařovací hubice) a jednak i geometrií navařované plochy [5]. Uvedené skutečnosti způsobily vznik nežádoucí nerovnovážné martensitické struktury v první housence a lokálně i v teplem ovlivněné oblasti (částečně popuštěný martensit). Chemické složení po zmiňovaném značném promíšení pak odpovídalo charakteru samokalitelné oceli a naměřené hodnoty mikrotvrdosti společně s mikrofotografiemi těchto oblastí také dokládají přítomnost martensitu. S tím úzce souvisí potenciální nebezpečí výskytu opožděných trhlin, které jinak v čistě austenitickém (nepromíšeném) návaru vzniknout nemohou [4].

Přítom výrazné snížení použitých parametrů navařování zde není reálné jednak pro zabezpečení tvarování housenek do předepsaného tvaru drážky, jednak pro potřebu určitého minima vneseného tepla a tomu odpovídajícího ovlivnění teplotního spádu. Možné řešení tohoto problému představuje použití podvrstvy z nízkouhlíkové oceli pod vlastní austenitický návar, o tloušťce zabezpečující vyhovující čistotu návaru i za případného promíšení.

Druhým podstatným kritériem pro dosažení vyhovující jakosti a bezpečnosti návaru zůstává otázka zabezpečení potřebné houževnatosti tepelně ovlivněné zóny základního materiálu. Přítom zvyšování vneseného tepla cestou zvyšování proudového zatížení může vést limitně k nepříznivému promíšení. Kalitelnost použitého kolejnicového materiálu vyžaduje snížení kritické rychlosti ochlazování předehevem na cca 50°C nad teplotu M_s , tj. navrhovaný rozsah 300 - 350°C.

Zároveň se prokázala nutnost přihlídnout k řadě dalších faktorů, které souhrnným působením výrazně ovlivňují budoucnost návaru. Jedná se především o otázku jakosti navařované drážky ve smyslu nutné celistvosti povrchové vrstvy a celkové míry vnesených prutů do návaru, zahrnující spolu s napětovým polem od samotného navařování i vlivy konečné úpravy návaru do předepsaného profilu.

Poděkování: Autoři by chtěli na tomto místě poděkovat pracovníkům odboru fázové a strukturální analýzy Ústavu materiálového inženýrství Františka Piška FS VUT v Brně, jejichž vědomostí a zkušeností značnou měrou přispěly k dosažení prezentovaných výsledků.

Lektorovala: Doc. Ing. Eva Münsterová, CSc.

Předloženo v prosinci 1998.

Literatura

- [1] Beneš, L. - Schmidová, E.: Analýza příčin defektů v návarech tramvajových kolejnic provedených automatem pod tavidlem bez předehevu. Výzkumná zpráva úkolu č. 13/98.
- [2] Hrivňák, I.: Elektronová mikroskopie ocelí. VEDA Bratislava, 1986.
- [3] Žák, J. - Novák, M.: Teorie svařování, skriptá VUT Brno (1988), s. 96-108.
- [4] Čabelka : Zvaritelnost kovů a zliatin; vybrané stavy, VEDA (1977).
- [5] Winter, K. - Schabereiter, H. - Reiterer, J.: Regenerieren von Straßenbahnschienen mittels der UP-Schweißung. In: Schweisstechnik 5 (1995), s. 74-78.

Eva Schmidová, Libor Beneš:

Analýza příčin defektů v návarech tramvajových kolejnic

Resumé

ANALÝZA PŘÍČIN DEFEKTŮ V NÁVARECH TRAMVAJOVÝCH KOLEJNIC

Eva SCHMIDOVÁ, Libor BENEŠ

Práce obsahuje metalografické a chemické analýzy, podepřené naměřenými hodnotami mikrotvrdosti experimentálních návarů žlábkových kolejnic. Na základě souboru získaných dílčích výsledků usuzuje na příčiny a mechanismus vzniku pozorovaných defektů a s ohledem na sledované použití aplikované technologie pak obsahuje navrhovaná opatření v rámci celkového projektu zvyšování jakosti tramvajových kolejnic.

Summary

ANALYSIS OF DEFECTS IN TRAMWAY RAIL WELD DEPOSITS

Eva SCHMIDOVÁ, Libor BENEŠ

The work deals with metallographic and chemical analyses supported with microhardness measurement of experimental weld deposits on tramway rails. The causes and mechanisms of the observed defects origin on the basis of the obtained separate results are assumed, with respect for the application of the used technology. Finally, the prerequisite arrangements in frame of the entire project aimed at tramway rail quality increase are submitted in the paper.

Zusammenfassung

ANALYSE DER URSACHEN VON ANSCHWEISSUNGSSCHÄDEN AUF DEN STRASSENBAHNSCHIENEN

Eva SCHMIDOVÁ, Libor BENEŠ

Der Beitrag beinhaltet die metallographischen und chemischen Analysen die durch die gemessenen Werte der Härte der versuchsmässig durchgeführten Anschweissungen an den Rillenschienen unterstützt wurden. Es wird von der gewonnenen Teilergebnissen auf die Ursachen und den Mechanismus des Entstehens der betrachteten Schaden geschlossen. Mit Rücksicht auf die verfolgte und angewandte Technologie werden die entworfenen Massnahmen im Rahmen des gesamten Projekts zur Güterhöhung der Strassenbahn eingeführt.

100
101
102
103
104
105