

RENOVACE JÍZDNÍ PLOCHY HLAVY KOLEJNICE NAVAŘOVÁNÍM PLAZMOU

RENOVATION OF THE RAIL HEAD RUNNING SURFACE BY PLASMA WELDING

Bohumil CULEK¹, Eva SCHMIDOVÁ²

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252666

ISSN: 3029-8342



Abstrakt

Příspěvek prezentuje výsledky analýz návaru kontaktní vrstvy kolejnic vytvořené technologií plazmového navařování, s cílem zvýšení kontaktně-únavové odolnosti dynamicky namáhaných úseků tratě, popř. oprav v rámci prediktivní údržby. Ověřeny byly možnosti aplikace vysocelegované austenitické oceli, s definovanou geometrií navařované vrstvy pro zkoušky mechanické odezvy svarového kovu i tepelně ovlivněných vrstev. Experimentálně byla ověřena možnost použití technologie plazmového navařování bez předehřevu při použití reálného profilu standardní vysoceuhlíkové kolejnicové oceli. Výsledky experimentálních analýz potvrzují potlačení nežádoucích strukturních změn na hranici ztavení i v tepelně ovlivněné zóně v závislosti na postupu formování vrstev. Uveden je experimentální postup ověřování návaru (jeho soudržnost se základním materiálem, odolnost proti opotřebení a vzniku kontaktně únavového poškození).

Klíčová slova

hlava kolejnice, renovace, navařování plazmou

Abstract

The contribution presents the results of clad contact layers analyses on rails produced using plasma welding technology. The aim is to enhance the contact fatigue resistance of dynamically loaded rail sections or local repairs within the framework of predictive maintenance. The study investigates the applicability of highly alloyed austenitic steel, employing a defined cladding layer geometry to evaluate the mechanical response of the weld metal and heat-affected zones. The plasma welding technology without preheating was experimentally validated using a real profile of standard high-carbon rail steel. The results of the experimental analyses confirm the suppression of undesirable structural changes at the fusion boundary and within the heat-affected zone. The article describes the experimental procedure for evaluating the cladding, including its adhesion to the base material, resistance to wear, and susceptibility to contact fatigue damage.

Keywords

rail head, renovation, plasma welding

¹ **prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.**,  0000-0002-0098-9934. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky. Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, tel.: +420 466 038 167, e-mail: bohumil.culek@upce.cz

² **prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.**,  0000-0002-9149-7504. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Výukové a výzkumné centrum v dopravě. Doubravice 41, 533 53 Pardubice, Česká republika, tel.: +420 466 038 507, e-mail: eva.schmidova@upce.cz

1 ÚVOD

V rámci řešeného projektu „Prediktivní údržba kolejové dopravní cesty“ bylo jedním z výstupů navrhnout, vyrobit a provozně ověřit kontaktní plochu kolejnic, která bude odolnější proti opotřebení a také odolnější proti vzniku trhlin v důsledku kontaktní únavy odehrávající se ve styku kol kolejových vozidel s kolejnicemi. Současná prevence limitujícího poškození kontaktních ploch kolejnic je založena na průběžné nedestruktivní kontrole, přičemž přesné stanovení mezních hodnot poškození dle normativně stanovených přístupů lomové mechaniky není, vzhledem ke komplexnosti provozního zatížení, reálné. Při indikaci kritického rozsahu poškození kontaktních ploch kolejnic podle zavedené kategorizace a přípustnosti jednotlivých typů degradace kolejnicových profilů [1] je předepisováno rychlostní omezení, oprava nebo kompletní výměna daného úseku kolejnic, což je ve všech situacích spojeno se značnými finančními nároky a omezením provozu.

Vytvoření odolnější kontaktní vrstvy kolejnic při zachování optimálního vlivu kontaktu kolo-kolejnice na degradaci kol kolejových vozidel by tyto náklady radikálně snížilo. Přitom by byla zvýšena bezpečnost provozu na železnici, protože odolnější kontaktní vrstva by výrazně snížila pravděpodobnost vzniku únavových lomů kolejnic, které se v současné době v provozu stále vyskytují. Vytvoření fázového rozhraní, může efektivně zabránit příčnému rozvoji povrchově iniciovaných trhlin; což je rozhodující z hlediska bezpečnosti proti náhlému lomu. V zahraničí je výzkum tvorby strukturně heterogenních kontaktních vrstev v procesu kontaktu kolo-kolejnice v současnosti orientován převážně na aplikaci technologie laserového navařování. Při zvážení možností a požadavků pro aplikaci v reálných podmínkách, rovněž posouzení možností navařování bez předeřevu, byl presentovaný výzkum zaměřen na plasmové navařování. Tato technologie poskytuje možnosti plné automatizace, minimální zónu natavení u chemicky heterogenních rozhraní při vyšší výtěžnosti svarového kovu a podstatně menších nárocích na realizaci v provozních podmínkách.

2 NAVAŘOVÁNÍ KONTAKTNÍ PLOCHY PLAZMOU

2.1 Podstata navařování

Záměrem je vytvoření povrchové vrstvy v kontaktní ploše kolejnice (viz obr.1) z materiálu o vyšší odolnosti proti adhesivně-abrazivnímu opotřebení a s vyšší odolností této vrstvy proti kontaktně-únavovému poškození. Potlačení radiálního větvení povrchově iniciovaných trhlin je možné zvýšením dosahu plastické deformace, což de facto u standardních kolejnicových materiálů znamená pokles únavové odolnosti. Výzkum se proto zaměřil na materiály s přirozenou kapacitou k dynamickému zpevnění, které současně přináší schopnost nesrovnatelně vyšší energetické náročnosti do lomu.

Dále presentovaný materiál kontaktní vrstvy je z vysocelegované austenitické oceli a je aplikován ve stavu kolejnice před provozním nasazením, respektive uvažovaný variantně při opravách již provozovaných kolejnic s indikací iniciace kontaktně-únavového poškození. Cílem je prevence následného intenzivního provozního poškození jízdní plochy extrémně dynamicky zatěžovaných úseků kolejnice. V obou případech se jedná o zvýšení životnosti kolejnic, a tedy úsporu finančních nákladů a ve svém důsledku o snížení počtu provozních poruch kolejnic, a tedy zvýšení bezpečnosti provozu.

Pro tvorbu strukturně a chemicky kontrastní povrchové vrstvy oproti základnímu materiálu kolejnice je použita technologie pulzního navařování plazmou, která zabezpečuje minimalizaci promíšení materiálu kontaktní vrstvy s uhlíkovou kolejnicovou ocelí. Provedena byla sada experimentů, zaměřena na upřesnění vlivu geometrie a postupu tvorby vrstev na mikrostrukturu návarů a tepelně ovlivněných zón. Tyto práce souhrnně směřovaly k realizaci provozních zkoušek, tj. k vyhotovení referenčního vzorku kolejnice o požadovaných rozměrech.

Do komplexu experimentů byly postupně zařazeny variantní materiály odlišné strukturní báze:

- SZW 5049 jako varianta pro kontaktní vrstvu, v prezentovaném případě bylo použito provedení přídatného materiálu v podobě prášku, variantně CORODUR 250K A;

- SKWAM-P, OK Aristrod 13.08 v roli případné mezivrstvy pro zabezpečení plynulého gradientu v geometricky problematických oblastech apod.

Chemické složení přídatného materiálů v zde prezentovaných analýzách a výsledek spektrální analýzy použité kolejnice pro experimenty jsou uvedeny v tab. 1. Do posouzení dosažených výsledků jednotlivých kroků v optimalizaci tvorby vrstvy bylo navíc nutno zahrnout potřebu výchozího zpevnění kontaktní plochy v případě použití této austenitické varianty. Uvedené zpevnění je rozhodujícím efektem zejména v případě zvýšené adhesivně-abrazivní složky zatížení, kdy nelze uvažovat „přirozené“ dynamické zpevnění v kontaktu a je potřeba zamezit zvýšenému opotřebení v prvních etapách provozního zatížení.

Tab. 1 Chemické složení aplikovaných materiálů u prezentované varianty návaru

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Co
SZW 5049	0,5	0,5	15	-	-	14	0,4	1	0,2	
substrát	0,73	0,335	0,9	0,0092	0,0041	0,049	0,0064	-	-	-

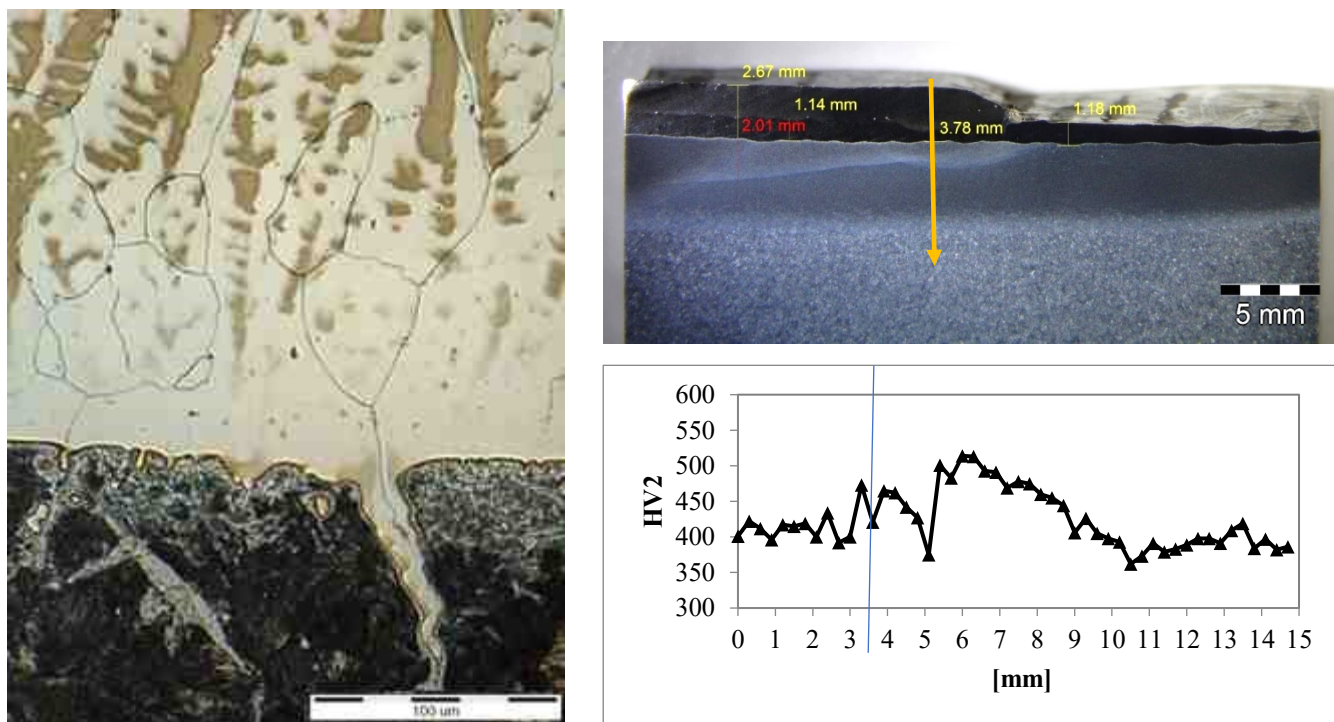


Obr. 1 Vytvořená povrchová vrstva v kontaktní ploše kolejnice

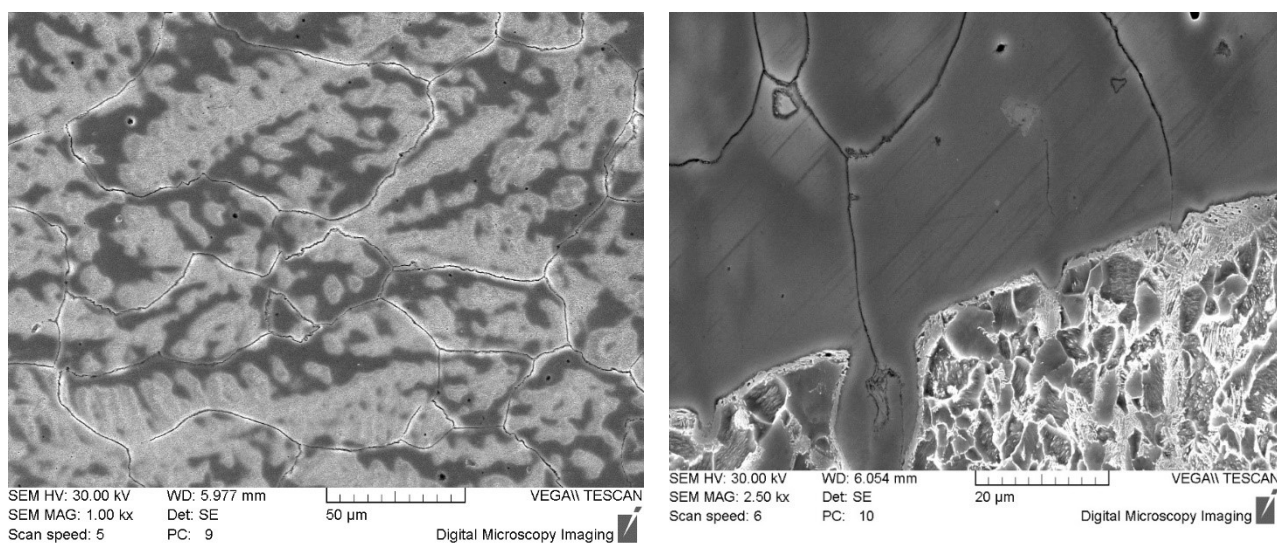
Materiál SZW 5049, uvažovaný jako přednostní varianta kontaktní vrstvy, je typický kombinací dynamické odolnosti a odolnosti proti opotřebení. Limitující je zjištěná citlivost tohoto materiálu na tepelný příkon. Pro eliminaci tohoto vlivu byla po celou dobu navařování kontrolována interpass teplota, stanovená pro všechny varianty tvorby vrstev na 140°C.

Jedním z klíčových výsledků dané sady experimentů bylo zjištění, že za jisté kombinace postupu kladení jednotlivých housenek lze i při minimalizaci teplotního příkonu potlačit tvorbu vysokouhlíkového martenzitu v tepelně ovlivněné oblasti perlitické kolejnicové oceli – obr. 2. V provedení jednovrstvého návaru je vyhovující stav podnávarové zóny zabezpečen opakovanou austenitizací trapézovou geometrií formování vrstvy.

Dalším zásadním výsledkem materiálových analýz dané experimentální sady bylo zjištění limitů z hlediska homogenity austenických vrstev. Podél hranice ztavení byla zjištěna pouze nesouvislá precipitace karbidů po hranicích zrn (obr. 3).



Obr. 2 Stav hranice ztavení a podnávarové zóny u jedno- vs. dvouvrstvého návaru



Obr. 3 Strukturní stav návaru podél fúzní zóny

2.2 Tvorba kontaktní vrstvy

Tvorba kontaktní vrstvy pro ověřování sestává z následujících kroků:

- Příprava povrchu kolejnice v závislosti na stavu kontaktního povrchu původní kolejnice.
- Vytvoření drážky frézováním, popř. broušením kontaktní plochy kolejnice do hloubky 3,5–5 mm (viz obr. 4). Hloubka odstraněné vrstvy, vytvořené drážky musí být stejnoměrná v šířce 20–30 mm od pojezdové hrany kolejnice. Výběh frézování drážky do původního povrchu kolejnice pod úhlem 30–45°, po celém obvodu drážky. Kontrola stavu povrchu drážky, v případě výskytu nespojitostí tyto nutno předem odstranit zavařením v souladu se schválenými technologickými postupy oprav navařováním pro daný materiál.
- Navaření vrstvy trapézovou geometrií použitím vysocelegovaného materiálu ve dvou chemicky odlišných vrstvách.

- V případě přesahu celkové výšky návaru nad úroveň původní kontaktní plochy kolejnice následuje broušení povrchu na předepsaný profil kolejnice. V případě použití austenitické oceli pro návar horní vrstvy lze ponechat přesah do 0,2 mm nad úroveň původní kontaktní plochy kolejnice, reliéf povrchu po plazmovém navařování nevyžaduje broušení.



Obr. 4 Vytvořená drážka pro navařování plazmou



Obr. 5 Detail kontaktní vrstvy navařené plazmou

2.3 Použitá zařízení pro navařování plazmou

- Plazmový navařovací automat (např. Plazmový navařovací automat firmy KSK Česká Třebová – viz obr. 6) konstrukčně upravený i pro navařování na kolejnicích v provozované koleji. Pro presentované experimenty byl konkrétně použit Plazmový navařovací automat PPC 250GMR, se čtyřosým řízením hořáku (parametry navařování – podélný posuv 1,7 mm/s; 180–200 A).
- Ovládací SW (např. SW plazmového navařovacího automatu KSK, programovatelný v dialogu).
- Termokamera pro měření a záznam teploty kolejnice v průběhu navařování kontaktní povrchové vrstvy kolejnice (např. Termokamera Testo 875-2).



Obr. 6 Plazmový navařovací automat KSK

3 POSTUP OVĚŘOVÁNÍ NÁVARU

K ověření návaru byl vyroben funkční vzorek (FV) metrového segmentu kolejnice R65 ze standardní perlitické kolejnicové ocele kategorie R260, který byl vložen do koleje (viz obr. 7). Výchozím krokem pro výrobu FV bylo vyhotovení experimentálního kotouče s kontaktní vrstvou na obvodu kotouče použitím plasmového navařování práškem. Kotouč představoval specifický vzorek pro laboratorní zkoušky vyvíjené technologie tvorby kontaktní vrstvy z hlediska kontaktně-únavové odolnosti a odolnosti proti opotřebení. Uvedené zkoušky v laboratorních podmínkách na Testovacím zařízení VDP (viz obr. 8) předcházely provozním zkouškám s předmětným FV.



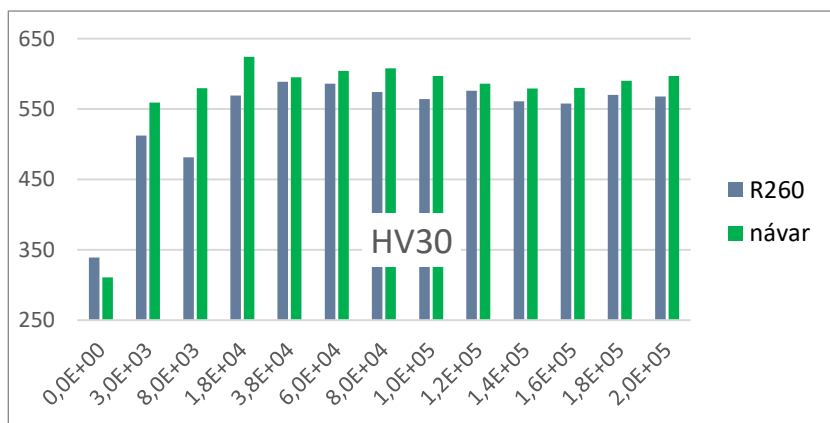
Obr. 7 Funkční vzorek v provozované koleji



Obr. 8 Testovací zařízení VDP

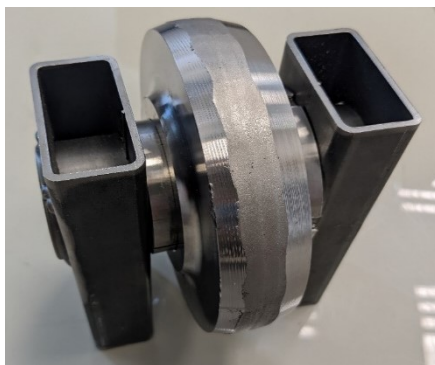
Zkušební kotouč byl vyhotoven z kolejnicové oceli stejné kategorie jako FV; tvar a rozměry kotouče odpovídaly požadavkům certifikované metodiky „Kontaktně-únavová zkouška materiálů v kontaktu kolo–kolejnice“ (osvědčení uděleno v rámci projektu č. TE01020038 „Centrum kompetence drážních vozidel 2015). Povrch kotouče byl upraven na rádius 60 mm, pro zabezpečení kontaktní geometrie standardní kolejnice. Použité parametry zkoušek: kontaktní tlak 1150 MPa, příčný skluz 0,5 %; podélný skluz 1 %. V definovaných etapách zatěžování byly testované kotouče vyjmuty z testovacího zařízení a podrobeny vyhodnocení stavu kontaktního povrchu a intenzity opotřebení. Hodnocené parametry: intenzita opotřebení měřením hmotnostních úbytků (s přesností 0,01 g); sledování stavu povrchu se zaměřením na případnou iniciaci trhlin; tvrdost kontaktního povrchu (metoda měření HV30, 3 měření v každé etapě zatěžování); měření meze kluzu cyklickou indentací (použitím kuličkového indentoru o průměru 1 mm, celkem 15 zatěžovacích cyklů s rozsahem zatížení 60–400 N dle ISO 6506-1 a ISO/TR 29381).

Průměrné hodnoty měřených parametrů v odpovídajících si segmentech po obvodu testovacích kotoučů ve srovnání testovaných materiálů prezentuje obr. 9. Nutno uvést, že výchozí tvrdost, při zkoušce kontaktně-únavové odezvy byla částečně ovlivněna zpevněním při opracování povrchu soustružením; u materiálu typu Hadfieldovy oceli je tento efekt výraznější.



Obr. 9 Vývoj zpevnění při testovaném kontaktním zatížení

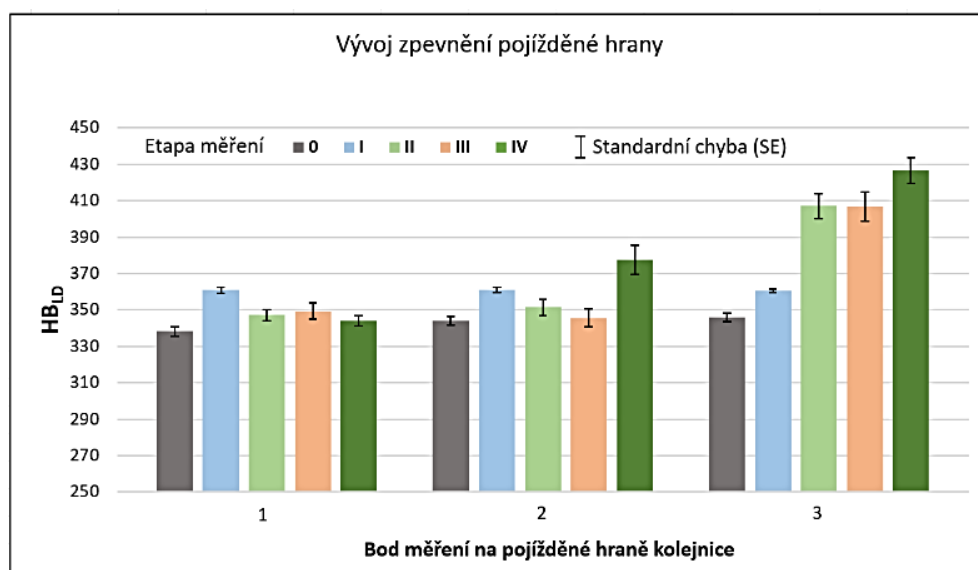
Stav kotouče např. po 450 tis cyklech (viz obr. 10) – kotouč nevykazoval známky porušení typu kontaktní únavy ani po 2 mil. cyklech. Opotřebení kontrolované váhovým úbytkem kotouče bylo oproti klasickému materiálu kolejnic 2,1krát nižší. FV v koleji byl a je v pravidelných (z počátku 3 měsíčních – nyní půlročních) intervalech kontrolován na vznik únavových poruch, změnu tvrdosti a opotřebení plazmou navažené vrstvy. Na obr. 11 jsou uvedeny hodnoty tvrdosti, které ukazují počáteční zpevňování navažené vrstvy (hlavně pojížděné hrany) až do docílení stabilního stavu tvrdosti. Dokumentuje to vývoj zpevnění separátně v měřených pozicích zatěžované oblasti navažené kontaktní plochy (v průměrných hodnotách tvrdosti z jedenácti míst podél FV).



Obr. 10 Testovací kotouč v průběhu kontaktně-únavových zkoušek na VDP (v nosiči pro průběžné měření tvrdosti)

Rozdíly hodnot v jednotlivých etapách měření jsou částečně ovlivněny rozptylem hodnot, což souvisí s metodou měření. Výsledky ale jednoznačně ukazují na postupný nárůst tvrdosti na pojížděné hraně kolejnice s navaženou kontaktní vrstvou (pozice měření č. 3, obr. 12), u posledního provedeného měření (3/2025) byla zjištěna hodnota tvrdosti nad 430 HB.

Z hlediska cíleného vlivu na živostnost úseku je podstatné, že na nejvíce zatěžované části kontaktní plochy dochází k postupnému nárůstu tvrdosti, bez tvorby povrchových šupin nebo jiných známek poškození provozně zpevňované kontaktní plochy. U posledního měření je zřejmý nárůst tvrdosti v pozici měření č. 2, obr. 12, což svědčí o přenosu zatížení od pojížděné hrany částečně směrem k temenu kolejnice.



Obr. 11 Hodnoty tvrdosti navažené kontaktní vrstvy



Obr. 12 Měřená místa tvrdosti

4 ZÁVĚR

Souhrnně z výsledků vyplynuly následující poznatky směrem k navazujícímu výzkumu:

- potvrzena byla možnost dosažení vyhovujícího stavu tepelně ovlivněné vrstvy u 1vrstvého návaru i při kontinuální tvorbě vrstvy – v režimu „trapez“;
- pro budoucí praktickou aplikaci je potřeba řešit ukončení vrstev na přechodu do neupravené části kolejnice (zabezpečit opakovanou austenitizaci);
- použitý režim tvorby vrstev zabezpečil kompaktnost vrstev i propojení se základním materiálem;
- došlo ke zvýšení precipitace karbidů, akceptovatelnost intenzity tohoto procesu nutno ověřit dynamickými zkouškami (proces není reálné kvantifikovat, rovněž není k dispozici normativ z hlediska limitů pro danou aplikaci).

Výsledky v příspěvku prezentovaného výzkumu ukazují, že vyvinutá (v laboratoři ověřená a v provozu sledovaná) technologie navařování kontaktní vrstvy kolejnice plazmou vykazuje výrazně lepší vlastnosti jak v kontaktní únavové odolnosti, tak i v opotřebením. Přitom testy na Testovacím zařízení VDP ukázaly, že mechanické vlastnosti kontaktní vrstvy nezpůsobují nadměrné opotřebení a celkovou degradaci v kontaktu jsoucího kola VDP, které je z klasického materiálu R8 běžného železničního kola. Kdybychom vzali v úvahu všechny přednosti představené technologie a zavedli ji do praxe, znamenalo by to jednak velké úspory v podobě snížení potřeby nových kolejnic a také nemalou úsporu v objemu oprav a údržby provozovaných kolejí jak na železnici, tak v městské kolejové dopravě.

Výzkum byl realizován v rámci projektu TAČR č. CK02000177 „Prediktivní údržba kolejové dopravní cesty“ v rámci programu DOPRAVA 2020+.



Literatura

- [1] SŽ S3/7. *Vady a lomy pojížděných součástí železničního svršku*. Správa železnic, s. o., Odbor traťového hospodářství, 2022.
- [2] P-NA-M-04/2021. *Navařování srdcovek výhybek s nadměrným opotřebením poloautomatem plněnou elektrodou*. Správa železnic, s. o., 2021.
- [3] SCHMIDOVÁ, E., CULEK, B., DADKHAH, A., KLEJCH, F. Pokročilé technologie tvorby heterogenních svarových rozhraní. In: *PROMATTEN 2023 – Odborná konference o progresivních materiálech a technologiích, sborník příspěvků*. Ostrava: VŠB-TUO, 2023.
- [4] CULEK, B., SCHMIDOVÁ, E., MALINSKÝ, J., CULEK, B., Jr., PULDA, J. Experimentální výzkum materiálů kol a kolejnic na stendu VDP Univerzity Pardubice. In: *Súčasné problémy v koľajových vozidlách – PRORAIL 2023: XXVI. medzinárodná konferencia, zborník prednášok, diel I*. Žilina: VTS pri ŽU v Žiline, 2023, s. 53–60. ISBN 978-80-89276-61-5.

Zasláno / received: 16. 06. 2025, přijato / accepted: 17. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: prof. Ing. Pavel Hutař, Ph.D. (Akademie věd České republiky, v.v.i., Ústav fyziky materiálů), Ing. Libor Dvořák a Richard Chvátal (Správa železnic, státní organizace, Centrum techniky a diagnostiky).