

Metodika tvorby gradientních kontaktních povrchů kolejnic

Autoři: prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.¹⁾
prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.¹⁾
Ing. Pavel Rohan, Ph.D.²⁾
Ing. Zdeněk Malkovský, Ph.D.³⁾
Ing. Lukáš Sobotka⁴⁾

¹⁾ Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera

²⁾ ČVUT Praha, Fakulta strojní

³⁾ VÚKV, a.s.

⁴⁾ COLD SPRAY-rail s.r.o.

Metodika je výstupem z řešení projektu TAČR č.CK02000177

„Prediktivní údržba kolejové dopravní cesty“.

Pardubice 4/2024

Obsah:

1. Úvod	2
2. Cíl metodiky.....	2
3. Pojmy, zkratky, použité přístroje a software	3
4. Popis metodiky.....	4
5. Novost postupů a zdůvodnění metodiky	5
6. Popis uplatnění metodiky	7
7. Ekonomické aspekty	8
8. Seznam použité literatury:.....	10
9. Seznam publikací, které předcházely metodice	10

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 poškozování kontaktních ploch kolejnic je založena na průběžné nedestruktivní kontrole, přičemž přesné stanovení mezních hodnot poškozování dle normativně stanovených přístupů lomové mechaniky není vzhledem ke komplexnosti provozního zatížení reálné. Při indikaci kritického rozsahu poškozování kontaktních ploch kolejnic podle zavedené kategorizace a přípustnosti jednotlivých typů degradace kolejnicových profilů 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 (viz. **Obr.1**), které se v současné době v provozu stále vyskytují.



Obr.1 Příklad provozního únavového lomu kolejnice [1]

2. Cíl metodiky

Cílem dále popsané metodiky je umožnit provádění nového způsobu preventivního, případně opravárenského navařování kontaktní vrstvy na kolejnice za účelem prevence poškozování kolejnic, zvýšení jejich životnosti a celkově zvýšení bezpečnosti provozu na železnici, respektive v městské tramvajové dopravě.

3. Pojmy, zkratky, použité přístroje a software

Pojmy a zkratky: jsou vysvětleny v textu metodiky, základní pojmy jsou následující:

- **Provozní degradace kolejnic:** zahrnuje degradaci kolejnic z hlediska jejich opotřebení, jehož meze jsou u SŽ dány předpisem SŽDC S3, díl IV. a velikostí a závažností vad kolejnic (zejména kontaktně-únavových vad), o kterých pojednává interní předpis SŽ S3/7.
- **Opotřebení kolejnic:** opotřebení materiálu kolejnic probíhá vlivem smykových sil v kontaktu kolo-kolejnice a je kritické především v úsecích tratí s výraznější složkou příčného skluzu, tj. v obloucích tratí s malými poloměry. V důsledku opotřebení dochází ke změně profilu kolejnic především v příčném směru (viz **Obr.2**) a tím i ke změně geometrických parametrů koleje.
- **Kontaktně-únavová odolnost kolejnic:** jízdou kolejového vozidla po koleji dochází v kontaktu kolo-kolejnice k únavovému procesu, který vede k postupné degradaci materiálu kolejnice až v mezním stavu ke vzniku trhliny na kontaktní ploše (viz **Obr.3**). Dobu do vzniku trhliny, respektive četnost kontaktů kola s kolejnicí do vzniku trhliny, lze charakterizovat pojmem kontaktně-únavová odolnost.
- **Kontaktní vrstva kolejnic:** vrstva v kontaktní ploše hlavy kolejnice v současné době prováděná výlučně pro reprofilaci opotřebené kolejnice, podle této nové metodiky vytvořená případně preventivně i u nových kolejnic.
- **Navarování kolejnic:** je technologický postup dnes běžně používaný pro obnovu normového profilu provozně opotřebovaných kolejnic prakticky stejným materiálem jako je základní materiál kolejnic, podle nové metodiky se jedná o navarování plazmou materiálem, který je odolnější proti opotřebení i vzniku kontaktně-únavových poruch.



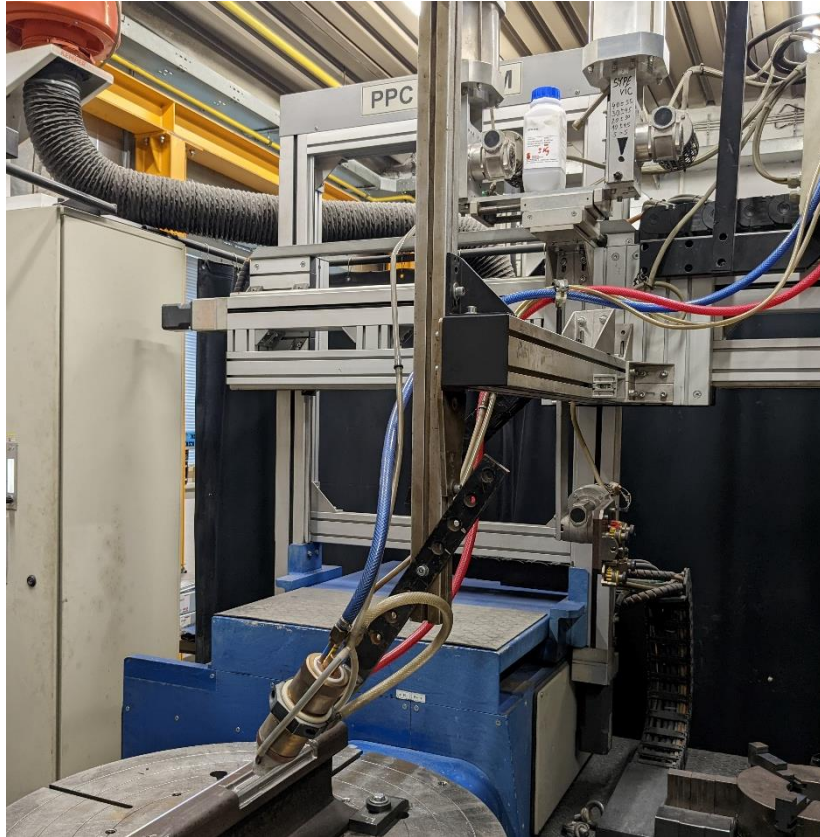
Obr.2 Příklad opotřebeného profilu kolejnice [1]



Obr.3 Příklad kontaktně-únavového poškození hlavy kolejnice (head check) [1]

Použitá zařízení, přístroje a software:

- Plazmový navařovací automat (např. Plazmový navařovací automat KSK -viz **Obr.4**),
- Ovládací SW (např. SW plazmového navařovacího automatu KSK),
- Termokamera pro měření a záznam teploty kolejnice v průběhu navařování kontaktní povrchové vrstvy kolejnice (např. Termokamera Testo 875-2).
-



Obr.4 Plazmový navařovací automat KSK

4. Popis metodiky

Podstata nové metodiky spočívá v následujícím:

- Vytvoření povrchové vrstvy v kontaktní ploše kolejnice (viz **Obr.5**) z materiálu o vyšší odolnosti proti adhesivně-abrazivnímu opotřebení a s vyšší odolností této vrstvy proti kontaktě-únavovému poškození.
- Materiál kontaktní vrstvy je z vysocelegované oceli a je aplikován ve stavu kolejnice před provozním nasazením, respektive variantně při opravách již provozovaných kolejnic s cílem prevence následného provozního poškození (degradace) kolejnice a v druhém případě k vytvoření, respektive k obnovení odolnosti kolejnice proti provoznímu poškození. 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.



Obr.5 Vytvořená povrchová vrstva v kontaktní ploše kolejnice

5. Novost postupů a zdůvodnění metodiky

Materiál kolejnic v kontaktu kolo-kolejnice je podroben komplexnímu provozním zatížení. Různé poměry složek abrazivního a adhesivního opotřebení v kombinaci s kontaktně-únavovým zatížením vede nejenom k opotřebení kontaktních ploch, ale i ke vzniku povrchově iniciovaných únavových trhlin s rizikem náhlého rozvoje poškození do celistvých lomů kolejnic. Při indikaci kritického rozsahu poškození kontaktních ploch kolejnic podle zavedené kategorizace a přípustnosti jednotlivých typů poškození (degradace) kolejnicových profilů se přistupuje k opravě nebo kompletní výměně kolejnic daného úseku tratě. Pro opravy provozně poškozených kontaktních ploch jsou v současnosti schválené technologie oprav navařováním, specifikované podle konkrétního materiálového provedení kolejnice nebo výhybkové součásti. Současné metody tvorby vrstev na kontaktní ploše kolejnic jsou tedy výlučně cíleny na reprofilace kolejnicových profilů, tj. opravy provozního poškození nebo opotřebení. Opravy takto poškozených kontaktních povrchů navařováním vyžadují broušení degradovaných vrstev a následnou defektoskopickou kontrolu pro ověření celistvosti materiálu před i po navařování. Z technologického hlediska jsou současné známé postupy oprav kolejnicových profilů navařováním založeny na aplikaci materiálů, které se svým chemickým složením blíží složení základního materiálu kolejnic. U standardních kolejnic se jedná o perlitické oceli s pevnostními kategoriemi podle obsahu uhlíku v rozsahu 0,5-0,8 % C. Pro zamezení nadkritického ochlazení a vzniku vysokouhlíkového martenzitu s kritickou ztrátou houževnatosti a rizikem vzniku trhlin v podnávarových vrstvách je v současně používaných technologických postupech pro

železniční tratě předepsán vysokoteplotní přehřev v kombinaci s dohřevem, popř. izolačním zábalem, variantně se používají technologie navařování se zvýšeným teplotním příkonem pod tavidlem a podobně.

Novost předkládané metodiky spočívá v použití vysoce legovaných materiálů s odlišnou strukturní bází s vyšší kontaktně-únavovou odolností a odolností proti opotřebení. Takto vytvořená povrchová vrstva kolejnice znamená vznik strukturně heterogenního svarového rozhraní, u kterého nedochází k chemickému promíšení základního a dodaného vysocelegovaného materiálu. Materiál kontaktní vrstvy je aplikován ve stavu kolejnice před provozním nasazením, případně v opravě provozně poškozených (degradovaných) kolejnic s cílem prevence následného provozního poškozování a tím zvýšení jejich životnosti a snížení rizika vzniku trhlin a případných lomů kolejnic. Pro tvorbu takto strukturně a chemicky kontrastní povrchové vrstvy oproti základnímu materiálu kolejnice je použita technologie pulzního navařování plazmou, která zabezpečuje minimalizaci promíšení s uhlíkovou kolejnicovou ocelí původní kolejnice. Technologie je aplikovatelná před instalací kolejnic do tratě i v provozních podmínkách po jejich instalaci. V případě aplikace v provozních podmínkách je doba, úsek a aplikace zvolena na základě predikce provozního opotřebení, tj. v závislosti na konkrétních provozních podmínkách ve stadiu opotřebení, respektive vzniku únavové poruchy, která ještě nedosahuje mezní hodnoty podle souvisejících předpisů, ale jednoznačně indikuje lokalizované zvýšené poškození v daném úseku tratě. Další novostí této metodiky je to, že navařování plazmou je bez přehřevu, tj. s minimalizací nároků na provedení a stabilizaci procesu. To umožňující aplikaci i u tramvajových kolejnic v zabudované koleji v pozemní komunikaci. Vysoká lokalizace tepelného příkonu navařování plazmou v kombinaci s geometrií návarových vrstev zabezpečuje opakovanou austenitizaci pásma podél linie ztavení a tím potlačení vzniku vysokouhlíkového martenzitu. Zároveň dochází ke zjemnění struktury v tepelně ovlivněné oblasti při dosažení plynulého gradientu tvrdosti skrze svarové rozhraní. Zabezpečení dostatečné houževnatosti materiálu v tepelně ovlivněné vrstvě výchozí kolejnicové oceli (zamezení vzniku pásma vysokouhlíkového martenzitu) je zabezpečeno opakovanou austenitizací režimem kladení jednotlivých vrstev návaru.

Tvorba kontaktní vrstvy 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.6**). 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 základní vrstvy trapézovou geometrií, tloušťka vrstvy min.1,5 mm použitím materiálu:

Max hm.%: 0,3C/ 2Si/ 3Mn/ 2Cr/ 2Ni/ 0,5Mo v provedení prášku, variantně navařovacího drátu v jedné vrstvě.

- Navaření horní vrstvy v liniích trapézovou geometrií, tj. nejdříve podél obvodu drážky, následuje základní vrstva, a nakonec horní vrstva, tloušťka vrstvy 2-3 mm (detail viz **Obr.7**), v provedení prášku, variantně plněného drátu v jedné vrstvě použitím materiálu:

max hm.%: 0,3C/ 2Si/ 3Mn/ 2Cr/ 2Ni/ 0,5Mo

max hm.%: 0,6C/ 0,8Si/ 17Mn/ 14Cr/ 1,5Ni / 0,5Mo

- 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.

Uvedeným postupem je dosaženo zvýšení provozní odolnosti kontaktní plochy kolejnicového profilu, proti adhezivně-abrazivnímu opotřebení a zejména odolnosti proti iniciaci kontaktně-únavových trhlin. Prodloužení doby do iniciace únavových trhlin je zároveň spojeno s podstatným zvýšením odolnosti proti náhlému porušení kolejnicových profilů. Zvýšení bezpečnosti je principiálně dosaženo:

- (i) použitím materiálu při tvorbě kontaktního povrchu s podstatně vyšší stabilitou proti náhlému rozvoji trhlin ve smyslu vyšších hodnot lomové houževnatosti,
- (ii) použitý materiál přináší vyšší hodnoty rozměrů kritické trhliny a tím umožňuje zvýšení spolehlivosti provozní kontroly a tím bezpečnosti provozu,
- (iii) strukturní a mechanická heterogenita kontaktní vrstvy představuje blokaci příčného rozvoje povrchově iniciovaného poškození v kontaktu kolo-kolejnice.

6. Popis uplatnění metodiky

Předkládaná metodika je předurčena k využití v oblasti železniční dopravy pro novovýrobu i opravy kolejnic v úsecích železničních tratí se zvýšeným provozním namáháním. Tzn. úseky s malými poloměry, ve kterých dochází k vysokým skluzovým a silovým účinkům v kontaktu kol s kolejnicemi a také v oblasti železničních zhlaví, jak samotných výhybek, tak oblouků odbočných kolejí. Metodiku lze využít také ve vybraných úsecích tramvajových tratí např. v zástavbě koleje do pozemní komunikace.



Obr.6 Vytvořená drážka
pro navařování kontaktní vrstvy



Obr.7 Detail kontaktní vrstvy navařené
plazmou

7. Ekonomické aspekty

Ekonomické aspekty lze posuzovat ze dvou hledisek:

- a) Výdaje
 - a. jednorázové odhadnuté vlastní náklady na pořízení Plazmového navařovacího automatu jsou v **Tab 1**,
 - b. provozní náklady na realizaci navařování dle předkládané metodiky jsou naznačeny v **Tab 2**.

Položka	Věcná náplň položky	Kalkulace v tis (Kč)
1	Náklady na pořízení jednoho Plazmového navařovacího automatu, včetně řídicího Software	3750
2	Jednorázové proškolení odborného personálu – dva lidé v trvání 14 dní školení u dodavatele Plazmového navařovacího automatu	100
	Celkové jednorázové náklady	3850

Tab 1- Kalkulace jednorázových nákladů

Položka	Věcná náplň položky – měsíční náklady (předpokládaná účinnost navařovacího Plazmového navařovacího automatu 10m/h)	Kalkulace v tis (Kč)
1	Osobní měsíční náklady na odborný personál – využití 100% kapacity jednoho technika pro realizaci navařování	150
2	Náklady na měsíční provoz Plazmového navařovacího automatu	2500
3	Přídavný materiál pro plazmové navařování	100
4	Finanční rezerva 10% na řešení mimořádných okolností (např. čas potřebný na údržbu navařovacího automatu)	275
	Celkové předpokládané měsíční náklady pro realizaci navařování	3025

Tab 2- Kalkulace provozních nákladů na realizaci navařování

- b) Úspory při zavedení metodiky lze předpokládat v těchto oblastech:
- a. Zásadní přínos metodiky spočívá v tom, že se podstatně zvýší životnost nově vkládaných kolejnic do koleje, respektive již provozovaných a podle této metodiky opravených kolejnic, aniž by se snížila životnost kol kolejových vozidel:
 - i. Lze předpokládat, že v případě nových kolejnic se bude jednat o úsporu pramenící z cca třetinového potřebného množství nových kolejnic a to přes to, že nové kolejnice budou na výrobu o cca 25% cenově nákladnější díky uvedeným nutným výrobním úpravám
 - ii. Pokud jde o již provozované a podle této metodiky opravované kolejnice, zde je úspora naprosto markantní v několika ohledech:
 1. Několikanásobné zvýšení životnosti s ohledem na doby mezi nutnými návary opotřebovaných kolejnic
 2. Mnohonásobné zvýšení životnosti s ohledem na vznik kontaktně-únavových poruch provozovaných kolejnic a jejich nezbytných oprav
 3. Výrazné snížení pravděpodobnosti vzniku lomů kolejnic v důsledku kontaktně-únavových poruch, které je třeba okamžitě řešit, aby nebyla ohrožena bezpečnost provozu.
 - b. Významná úspora bude spočívat v tom, že samotný technologický postup navařování plazmou opotřebovaných, nebo kontaktní únavou poškozených kolejnic, je oproti stávajícím technologiím oprav podstatně méně energeticky

i materiálově náročný. Není zde nutný předehřev ani dohřev opravované kolejnice, což je, pokud mají být striktně dodrženy normové postupy, technicky náročná záležitost.

Na základě uvedených faktů lze konstatovat, že pokud by byla uvedená metodika zavedena do praxe, přinesla by v následujícím dlouhodobém horizontu mnohamilionové úspory jak u Správy železnic, tak i u dopravních podniků s provozovanou tramvajovou dopravou.

8. Seznam použité literatury:

1. Vady a lomy pojížděných součástí železničního svršku, přepis SŽ S3/7, Správa železnic, s.o. GŘ Odbor Traťového hospodářství, 1.2022
2. Předpis P -NA-M-04/2021 - Postup navařování srdcovek výhybek s nadměrným opotřebením poloautomatem plněnou elektrodou, Správa železnic, s.o., 2021
3. Předpis P-NA-P-01/2013 - Postup navařování srdcovek výhybek ručně elektrickým obloukem elektrodou, SŽDC, s.o., 2013

9. Seznam publikací, které předcházely metodice

1. SCHMIDOVÁ E., CULEK B. ST., DADKHAH A., KLEJCH F., Pokročilé technologie tvorby heterogenních svarových rozhraní, Sborník – PROMATTEN 2023 - Odborná konference o progresivních materiálech a technologiích; 2023, 8.-10.11.; VŠB-TUO; Ostrava
2. CULEK, B., et al. Experimentální výzkum materiálů kol a kolejnic na standu VDP Univerzity Pardubice. 2023, 26. „SúčasnÉ problémy v koľajových vozidlách - PRORAIL 2023“, 2023, Žilina, SR
3. SCHMIDOVÁ, E., et al. Role of Nb in the failure of dual-phase steel in heterogeneous welds. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 116: 104708.
4. SCHMIDOVA, E.; HLAVATY, I.; HANUS, P. The weldability of the steel with high manganese. *Tehnicki vjesnik*, 2016, 23.3: 749-752.
5. SCHMIDOVA, E.; CULEK, B.; KAYA, U. Effect of Rolling-Contact Fatigue on the Elastic-Plastic Response of Hadfield steel, Metal 2015, Brno, ČR