UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DEGRADAČNÍ PROCES ŽELEZNIČNÍ VÝHYBKY

DISERTAČNÍ PRÁCE

2011 **Ing. Josef Zbořil**

UNIVERSITY OF PARDUBICE

JAN PERNER TRANSPORT FACULTY

DEGRADATION PROCESS OF RAILWAY TURNOUT

DOCTORAL DISSERTATION

2011 **Ing. Josef Zbořil**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 01. 04. 2011

Ing. Josef Zbořil

Práce byla realizována za podpory Výzkumného centra kolejových vozidel MŠMT ČR, projektu č. 1M0519.

Anotace

Rozvoj železniční dopravy je spojen se zvyšováním provozní rychlosti, zatížení na nápravu a vzrůstajícím objemem přepravy. Při tomto trendu se zvyšují požadavky na spolehlivost a na kvalitu součástí železničního svršku. Volba vhodného typu materiálu či typu konstrukčního řešení podstatně ovlivňuje životnost a spolehlivost součástí na železniční trati. Výhybkové konstrukce jsou nedílnou součástí železniční dopravní cesty, vzhledem k jejich specifické a konstrukční náročnosti jsou i jedním z určujících faktorů spolehlivosti železniční dopravní cesty jako celku. Na kontaktních plochách částí výhybky dochází k opakovaným plastickým deformacím, které časem vedou k vyčerpání plasticity povrchové vrstvy a vzniku kontaktně - únavových vad. Preferovaným technicko-ekonomickým přínosem je řešení, kdy je navýšena cena za kvalitativně lepší železniční výhybkovou konstrukci v oblasti investičních nákladů a snížena v provozních a údržbových nákladech. Vyhodnocení faktorů, ovlivňujících degradační procesy na železniční výhybce, je základním předpokladem pro popis degradace celé železniční tratě a s tím i pro efektivní postupy pro její návrh a údržbu. Práce se zabývá analýzou mezních stavů a mechanismů poškozování různých variant materiálů. Materiálové analýzy provozního poškozování, spolu se statistickým vyhodnocením provozních dat sloužily pro verifikaci výsledků provedených experimentů.

Klíčová slova: železniční výhybka, degradace, kontaktní únava, systém kolo-kolejnice, optimální údržba, laboratorní simulace odvalování

Anotation

Development of rail transport is associated with increasing of operating speed, axle loads and traffic volume. In this trend there are increasing demands for reliability and quality of the parts of whole superstructure. Selection of a appropriate type of material or the type of structural solution substantially affects the service life and reliability of components on the railway track. Turnouts are an integral part of the railway infrastructure, due to their specific and structural sophistications are one of the determining factors of the reliability of the whole railway infrastructure. The upper parts of the turnouts surfaces leads to the repeated plastic deformations, which eventually leads to exhaustion of the plasticity of surface layers and creation of contact - fatigue defects. Substantial technical and economic benefit is a solution where is the increased price for a better quality of the railway turnouts in the area of the investment costs and reduced in operational and maintenance costs. By defining the factors which affecting the degradation processes in the railway turnout, quantification of potential defects and the negative consequences that may occur along with an analysis of limit damage conditions and mechanisms of various structures of the materials compared with the statistical data of traffic is essential for accurate definition of the overall degradation of the whole railway track and with this to define effective procedures for the design and maintenance.

Key words: railway turnout, railway switch, degradation, RCF, wheel-rail system, optimal maintenance, twin-disc machine

Obsah

1. Úvod 4
   1.1 Historický vývoj v oblasti železničních výhybek 5
   1.2 Zatížení od kolejových vozidel 6
2. Současný stav řešené problematiky 8
   2.1 Specifika provozního zatížení 8
   2.2 Degradace a opotřebení železniční trati 9
   2.3 Kontaktně únavové vady 10
   2.4 Údržba a opravy železniční výhybky 13
      2.4.1 Kontroly železničních součástí 15
3. Cíle disertační práce 16
4. Metody zpracování 17
   4.1 Analyzované typy ocelí 19
   4.2 Perlitické oceli 19
      4.2.1 Technologie perlitizace 21
      4.2.2 Vliv teploty 22
   4.3 Austenitická manganová ocel 22
   4.4 Parametry dynamické odezvy aplikovaných materiálů 24
   4.5 Specifikum cyklického zatěžování v systému kolo-kolejnice 28
      4.5.1 Cyklické zpevňování/změkčování 29
      4.5.2 Ratcheting 30
   4.6 Metody studia degradace železničního svršku 31
      4.6.1 Možnosti hodnocení v provozních podmínkách 31
      4.6.2 Experimentální způsoby studia degradace v laboratoři 33
      4.6.3 Simulační výpočty zatížení na železniční výhybce 34
5. Hodnocení provozní degradace 35
   5.1 Materiálové analýzy provozně vyvolaných poškození 35
      5.1.1 Perlitická ocel 37
      5.1.2 Austenitická manganová ocel 41
   5.2 Statistické vyhodnocení údajů z provozního sledování 44
      5.2.1 Popis základního souboru 44
      5.2.2 Popis výběrového souboru 45
      5.2.3 Výpočet pro předpoklad logaritmického průběhu ojíždění 47
   5.3 Vyhodnocení degradace ze zkušebního okruhu 48
   5.4 Zkušenosti s degradaci výhybek 50
6. Experimentální studium degradace 52
   6.1 Návrh parametrů experimentálního zatěžování 54
   6.2 Metodika vyhodnocení 57
   6.3 Testované materiály 59
      6.3.1 Výchozí rozbory zkušebních vzorků 60
   6.4 Realizace experimentu 62

6.4.1 Experimentální sada I 62
6.4.2 Experimentální sada II 64
6.4.3 Strukturní analýzy perlitických ocelí 68
6.4.4 Experimentální sada III 73
6.4.5 Experimentální sada IV 77
6.4.6 Metalografický rozbor austenitické manganové oceli 81
6.5 Shrnutí výsledků provedených experimentů 83
7. Provozně využívané přístupy k hodnocení degradace 84
7.1 Degradace součástí výhybky 84
7.2 Degradace výhybky z hlediska nákladů během životního cyklu 87
7.3 Definování faktorů, ovlivňujících degradační procesy 90
7.4 Doporučení opatření pro zvýšení životnosti výhybky 91
8. Shrnutí dosažených výsledků, celkové závěry práce 92
9. Přínosy disertační práce 94
Literatura 95
Seznam obrázků 100
Seznam tabulek 103
Seznam příloh 104
Seznam publikovaných prací 105

Značení a zkratky

AAR	Association of American Railways
AREA	American Railway Engineering Association
AREMA	American Railway Engineering Maintenance
ARTC	Australian Rail Track Corporation
BN	Bahn-Norm (Železniční standard)
CEF	Centre d´Essais Ferroviaire (Centrum testování železnic)
CEN	European Committee for Standardization (Evropská komise pro standardizaci)
CNTK	Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa (Vědecko-technické centrum železniční)
DB	Deutsche Bahn (Německé dráhy)
ERRI	European Rail Research Institute (výzkumný a zkušební úřad)
GPK	Geometrické parametry koleje
HRT	Hrubá tuna
HSH	Head special hardened (hlava speciálně tvrzená)
HT	Heat treated (tepelně zpracovaný)
HVLD	Zkouška tvrdosti podle Vickerse prováděná tvrdoměrem Equotip 2
CHARMEC	CHALmers Railway MECanics (Železniční mechanika na Chalmers)
JIS	Japanese Industrial Standards (Japonské průmyslové standardy)
KGO	Kinematic Gauge Optimization (německy FAKOP)
LEROS	LEicester ROlling Slide
LHT	Low alloy heat treated (nízkolegovaný tepelně zpracovaný)
MGT	Million Gross Tonnes (milionů hrubých tun – mil. hrt.)
NURBS	Non-Uniform Rational Basis Spline (racionální neuniformní B-splajny)
OSŽD	Organizacja dlja sotrudničestva železnych dorog (Organizace pro spolupráci železnic)
ORE	Office de Recherches et d'Essais (výzkumný a zkušební úřad)
RCF	Rolling contact fatigue (kontaktní únava při odvalování)
RS	Rolling/sliding (odvalování/klouzání)
SUROS	Sheffield University ROlling Sliding (Twin-Disc Machine)
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty
TNŽ	Technická norma železniční
TUORS	Technical University Ostrava Rolling Slide
VAE	Voest-Alpine Eisenbahnsysteme (VAE Group)
VAS	Voest-Alpine Schienen
VNIIŽT	Vse-rossijskij naučno-isledovatělnyj institut železnodorožnogo transporta (Všeruský vědecko-výzkumný institut železniční dopravy)

1 ÚVOD

Rozvoj železniční dopravy je spojen se zvyšováním provozní rychlosti, zatížením na nápravu a vzrůstajícím objemem přepravy. Současně se při tomto trendu zvyšují požadavky na spolehlivost a na kvalitu součástí železničního svršku. Volba vhodného typu materiálu či typu konstrukčního řešení podstatně ovlivňuje životnost a spolehlivost součástí na železniční trati.

Výhybkové konstrukce jsou nedílnou součástí železniční dopravní cesty, vzhledem k jejich specifické a konstrukční náročnosti jsou i jedním z určujících faktorů spolehlivosti železniční dopravní cesty jako celku. Jejich celkový technický stav je mimo jiné dán mírou údržby, jež je jim věnována.

Především u starších výhybkových konstrukcí je důležité stanovit jejich životnost, způsob ojíždění a poškozování z hlediska provozního zatížení, kterému jsou vystaveny a které je z důvodu neustále se zvyšujících rychlostí či zatížení na nápravu od pojíždějících kolejových vozidel v některých případech vyšší než v době jejich návrhu. Na kontaktních plochách částí výhybky dochází k opakovaným plastickým deformacím, které časem vedou k vyčerpání plasticity povrchové vrstvy a vzniku kontaktně - únavových vad. Toto poškození může při absenci včasného zásahu přerůst v jemné povrchové trhliny, jejichž postupný rozvoj může vést až do fáze vylamování a drolení materiálu v nejexponovanějších oblastech povrchu [1]. Případné celkové zanedbání údržby vede ke zkrácení životnosti železniční výhybkové konstrukce a může způsobit i její předčasné vyřazení z provozu.

Preferovaným technicko-ekonomickým přínosem je řešení, kdy je navýšena cena za kvalitativně lepší železniční výhybkovou konstrukci v oblasti prvotních investičních nákladů (pořizovací náklady, náklady na instalaci konstrukce) a snížena v druhotných, tzn. provozních a udržovacích nákladech (náklady na zajištění správné funkce a na údržbu konstrukce). Náklady vztažené k životnosti konstrukce se sníží a navíc dochází ke zvýšení komfortu jízdy a zvýšení bezpečnosti.

1.1 Historický vývoj v oblasti železničních výhybek

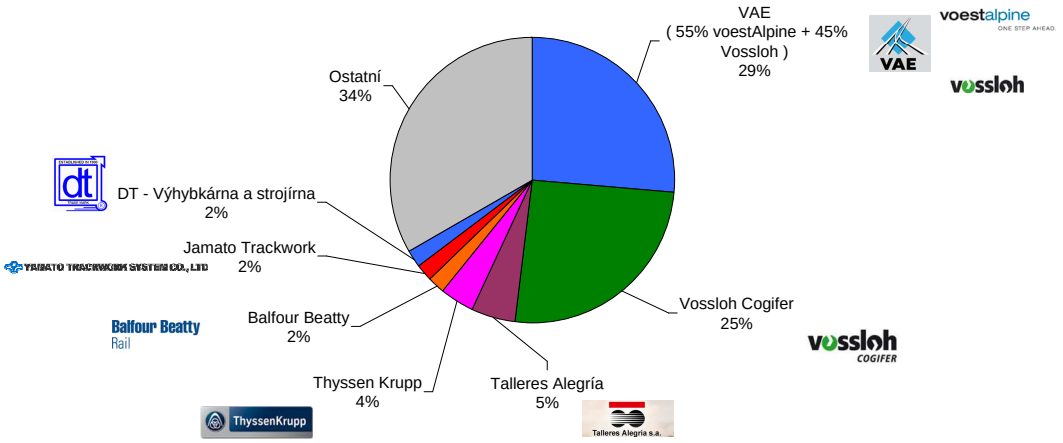
Výhybka pro širokopatní kolejnice byla patentována Sir Dr. Charlesem Foxem v roce 1832. Do té doby se používaly tzv. železniční točny. Během historie se výhybkové konstrukce přizpůsobovaly provozním podmínkám. Od vzniku železniční dopravy až do roku 1903 se používalo více než 150 typů kolejnicových profilů. Na území České republiky byly, od této doby v souladu se světovými trendy, zaváděny a používány vždy modernější kolejnicové profily, tzv. soustavy železničního svršku. V časové posloupnosti to byly soustavy A, Xa, T, R65, S49 až po současný UIC60.

V oblasti konstrukce výhybek na území České republiky dochází k zásadním změnám v roce 1963, kdy je vyrobena první výhybka (JT-1:9-300) sjednocené (poměrové) soustavy, jež nahradila soustavu stupňovou. Její základ byl tvořen osvědčenými typy výhybek, používaných již delší dobu u většiny ostatních národních správ železnic. Z vlastních a převzatých zkušeností, doplněných doporučeními mezinárodních organizací OSŽD, UIC a ORE (od 1992 ERRI), byl pak tento proces typizace výhybek v roce 1983 úspěšně dokončen [2].

V oblasti výroby výhybek na území České republiky dochází v roce 1956 k přesunu výroby z Vítkovických železáren do Železáren Prostějov. Po postupném omezování a zastavování výroby výhybek soustav A a T byla, dle náplně státního úkolu P 07-127-805, byla zahájena výroba výhybek soustav S49 a R65. V roce 1987 byla zahájena činnost na DÚ-04 s názvem „Výzkum výhybek se zvýšenou provozní odolností“ státního úkolu P 07-127-820, v němž je řešen vývoj konstrukčního uspořádání rozhodujících částí výhybek (jazyků, srdcovek, kluzných stoliček, přídržnic a materiálů pro tyto části výhybek), jež rámcově a ve své podstatě pokračuje až do dnešní doby [2].

Z důvodu společensko-politických změn v roce 1989 na území České republiky, došlo k privatizaci „Železáren Prostějov“ a výroba výhybek začala být od roku 1994 zajišťována původní firmou „Doležal a Těhník, továrna na železné zboží, Prostějov“, nyní „DT – Výhybkárna a strojírna, a.s. Prostějov“. Obdobná situace nastává také v ostatních státech bývalého socialistického bloku, ale také např. v Rakousku, kdy je v letech 1992-94 privatizována státní fy. VAE, jeden z největších světových výrobců výhybek.

Od 90. let 20. století je pokrok ve vývoji nových částí a vlastností výhybek zajišťován především jednotlivými firmami. V současné době výrobci železničních výhybek provádějí výrobu, opravy a vývoj zpravidla na své národní železniční trati v kooperaci s provozovatelem dané železniční dopravní cesty. Bylo zjištěno (celosvětově) 102 závodů zabývajících se výrobou železničních výhybek. Z hlediska tohoto počtu výrobních závodů jsou dominantní, a také udávající vývojové trendy, fy. VAE a Vossloh-Cogifer (viz. obr. 1 a příloha A).



Obr. 1 – Odhad významnosti výrobců železničních výhybek v roce 2010

I přes pokrok ve sjednocování železničních norem a typizace platí, že v jednotlivých státech jsou na železniční výhybky kladeny jiné požadavky. Dle zjištěné délky železniční trati v jednotlivých státech v nich dominantně používané typizace, lze provést odhad rozšířenosti (viz. tabulka 1 a příloha B).

Typizace soustav železničního svršku	Rozšířenost [%]
UIC (CEN) – Evropa a celosvětově	44
AAR (AREMA, AREA) – severní Amerika	33
OSŽD (předpisy R XXX/X – doporučené a O XXX/X–závazné [21]) – bývalé státy východního bloku [3]	16
Jiné (JIS, ARTC …)	7

Tab. 1 – Odhad rozšířenosti typizace soustav železničního svršku dle délky železniční trati

1.2 Zatížení od kolejových vozidel

Kolejová vozidla se dle [52] rozdělují do více kategorií (viz. příloha D) a pro různé železniční tratě (viz. příloha C) jsou typická jiná kolejová vozidla (viz. tab. 4), s jejich specifickým způsobem zatížení, a z toho plynoucích odlišných požadavků na danou železniční trať z hlediska použití výhybek a jejich údržby a oprav.

Extrémem z tohoto pohledu je „nejtěžší a nejdelší“ nákladní vlak na světě, jež je v provozu v Austrálii. Jeho celkové hrubé zatížení je 99 734 tun. Tento vlak je tvořen z 682 vagónů a je tažen 8mi lokomotivami. Celkem je dlouhý 7,2km a zátěž na nápravu nákladního vagónu dosahuje 36,18 tun [13].

Typ trati (typ kolejového vozidla)	Charakter. vozidlo	Zatížení na nápravu [t]	Rychlost [km/h]
Regionální trať - Regional track (Motorová jednotka- Diesel multile unit)	814	15,58	80
Celostátní trať - Nationwide track (Nákladní vlak - Freight train)	ES 499.1	21,75	120
Tranzitní železniční koridor - Railway transit corridor (Osobní vlak - Passengers train)	380-109E	21,88	200
Vysoko-zatěžovaná trať - Heavy haul track (Nákladní vlak - Heavy haul train)	GE AC6000CW	31,98	120
Modernizovaná trať - Modernised track (Elektrická jednotka - Electric multiple unit)	680	13,75	230
Vysokorychlostní trať - High-speed line (Vysokorychlostní vlak - High-speed train)	AVE 102	15,3	330

Tab. 4 – Charakteristické typy kolejových vozidel zatěžujících železniční výhybku dle typu trati

2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2.1 Specifika provozního zatížení materiálů výhybkové konstrukce

Únosnost železničního svršku je posuzována podle únosnosti kolejnic a ve výhybkách je posuzována navíc podle únosnosti jazyků. Obecně jsou kolejnice či jazyky namáhány silami svislými a vodorovnými podélnými a příčnými. Vymezení jednotlivých složek konkrétního provozního zatížení je velice obtížné. Změny pojezdových charakteristik profilu v místě kontaktu kolo-kolejnice a tím také kontaktní plochy, spolu s vlivy rozdílných geometrických parametrů železničních kol (vlivem rozdílné míry provozního opotřebení) prakticky znemožňují přesné stanovení typických poměrů kontaktního tlaku vs. skluzu.

Rovněž korelace mezi výsledky experimentálních studií při uváděných parametrech je velice omezená. V rámci komplexu vnějších činitelů – úroveň kontaktního tlaku, dynamické rázy vlivem opotřebení profilu kol, podíl tangenciální složky zatížení od podélných a příčných prokluzů kol, abrazivního působení částic z prostředí aj. je diskretizace jednotlivých mechanismů opotřebení velice obtížná. Kvantitativní stanovení základních složek tak složitého spektra zatížení jednotlivých profilů křižovatek není reálné. Důležitý je poměr jednotlivých složek provozního zatížení (normálové vs. smykové), rovněž vliv případného tekutého lubrikantu podstatně ovlivňuje skluzové poměry.

Poznání reálných degradačních mechanismů v souvislosti s makroskopicky rozlišitelnými parametry opotřebení kontaktních ploch je nutné pro predikci životnosti v aktuálních podmínkách.

Ve výhybkách je vzájemné působení sil, zrychlení a pohybů mezi kolejovým železničním vozidlem a pojížděnými částmi této části železničního svršku obzvlášť intenzivní, protože je zde narušována plynulá jízda kol. V oblasti výměn se železniční kolo setkává s průřezem, jež je tvořen jazykovou kolejnicí a opornicí. V oblasti hrotu srdcovky je navíc jedoucí železniční kolo pomocí přídržnic násilně odtahováno od přerušené hrany pojížděné hrany srdcovky. Vliv tohoto narušení plynulého průběhu jízdy kolejového železničního vozidla se projevuje ve vysokých příčných silách, působících na konstrukci výhybky.

Při nedodržení požadavků na kvalitu výroby jednotlivých konstrukčních částí výhybek, bezchybnou a přesnou montáž, včetně dodržení dovolených odchylek v geometrických parametrech koleje, trvale dobrou údržbu výhybek a pojezdových částí vozidel, můžeme očekávat i vznik takových účinků, které mohou vyvodit namáhání některých prvků výhybek až na hranici jejich únosnosti [2].

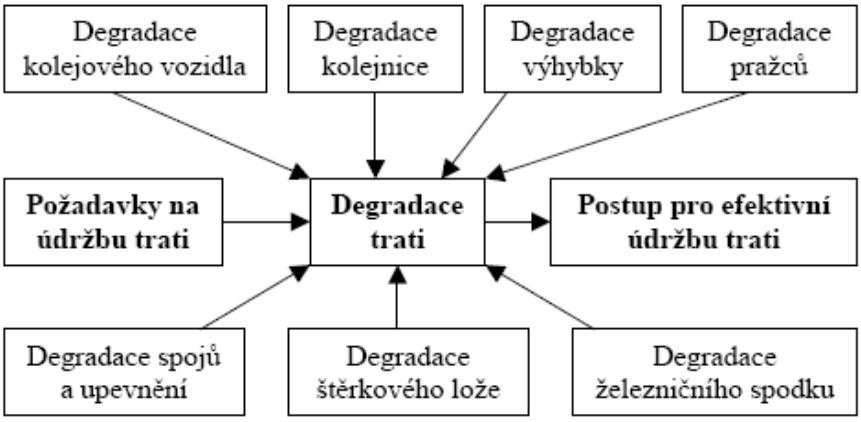
Únavová životnost standardních perlitických materiálů je typicky limitována odlupováním tenkých povrchových vrstev (za předpokladu, že nedochází k průběžné regulaci povrchovou abrazí). Kontaktně iniciované trhliny mohou růst do relativně nedeformovaného materiálu pod střihovou oblastí a působit rozsáhlá porušení.

Vzhledem k specifickým podmínkám zatížení představují nejvíce exponované součástí tratí především části křížení – kde vedle kontaktně-únavového zatížení a abraze působí výrazná rázová složka zatížení. Současně s prosazovaným zvyšováním provozní únosnosti musí materiály navíc splňovat požadavek dobré svařitelnosti.

Proto z výše uvedených důvodů v současné době není preferováno ovlivňování jakosti na konto dalšího zvyšování obsahu uhlíku. V našich podmínkách se uplatňuje zejména různé provedení tepelného zpracování s cílem pozitivně modifikovat charakteristickou strukturu lamelárního perlitu (tzv. perlitizace povrchových vrstev). Optimalizace procesu vyžaduje řadu materiálových analýz i experimentálních prací s cílem podat obraz vnitřní reakce materiálu na konkrétní provozní zatížení v jeho typických povrchových projevech poškození.

2.2 Degradace a opotřebení železniční trati

Při pohledu na železniční trať a problematiku degradační proces v systému kolo-kolejnice má na její stav vliv mnoho faktorů, tzn. že celková degradace železniční trati je závislá na degradaci jednotlivých částí prvků železniční trati (viz. obr. 2).

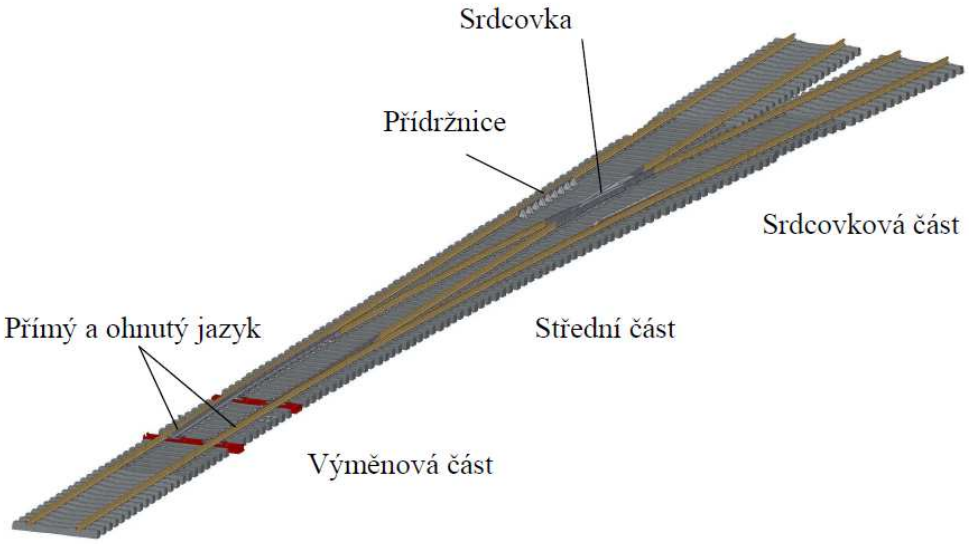


Obr. 2 – Model degradace železniční trati [7]

Vady na pojížděných částech železniční výhybky (viz. obr. 3) jsou zpravidla výsledkem namáhání kolejnic (opornic), jazyků, srdcovek či přídržnic a jejich lomy nejčastěji vznikají z malých defektů nebo z koncentrace namáhání. Železniční výhybky a výhybkové konstrukce (viz. příloha E) v našich podmínkách zahrnují výhybky, kolejové spojky, kolejové křižovatky, dilatační zařízení a atypické konstrukce podle [16] či [18].

Vady (viz. příloha F) na součástech výhybek, zjišťované v provozu, je nutno jednotně a jednoznačně klasifikovat pro stanovení příčin a vhodných provozních opatření. Jednotnost klasifikace těchto vad (např. dle předpisu [9] či [15]) je

podmínkou statistického zpracování, využitelného pro dlouhodobé plánování opravných prací i nutná opatření ve výrobě.



Obr. 3 – Železniční výhybka

Při zjišťování výskytu vad u DB bylo zjištěno, že ze všech vad je cca 90% tvořeno jen 10ti typy (viz. v tab. 5) [4].

Kód vady	Popis vady
111/211	Příčné únavové trhliny postupně se rozvíjející z hlouby průřezu oválného tvaru
2222	Shelling – odlupování pojížděné hrany kolejnice
2223	Head checks (tvorba trhlin) – vylupování materiálu na pojížděné hraně
nemá	Belgrospi´s
227	Squat
301	Vtisky
125/225	Vybroušená místa na pojížděné ploše od prokluzu kol (ojedinělá nebo souvislá)
2201	Vlnkovitost koleje a skluzové vlny
2202	Vlnovitá deformace (dlouhé vlny)
411/421/431	Příčná trhlina v oblasti svaru

Tab. 5 – Typy nejvyskytovanějších vad u DB

2.3 Kontaktně únavové vady

Kontaktně únavové vady (RCF) jsou velmi nebezpečné pro provoz a na jejich odstranění se vynakládají velké finanční prostředky. Pro celkový přehled o provozních vadách byla provedena z různých zdrojů [6, 9, 10, 11] sumarizace všech vad, jež se mohou ve výhybkové konstrukci vyskytovat.

Tyto vady byly roztříděny dle místa možného výskytu a to na vady vznikající na kolejnicích, srdcovkách a jazycích. Celkem bylo zjištěno 83 možných vad (viz. příloha F).

Mezi nejvýznamnější vady na jízdní ploše kol dvojkolí patří:

Pitting - pro vadu je charakteristické tvoření důlků obvykle okrouhlého tvaru, u povrchů s vysokou tvrdostí mohou mít důlky i hranatý či protáhlý tvar. Jedná se o specifický projev kontaktně-únavového přetížení, kdy jsou maxima tahových napětí lokalizována v podpovrchové vrstvě. Tím i k iniciaci únavových trhlin dochází v určité hloubce pod povrchem v závislosti na geometrii kontaktní dvojice. Na jejich vzniku se významně podílí mazivo. Vlivem kontaktních tlaků vniká mazivo do povrchových trhlin, důsledkem dalších pohybů součásti je v nich uzavíráno a jeho tlak se vlivem kontaktního namáhání zvyšuje. Tento proces vede k dalšímu šíření trhlinek směrem k povrchu a vede až ke vzniku důlků.

Spaling - pro tuto vadu je charakteristické tzv. odlupování povrchové vrstvy materiálu. Dochází k němu především v důsledku zakalení vlivem prokluzu, při malých tloušťkách tvrzené vrstvy. Opakující se vysoké kontaktní tlaky vyvolávají podpovrchová smyková napětí, jež způsobují vznik podpovrchových trhlin a následně dochází k prolamování povrchové vrstvy a k jejímu odlupování [8].

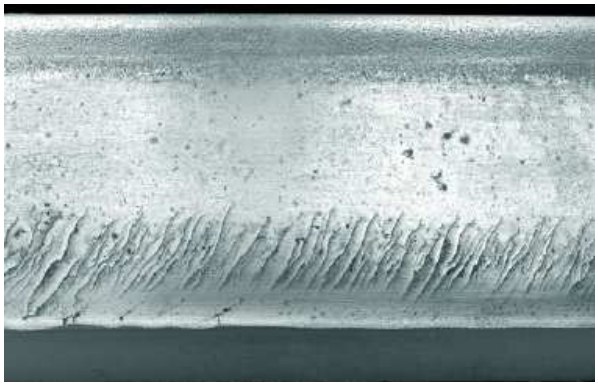
Nejvýznamnější vady na jízdní ploše hlav kolejnic, jazyků a srdcovek

Head checks (viz. obr. 4a) – pro tuto vadu je charakteristický vznik následkem vysokého kontaktního tlaku v místě styku kola s kolejnicí. Iniciace vady je z povrchu pojížděné plochy a projev ve formě velkého množství rovnoměrných trhlinek ve vzdálenosti zpravidla 1-5 mm od sebe na pojížděné ploše (pojížděné hraně hlavy kolejnice). Trhlinky pronikají do hloubky cca 2mm. Po delší době může v těchto místech docházet k vylamování materiálu mezi jednotlivými trhlinkami a tato vylamovaná místa se mohou spojovat v delší prohlubně a vada se může rozvinout do formy příčné trhliny a především v kombinaci s vadou typu Shelling může akcelerovat rozvoj této příčné trhliny až k lomu.

Shelling – pro tuto vadu je charakteristický vznik podélných trhlin pod povrchem pojížděné hrany kolejnice. Vznik v důsledku kontaktních a skluzových sil především během průjezdu obloukem. K iniciaci dochází zpravidla v místech netvárných vměstků v kolejnicové oceli. Kolejnice nejdříve vykazují v nepravidelných vzdálenostech tmavé podélné skvrny na zaoblení pojížděné hrany hlavy kolejnice: Tyto skvrny jsou prvním znakem, jež poukazuje na existenci vnitřních trhlin a který se po určitém čase projeví jako převalek na boční ploše, prasklinkami a nakonec oddělením materiálu od pojížděné plochy. V této fázi rozvoje vady má plastizace materiálu vlivem průjezdů za následek místní zahloubení pojížděné plochy. Odlupování z tohoto místa postihuje především kolejnice ve vnějších kolejnicových pásech oblouků, kde je vlivem mazání potlačeno boční ojíždění kolejnic.

V kolejnicích (nezávisle na jakosti) mohou postupně vznikat vnitřní příčné trhliny, často s velmi rychlým rozvojem, jež vedou až k lomu.

Squat (viz. obr. 4b) – pro tuto vadu je charakteristický výskyt v přímé koleji a také v obloucích především na tratích pojížděných rychlostí vyšší než 160km/h. Vzniká ale také na tratích s nižšími rychlostmi ve stoupání. Iniciace této kontaktně únavové vady vychází z povrchu. V počáteční fázi se projevuje náhodně rozmístěnými trhlinkami (i ve shlucích) mezi středem hlavy kolejnice a pojížděnou hranou. Trhlinky jsou cca 12-15mm dlouhé a ve směru jízdy orientované pod úhlem asi 10-15° od podélné osy kolejnice do hlavy kolejnice v podélném směru vpřed i vzad. Ve fázi, kdy trhlinky dosáhnou hloubky asi 1,6mm, se objevuje na povrchu tmavá skvrna, jež indikuje rozdvojení materiálu. Tento efekt je doprovázen místním rozšířením pojížděné plochy kolem tmavé skvrny. Trhlinky se dále rozvíjejí a ve směru jízdy vlaku se po dosažení hloubky cca 4mm rozvětvují směrem dolů. Při kritické velikosti trhliny dochází pak u kolejnice ke křehkému lomu.



a) Head checks

b) Squat

c) Vlnkovitost

d) BelGroSpi´s

Obr.4 – Kontaktně únavové vady železničního svršku [12]

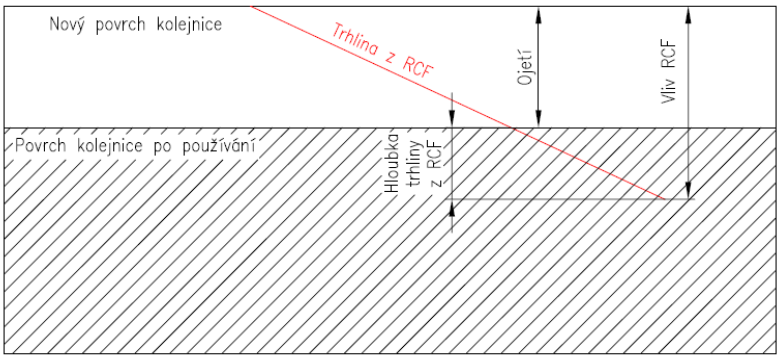
Vlnkovitost jízdní plochy hlavy kolejnice (viz. obr. 4c) – pro tuto vadu je charakteristické, že se na jejím vzniku podílí velký počet příčin (např. hrubý povrch kolejnice z výroby, konstrukce železničního svršku, charakter provozu). Vlnky se projevují pravidelným sledem lesklých vrcholků a tmavých prohlubní vlnek na

pojížděné ploše. Délka těchto vlnek se pohybuje mezi 30–100mm. Vzniká především v přímé koleji a v obloucích větších poloměrů.

Skluzové vlny na jízdní ploše hlavy kolejnice – pro tuto vadu je charakteristický vznik v místě oblouků (především na vnitřním kolejnicovém pásu) pomocí prokluzů kol. Délka je obvykle mezi 100-300mm. Tato vada způsobuje vznik vibrací na kolejové vozidlo a zvyšuje celkovou hlučnost při průjezdu kolejového vozidla.

BelGroSpi´s (viz. obr. 4d) – pro tuto vadu je charakteristický vznik v místě traťových úseků, jež jsou pojížděny rychlostí vyšší než 200km/h a tvar ve formě vlasových trhlinek, jež vznikají v sedlech vlnkovité jízdní plochy hlavy kolejnice. Tyto trhlinky jsou na povrchu rozvětvené a orientovány do hloubky materiálu kolejnice. Vada tohoto typu může způsobit lom kolejnice. Název je dle jmen inženýrů (Belz, Grohmann, Spiegel), jež ji poprvé popsali.

Vedle rozvoje a šíření trhlin z RCF dochází také k ojíždění (úbytku) povrchových částí funkčních povrchů. Tento úbytek přes svůj negativní vliv na danou součást také na druhou stranu mírní účinky RCF (tzn. brání rozvoji a prohlubování trhlin). Tento efekt bývá nazýván samočistící (viz. obr. 5).



Obr. 5 – Princip tzv. samočistícího efektu

2.4 Údržba a opravy pojížděných částí železniční výhybky

Vady kolejnic, především geometrické vady jako je vlnkovitost a vlnová deformace na pojížděné ploše kolejnice, mohou způsobit velmi vysoké dynamické účinky [4]. Jedinou možností pro opravu těchto vad je opracování hlav kolejnic, k němuž se používají technologie broušení, hoblování či frézování.

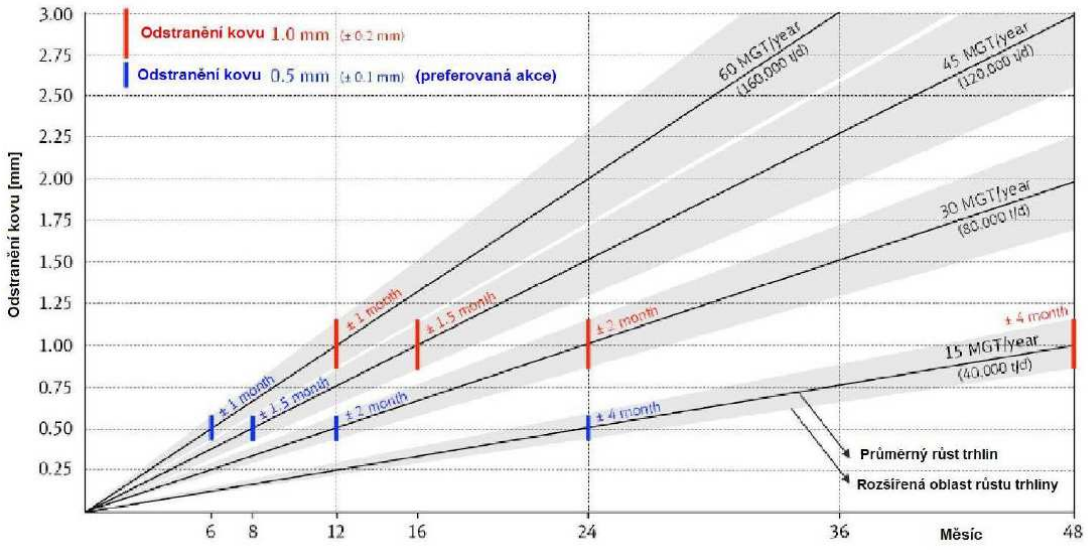
Broušení kolejnic - V ČR se koleje brousí při novostavbě či při rekonstrukci na všech koridorových tratích a na celostátních tratích, kde je traťová rychlost 90km/h a vyšší. První (preventivní) broušení je součástí zhotovení stavby a je prováděno během nejbližší brousící kampaně pokud možno do jednoho roku od zahájení zkušebního provozu [5]. Broušení se uplatňuje u odstraňování stále většího počtu vad na povrchu kolejnic a je prováděno např. brousícím vlakem SPENO, jež na jeden záběr odebírá mezi 0,02 - 0,15mm či brousícím vlakem Plasser&Theurer, jež odebírá na jeden záběr mezi 0,03 – 0,07mm.

Mezi nejmodernější metody patří tzv. vysokorychlostní broušení, jež pomocí např. vlaku typu RC01 dosahuje odběru na jeden záběr 0,1 - 0,3mm. Jeho pracovní rychlost je řádově vyšší (60 – 80 km/h) než u brousících vlaků SPENO (5-8km/h) či Plasser&Theurer (cca 1,5km/h). V běžných podmínkách se životnost kolejnice pohybuje mezi 500 až 700 mil. hrt. projeté provozní zátěže. Pomocí preventivního a pravidelného broušení lze zvýšit projetou provozní zátěž o stovky až tisíce mil. hrt. [4]. Tímto umělým zvýšení přirozeného ojíždění je dosahováno odstranění povrchových trhlin v době, kdy dosahují hloubky cca 0,01 - 0,3mm a zabraňuje jim v rozšíření se do kolejnice.

Hoblování a frézování kolejnic - Používá se především v případech, kdy je hlava kolejnice výrazně deformována. Výhodou oproti broušení je, že se při jednom technologickém pojezdu odebírá větší množství materiálu. Je vhodné pro odstraňování převalků a hlubokých prokluzových vln [4].

Broušení výhybek - U nově vložených výhybek je po zahájení provozu zhotovitelem provedeno první (preventivní) broušení. Pro dosažení vysoké kvality broušení ve výhybkách je nutné použít specializované brusky s nastavitelným úhlem broušení a pojezdem v koleji. Na pojížděných částech výhybky (opornice, jazyky a srdcovky) musí být broušení provedeno v době, kdy vzniklé převalky dosahují velikosti 1 až 2mm [5]. Broušení je nezbytně nutné pro správný provozní tvar hlav kolejnic (opornic), jazyků a srdcovek. Eliminuje se tak možnost prohlubování trhlin na nose a hranách srdcovek a zajišťuje se správné vyrovnání dráhy nákolku. Je prováděno 8 až 12 týdnů po instalaci a pak ve frekvencích dle hustoty provozu a opotřebení .

Optimální údržba není obecně definována či doporučována a každá správa železnic postupuje dle své strategie a zkušeností (např. viz. obr. 6).



Obr. 6 – Specifikace broušení kolejnic u DB v oblouku od 500 do 5 000m [20]

2.4.1 Kontroly železničních součástí

Význam kontrol (především defektoskopické) je znásoben možností předcházení zniku nehodových událostí z titulu vady kolejnice nebo jazyka výhybky a jejich následků při rychlosti jízdy vlaků do 160 km/h. Co se týče četnosti kontrol při rychlosti pojíždění vyšší než 140 km/h, musí být pravidelné kontroly materiálu kolejnic, srdcovek a jazyků výhybek vykonávány v souladu s [14] (tj. se stavebním a technickým řádem drah) s četností základních kontrol třikrát ročně.

Dokonce předpis pro nedestruktivní zkoušení kolejnic [19] zpřísňuje četnost kontrol jazyků výhybek na čtyřikrát ročně. Dodržování stanovených četností kontrol podléhá dozoru Drážního úřadu. Navíc předpis pro nedestruktivní zkoušení kolejnic [19] umožňuje přednostům Správ tratí jednotlivých SDC nařídit další kontroly kolejnic a jazyků výhybek s přihlédnutím ke stavu železničního svršku, provoznímu zatížení a jakosti kolejnicového materiálu [6].

3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Práce je zaměřena na studium poškozování a vady vyskytující se na železniční výhybce. Cíl práce spočívá ve specifikaci vlivů, které se podílí na opotřebení jízdních ploch konstrukce. Analýzy řídících mechanismů opotřebení, navržení způsobu jejich sledování a experimentálního ověřování byly podkladem k návrhům pro zmenšení opotřebení jízdních ploch jednotlivých částí výhybky a tím i prodloužení její životnosti. Pro analýzu vlivu specifických faktorů na opotřebení jízdní plochy byly využity statistické a experimentální metody.

Dílčími cíli řešení bylo:

v oblasti teoreticko-experimentální

- návrh a ověření vhodné metodiky pro experimentální hodnocení odolnosti vybraného materiálu při definovaném zatížení, resp. pro predikci mezního stavu kontaktních ploch,
- definování závislosti degradace nejexponovanějších částí výhybek (srdcovky, jazyky) na materiálu a porovnání s kolejnicemi ve volné trati,
- rozbor mezních stavů zatížení v kontaktu, identifikace degradačních mechanismů, limitujících životnost stěžejních částí výhybek,
- studium limitujících prvků metalurgické jakosti na kontaktně-únavovou odolnost,
- vytvoření metodiky pro zjištění ojetí různých materiálů v závislosti na projeté zátěži a definování vzniku vad na jazycích a srdcovkách železničních srdcovek,

v oblasti technické aplikace

- získání dat pro optimalizaci parametrů tepelného a mechanického zpracování pro zvýšení odolnosti kontaktních ploch (u perlitizovaného materiálu),
- statistické vyhodnocení údajů z provozních sledování opotřebení, respektive poškozování kontaktních ploch v závislosti na druhu materiálu,

v oblasti ekonomické

- definování faktorů, ovlivňujících degradační procesy v železniční výhybce,
- doporučení opatření pro zvýšení životnosti výhybky.

4. METODY ZPRACOVÁNÍ

Numerická predikce životnosti v procesu kontaktně-únavového namáhání je problematická. Variabilita materiálové odezvy vyvolává změny akumulovaného rozsahu poškození. Únavové poškození materiálu by proto mělo být vyhodnoceno cyklus po cyklu, uvažující rozdíly materiálové odezvy v průběhu cyklického zatížení; tj. podle pravidel sumace poškození separovat nízko-cyklickou únavu (plastický shakedown) a ratcheting. Experimentální práce v dané oblasti byly věnovány především fenoménu kontaktní únavy za zvýšeného podílu skluzu (cca 35% skluz v poměru ke vyvozenému kontaktnímu tlaku), dále pak jako časté kritérium v testování kolejnicových ocelí slouží laboratorní studie výlučně kluzného opotřebení. Kriterium mezního stavu používané pro stanovení kontaktně únavové životnosti zde tedy představují buďto povrchové ztráty materiálu, nebo limitní únavové poškození povrchu. Součástí standardně prováděných zkoušek jsou nedestruktivní zkoušky (povrchová tvrdost, mezní hodnoty a tvarová tolerance, kontrola povrchových trhlin, ultrazvuková kontrola) a destruktivní zkoušky (tvrdost v hlavě a patě kolejnice, tvrdost a průběh tvrdosti v příčném vzorku, makrostruktura, mikrostruktura, pevnost v tahu a tažnost).

Z hlediska studia působících mechanismů je problematická skutečnost, že mezní počty cyklů do limitu prezentované životnosti oceli, tak zahrnují jak stadium iniciace povrchových defektů, tak i růst trhlin. Preference ocelí o vyšší pevnosti vedlo k značné redukci povrchového opotřebení kolejnic, jedním z následků potlačení abrazivní složky opotřebení je skutečnost, že limitujícím prvkem zatížení v systému kolo-kolejnice je v současnosti povrchově iniciovaná kontaktní únava, limitně vedoucí k celistvým lomům kolejnicových profilů – v jejich variabilních formách, s intenzitou v závislosti na aktuálních podmínkách dopravy zabezpečují intenzitu experimentů s novými materiály kolejnicových ocelí. Z výsledků pozorování provozního poškození byly vyvozeny dva principielní mechanismy iniciace kontaktně-únavových trhlin [24]:

- Prvý uplatňuje lokalizovanou plasticitu na povrchových nerovnostech. Povrchové vruby, způsobené cizími částicemi, byly pozorovány jako nejčastější iniciační místa únavových vad. Povrchové intruze, podpovrchové nekovové inkluze, popř. určitý model plastického přetvoření povrchu rovněž působí jako iniciace porušení.
- Druhý mechanismus je odlišný od hypotézy lokální plasticity - plastický tok uvnitř celé šířky povrchové vrstvy, způsobený vysokým kontaktním napětím, vede k iniciaci trhlin. Trhliny, v tomto případě, můžou začínat bez dřívějších defektů, a následují kvazi-statické chování v deformačně zpevněném materiálu s omezenou tažností.

Korektní studium mechanismu opotřebení a jeho závislosti na materiálových parametrech je nutné opřít zejména o experimentální výzkum a jeho verifikaci přímým pozorováním tohoto procesu opotřebení v provozu. Metodicky se výzkum daného problému proto opíral o experimentální studium kontaktně-únavového

procesu za různých materiálových a geometrických parametrů v kontaktu simulované dvojice železniční kolo-kolejnice.

Základní odhad řídící tendence porušení pojezdové plochy kolejnice lze založit na makroskopickém pozorování morfologie provozně exponovaných částí. Metalograficky budou hodnoceny povrchové vrstvy po experimentálním zatěžování. Z hlediska limitujících faktorů provozní odolnosti je podstatný charakter povrchových mikrotrhlin – místa iniciace, orientace rozvoje, vazba na vnitřní stavbu (homogenitu, mikrostrukturní parametry, mikročistotu, apod.), dále pak rozsah poškození vzhledem k šířce plasticky zdeformované oblasti.

Z hlediska iniciace a rozvoje porušení je vedle podmínek vzniku a projevů plastické deformace na povrchu hlavy kolejnice, popřípadě těsně pod její povrchem (oblast kontaktní únavy) podstatný proces hromadění mřížkových poruch a jejich interakcí s překážkami v substruktuře a struktuře materiálu. Vnitřní homogenita oceli a mikročistota oceli představují faktory, které vedou k dekohezi i když kontaktní tlak nepřekročí nominální „shakedown limit“, proto bude evidována reálná metalurgická jakost všech testovaných materiálů. Pro poznání mechanismu degradace povrchových vrstev oceli je rozhodující odlišení:

- míry plastického přetvoření (rozsah a hloubka povrchového zpevnění),
- tendence tvorby kontaktně únavových vad,
- podíl abrazivního opotřebení na povrchových „ztrátách“ oceli.

S ohledem na výše uvedené parametry poškozování povrchu bylo při tomto studiu evidováno:

- vliv změny tvaru kontaktní plochy kolejnice, jazyku či srdcovky,
- vliv typu materiálu, tzn. rozdílů mechanismu poškozování rozdílných strukturních variant,
- časovou závislost degradace vybraného materiálu,
- vlivu apriorních výrobních vad materiálů (podle konkrétní zjištěné vady její případné vymezení z dalších studií)
- princip a dosah strukturních změn vlivem zatížení,
- lokální změny pevnosti (metodou měření povrchové tvrdosti a liniovým měřením mikrotvrdosti),
- souvislost časové závislosti zpevnění, abrazivního opotřebení a iniciace kontaktně- únavových trhlin.

Realizace experimentů za použití materiálů odlišné strukturní báze umožnilo ověření této metodiky. Výsledky ohledně významnosti evidovaných složek opotřebení byly posouzeny v návaznosti na konkrétní údaje o provozním chování těchto materiálů a v návaznosti na možnou optimalizaci údržby (preventivní a opravné broušení před limitem vyčerpání plasticity).

Verifikace výsledků experimentálních analýz byla založena na konfrontaci laboratorně vyvolaných změn zatěžovaných vrstev s výsledky studia provozního poškození. Referenční vzorky pro analýzy provozně vyvolaných mechanismů poškození byly odebrány z částí železniční výhybky, kde dochází k maximálnímu provoznímu zatížení.

Experimentální práce byly zabezpečeny na specializovaném zařízení pro simulaci kontaktně-únavového zatížení s řízenou složkou podélného skluzu. Součástí disertační práce byly potřebné modifikace zařízení pro naplnění cílu výzkumu.

4.1 Analyzované typy ocelí

Na oceli pro součásti železničního svršku (viz. příloha G) jsou kladeny vysoké požadavky, jako velká odolnost proti rázům, tzn. vysoká houževnatost a současně také vysoká odolnost proti abrazivnímu, adhezivnímu a korozníu opotřebení. Vývoj standardních ocelí, tj. ocelí s perlitickou strukturou, je orientován buď na tepelné zpracování či na změnu chemického složení, zejména legování na bázi Cr a Mo, jež výrazné zjemňuje perlitické zrno a vedle zvýšení pevnostních charakteristik a otěruvzdornosti vede ke zlepšení nekonvenčních charakteristik jako lomová houževnatost a odolnost proti šíření křehkého lomu.

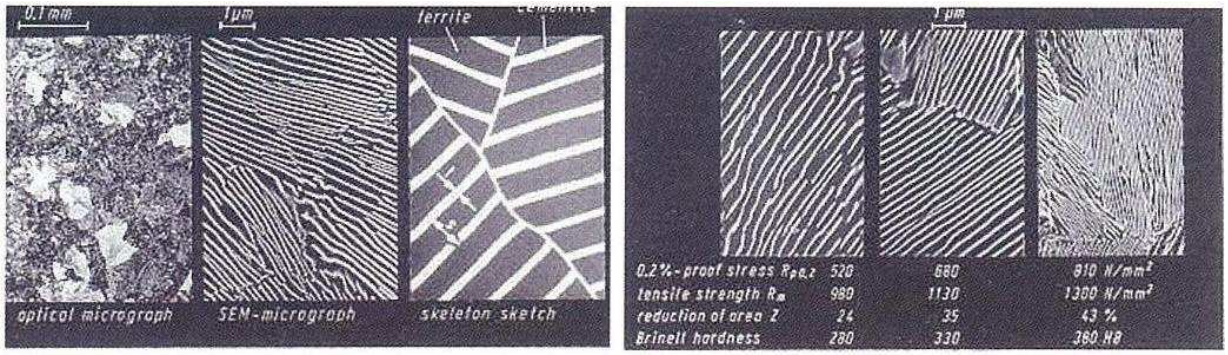
Tepelné zpracování kolejnicových ocelí lze provádět s různým chladícím médiem. Např. VAE tepelně zpracovává hlavy kolejnic z doválcovací teploty selektivním ochlazováním ve vodním roztoku polymerů či Thysssen Krupp aplikuje indukční ohřev po ochlazení z doválcovací teploty a chlazení vodní sprchou či stlačeným vzduchem, lze také provádět variantu v celoobjemovém kalení do oleje. Tepelné zpracování může být provedeno v celém profilu či pouze na hlavě kolejnice a to buď metodou mimo linku výroby kolejnic (off-line) či přímo ve válcovně (in-line). Norma pro kolejnicové materiály ČSN EN 13674 mimo jiné zavádí dvě třídy kolejnicových ocelí s rozdílným obsahem chrómu. Materiál 350HT (heat treated) má chemické složení odpovídající materiálu R260 a materiál 350LHT (low alloy heat treated) má obsah chrómu až do 0,3% a může být svařována bez potřeby dodatečného tepelného zpracování [24].

Materiálový vývoj se v současné době orientuje do tří hlavních směrů - oceli s perlitickou, austenitickou a bainitickou strukturou. Disertační práce je zaměřena na oceli s perlitickou a austenitickou strukturou, porovnáváním jejich materiálové odezvy a možností zvýšení užitných vlastností (perlitizace u perlitické struktury a zpevňování u austenitické struktury).

4.2 Perlitické oceli

Ocel R260 (dříve 900A) s plně perlitickou strukturou, vyvinutá v 70. letech se široce uplatnila ve světovém měřítku ve stavbě běžně namáhaných tratí [25]. Mechanické vlastnosti perlitické struktury (viz. obr. 7) jsou do značné míry řízeny

vzdáleností lamel cementitu a šířky či velikosti zrna. Mezilamelární vzdálenosti mají vliv na mez kluzu a pevnost v tahu. Otěruvzdornost perlitické oceli je mj. také možno zvýšit vhodným legováním za vzniku komplexních karbidů o vysoké tvrdosti, např. $(FeMnCr)_3C$.



Obr. 7– Vliv struktury perlitu na pevnost materiálu [40]

Pro perlitickou strukturu je specifické, že plastická deformace na kontaktním povrchu vede k „přestavbě“ struktury - usměrnění feritických i perlitických lamel ve shodě se směrem deformace. Cementitické lamely se ohýbají a ztenčují, až jsou následně orientovány paralelně k povrchu a zvyšují tak plošný podíl cementitu na kontaktní ploše. To vysvětluje experimentální závěry vybraných prací, které uvádějí vyšší odolnost proti opotřebení perlitické struktury v porovnání s martenzitickou a bainitickou, které neadaptují strukturu touto cestou. Současně ale tento proces vede k tvorbě tzv. „bíle leptatelných vrstev“, vzniká pásmo o tloušťce cca několik desetin milimetru jež má charakter nanostruktury, typické svou vysokou tvrdostí a křehkostí. Následné cyklické zatížení zde resultuje do vydrolování vrstev, případně v součinnosti s plastickým přetvořením povrchu dochází k zatlačování do okolního materiálu a iniciaci povrchových trhlin.

Perlitické oceli vždy obsahují prvky C, Si a Mn z toho důvodu, že uhlík v perlitické struktuře zajišťuje odolnost proti opotřebení. Při obsahu uhlíku, v kolejnicových ocelích, menším než 0,85% je poměr tloušťky cementitu/feritu menší než 0,15 [42]. Křemík zajišťuje zvyšování pevnosti zpevňováním tuhého roztoku feritu v perlitu. Pokud je obsah vyšší než 1,2% zvyšuje se křehkost a klesá svařitelnost. Mangan snižuje teplotu perlitické transformace, čímž zvyšuje mez pevnosti, zlepšuje prokalitelnost a zabraňuje tvorbě proeutektoidního feritu na hranicích austenitických zrn. Když je nad 1,4% roste nebezpečí vzniku martenzitu.

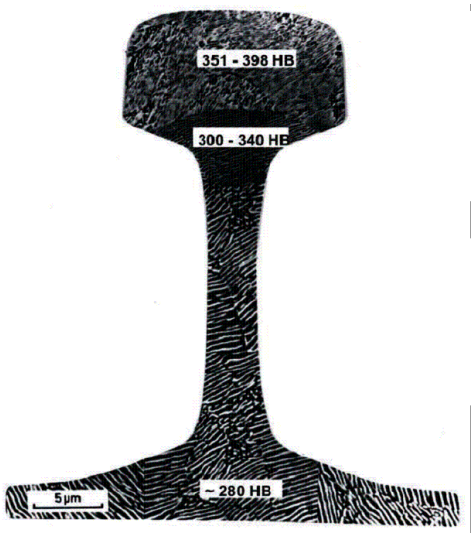
Pro případné další úpravy (zvýšení) charakteristických hodnot pevnosti, tažnosti či houževnatosti, lze přidat prvky jako kobalt (zvyšuje transformační energii perlitu – do 2%), chrom a molybden (zlepšují otěruvzdornost), bór (zrovnoměrňuje rozložení tvrdosti), vanad a niob (pro regulaci plastické deformace precipitačním zpevněním a omezení růstu austenitického zrna). Charakteristické hodnoty (tažnost, kontrakce, mez kluzu a pevnosti) ovlivňující životnost oceli lze ovlivnit mikrostrukturními faktory perlitu:

- mezilamelární vzdálenost (změna s rychlostí ochlazování v oblasti transformačních teplot a dle legur);
- velikost austenitického zrna;
- substituční a precipitační zpevnění (typ zpevnění dle použitých legur).

4.2.1 Technologie perlitizace

Technologie perlitizace [26] v ČR pro materiál R260 je aplikována na vybrané součásti výhybek (jazyky, kolejnice, hroty montovaných srdcovek, křídlové a přípojné kolejnice), jejímž cílem je vytvoření vrstvy jemného lamelárního perlitu na funkčních částech pro zvýšení životnosti a užitných vlastností. Perlitizovat lze také materiály jiných jakostí, pod podmínkou návrhu technologie a jejího odzkoušení a ověření výsledné jakosti (mechanické hodnoty, metalografie). Maximální délka perlitizované součásti je 25m, jež je posouvána na stole kalícího stroje HPS-01 portálového provedení (viz. obr. 9).

Perlitizovaná součást je ohřívána na její funkční části el. induktorem na teplotu 950 až 1 000℃ (pro dosažení požadavků dle BN 918 142 [27]). Poté je okamžitě tento ohřátý kov ochlazen stlačeným vzduchem na teplotu cca 450℃. Spodní část perlitizované součásti je z důvodu omezení deformací také ohřívána (na teplotu do 450℃). Proces perlitizace je řízen parametry jako intenzita ohřevu/chlazení, rychlost posuvu, teplota ohřátí/zachlazení hlavy/paty kolejnice, jež jsou automaticky zaznamenávány a archivovány. Parametry procesu jsou u konkrétní součástí zpětně kontrolovatelné dle čísla, jímž je každá perlitizovaná součást označena. Po ukončení procesu jsou tyto součásti rovnány na hydraulických rovnačkách.



Obr. 8 – Perlitizovaná kolejnice 60E1 [39]

Obr. 9 – Perlitizační linka (kalící stroj HPS-01)

4.2.2 Vliv teploty

Interlamelární vzdálenost λ dosahuje u homogenního perlitu téměř konstanty. Rozdíly ve vzdálenostech jsou podstatně menší, než by se dalo z metalografických zkoušek povrchu předpokládat, kde lze mezery mezi lamelami pozorovat jako velmi odlišné. To je způsobeno tím, že rovina povrchu neprotíná všechny oblasti perlitu ve stejném úhlu. Skutečné vzdálenosti jsou měřitelné, když nastává situace, že lamely jsou kolmé k povrchu. Běžně rozšířenou metodou, jež je používána pro stanovení hodnoty této vzdálenosti, je určení podle minimální vzdálenosti, jež lze na metalografickém povrchu vzorku vidět.

Průměrná hodnota lamelární vzdálenosti může být také získána vrstvením mnoha přímek na mikrostruktuře takovým způsobem, že protínají perlitické lamely ve všech směrech. Počet lamel protínající tyto linie je poté zaznamenán a hodnota lamelární vzdálenosti *l* se získá vydělením celkové délky těchto linií počtem protnutých lamel. Tím dostáváme *l,* jež je průměrná protínající délka a λ_0, jež je průměrná skutečná hodnota lamelární vzdálenosti (perlitu) [50].

Teplota, při které probíhá transformace austenitu má velký vliv na interlamelární vzdálenosti perlitu. Čím nižší je teplota reakce, tím menší je λ_0. Vzdálenost lamel perlitu ovlivňuje tvrdost výsledné struktury, čím je tato vzdálenost menší, tím bude kov tvrdší. Perlit, jež je tvořen z austenitu při teplotách v oblasti těsně pod eutektoidní teplotou (700℃) má perlitické vzd álenosti v řádu 1,0 μm.

Tvrdost této struktury je okolo 15HRC (cca 226HV) a perlit, jež je tvořen při 600℃ má oproti tomu hodnotu vzdálenosti cca 0,1 μm a dosahuje větší tvrdosti a to přibližně 40HRC (cca 392HV). Míra či rychlost růstu perlitu je také závislá na teplotě. V oblasti teplot těsně pod eutektoidní teplotou, se míra růstu perlitu rapidně zvyšuje s klesající teplotou a dosahuje maxima při 600 ℃, a následn ě znovu klesá při nižších teplotách.

4.3 Austenitická manganová ocel

Ocel patentovaná roku 1883 R. A. Hadfieldem je typická specifickými vlastnostmi, především schopností se zpevňovat, pokud působí na povrch dostatečně velké tlaky či rázy. Vysoká tvrdost v povrchových vrstvách po dynamickém zpevnění zvyšuje odolnost proti abrazivnímu opotřebení a současně zůstává zachovaná dobrá houževnatost středové oblasti, což umožňuje součástem snášet vysoké rázové namáhání.

Z rovnovážného diagramu Fe-C-Mn při 13% manganu plyne, že za vyšších teplot se vyskytuje oblast homogenního austenitu, z něhož se vylučuje u ocelí s vyšším obsahem uhlíku při pomalém ochlazování pod teplotou A_{CM} podvojný cementit $(Fe, Mn)_3 C$ a pod teplotou A_{C1} se austenit rozpadá na jemný perlit. Po velmi pomalém ochlazování zůstává v matrici 30 až 50% zbytkového austenitu, v němž je rozpustnost uhlíku vysoká. Z důvodu, že mangan i uhlík se silně odměšují,

tak se v matrici v litém stavu objevuje, i při nižším obsahu uhlíku, eutektikum tvořené z destiček cementitu a austenitu.

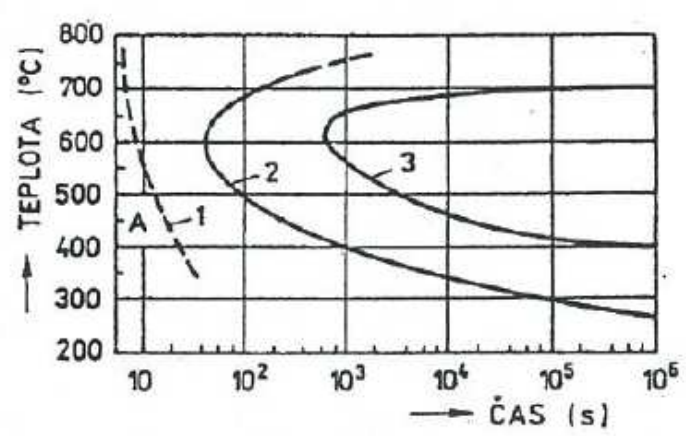
Chemické složení Hadfieldovy oceli (viz. příloha G), zůstalo od doby svého patentování v podstatě beze změny. Při zvyšování obsahu uhlíku stoupá odolnost proti abrazivnímu opotřebení, ale z důvodu vylučování většího množství karbidů při chladnutí na hranicích zrn stoupá také sklon k trhlinám. Z toho důvodu se doporučuje používat obsah uhlíku na spodní hranici povoleného obsahu či přidat menší množství titanu (do 0,05% v obsahu oceli, při vyšším klesá vrubová houževnatost), jež zjemňuje zrno. Při legování ocelí titanem, se současně zvyšuje obsah hliníku, protože ferotitany obsahují až 8% hliníku.

Vliv manganu (při 11-14% obsahu v oceli) nemá vliv na odolnost proti opotřebení, ale zlepšuje plastické vlastnosti. Pokud jsou oceli legovány chrómem (cca 1% v obsahu oceli) mohou zvýšit mez kluzu až o 11%. Obsah křemíku v ocelích na odlitky je do 0,7% a pro oceli tvářené je do 1%. Křemík ovlivňuje nepříznivě vrubovou houževnatost, protože snižuje rozpustnost v austenitu.

Obsah fosforu je v austenitických ocelí vyšší než u běžných konstrukčních ocelí a protože se hromadí na hranicích zrn, tak snižuje odolnost proti opotřebení (při obsahu v oceli nad 0,08%) či vrubovou houževnatost (při obsahu v oceli nad 0,1%).

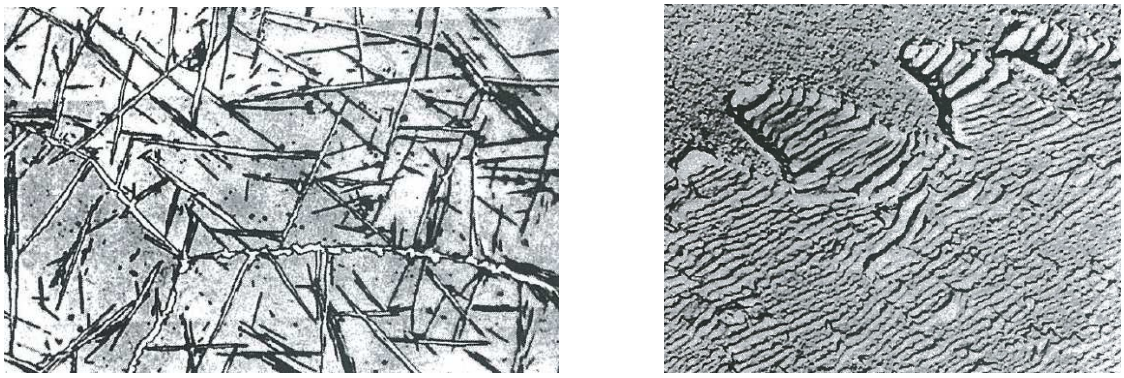
Pro zvýšení meze kluzu se austenitické oceli legují 2% molebdenu (při vyšším obsahu již klesá pevnost v tahu). Během procesu tepelného zpracování je po odlití tvořena matrice těchto ocelí austenitem, v němž je vyloučen podvojný cementit, jež snižuje houževnatost.

Pro získání homogenní, austenitické matrice, je potřeba ocel zahřát na teplotu cca 1030-1080℃, p ři které se karbidy rozpustí v austenitu a ochladit tak rychle, aby se potlačilo jejich zpětné vyloučení. Austenitická manganová ocel má velkou lineární roztažnost a malou tepelnou vodivost [28]. Při novém ohřevu součástek s austenitickou matricí (např. při svařování) či při pomalém ochlazování z teploty rozpouštěcího žíhání se vylučují v základní matrici karbidy M_3C a probíhá částečný rozpad austenitu na jemný perlit (viz. obr. 10).



Obr.10 – Diagram IRA austenitické manganové oceli [28]

Během izotermické výdrže je matrice v oblasti A tvořena homogenním metastabilním austenitem. V oblasti 1 se vylučuje na hranicích zrn podvojný cementit, který snižuje houževnatost. Po prodloužení výdrže do oblasti 2 tvoří cementit dlouhé jehlice, jež výrazně snižují vrubovou houževnatost (viz. obr. 11). Po prodloužení výdrže do oblasti 3 je austenit částečně transformován na jemný perlit. Karbidy cementitického typu obsahují vyšší obsah manganu a mezi lamelami je vyloučen ferit ochuzený o mangan. Se snížením houževnatosti základní matrice v okolí svaru je nutno počítat při opravách povrchových vad svařováním.



Obr. 11 – Mikrostruktura – vznik tzv.dlouhých jehlic a jemného perlitu [28]

Oceli s jemným zrnem mají vyšší odolnost než oceli hrubozrnné. Odolnost proti opotřebení a mechanické vlastnosti u austenitických manganových ocelí závisí ve velké míře na velikosti zrna (např. pevnost v tahu klesá se zvětšující se jeho velikostí). Odolnost proti opotřebení je možno zvýšit tzv. perlitizací. Při tomto tepelném zpracování je ocel žíhaná za teploty 500-600℃. Po cca jednohodinové výdrži se rozpadne asi 50% austenitu na jemný perlit. Po výdrži se opakuje rozpouštěcí žíhání na teplotě 970-1010℃ a ochlazuje se ve vodě. Při zjišťování mechanických vlastností je problematické měření tvrdosti, protože za působení tlaku tvrdoměru matrice zpevňuje.

Tato schopnost zpevňovat za dostatečně vysokého tlaku nebo rázu je u austenitických ocelí důležitá. Pokud je namáhána pouze abrazivně (bez tlaku a rázu) je odolnost proti opotřebení nízká. Naproti tomu je třeba se zpevňováním počítat také při obrábění, jež je z toho důvodu velice obtížné.

4.4 Parametry dynamické odezvy aplikovaných materiálů

Materiály pro dané aplikace jsou normativně testovány pouze základními mechanickými zkouškami, které v podstatě vypovídají o následujících parametrech - pružnost, plasticita, pevnost, houževnatost.

Mechanické vlastnosti jsou velmi výrazně ovlivňovány mnoha interními a externími faktory. Mezi nejdůležitější interní faktory u dané aplikace patří chemická heterogenita, strukturní heterogenita, velikost a tvar kontaktní dvojice, koncentrátory napětí (konstrukční a technologické vruby) a stav povrchu. Mezi nejdůležitější externí faktory patří teplota, rychlost deformace, druh a časový průběh zatěžování a okolní

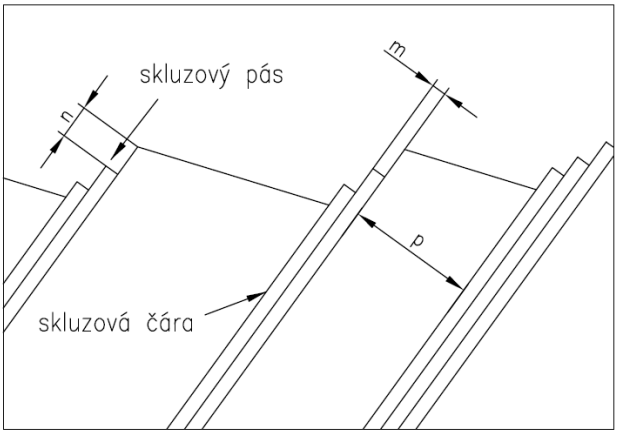
prostředí. Přitom např. negativní vlivy na plasticitu znamenají u dané aplikace principielní omezení nejenom houževnatosti ale i únavové životnosti (v souvislosti s dále diskutovaným specifickým charakterem kontaktně-únavového poškozování materiálu).

Obecnou podmínkou dostatečné plasticity materiálů při dynamickém zatěžování je dostatečný počet funkčních skluzových systémů. Schopnost dislokací pohybovat se krystalovou mřížkou je výrazně ovlivněna metalurgickou jakostí i celkovým stavem struktury materiálu. Hranové a šroubové dislokace se mohou pohybovat především skluzem ve skluzové rovinně, překročí-li skluzové napětí v rovině a směru skluzu určitou mezní hodnotu. K pohybu dislokace jinak dokonalou mřížkou stačí velmi malé hodnoty smykového napětí. V reálných krystalech se ale dislokace setkává s překážkami, jejichž překonání vyžaduje zvýšení skluzového napětí. Překážkami jsou např. jiné dislokace, atomy příměsí či částice jiných fází.

Na překážkách typu atomů příměsí či jiných částicích (precipitátech) se dislokace uchytí a k dalšímu pohybu je nutné dodat zvýšené napětí pro překonání této bariéry. Tato interakce dislokací s atomy příměsí a precipitáty je základním principem zpevňování kovů. Základní mechanismy plastické deformace jsou:

Skluz dislokací - se realizuje pohybem dislokací ve skluzových systémech. Dislokace vznikají v materiálech tzv. Frank-Readovým zdrojem, k jejich pohybu dochází po překročení kritického napětí a jejich skluz probíhá jen v určitých krystalografických rovinách a směrech, pro něž platí:

- směr skluzu je totožný s některým směrem, který je nejhustěji obsazený atomy
- skluz probíhá většinou v rovině nejhustěji obsazené atomy
- ze souboru skluzových systémů (rovina, směr) je aktivní ten skluzový systém, jež je optimálně orientován vůči vnějšímu zatížení, tzn. ve kterém je maximální smykové napětí. Z mikroskopického hlediska se skluz projevuje tzv. skluzovými pásy (viz. obr. 12).



Obr. 12 – Schéma skluzového pásu

Dvojčatění - mechanismus plastické deformace, jež se uplatňuje zvláště kovů s kubickou plošně středěnou a hexagonální těsně uspořádanou mřížkou. Jeho výskyt je podporován především vysokou rychlostí deformace a nízkou teplotou. Během dvojčatění se atomy v části krystalu přesunou o necelou meziatomovou vzdálenost, a to tím způsobem, že vznikne oblast mřížky souměrná podle roviny dvojčatění s neposunutou mřížkou. Přesun atomů při dvojčatění je výsledkem pohybu neúplných dislokací (na rozdíl od deformace kluzem, kde se jedná o pohyb úplných dislokací). Dvojčatění vzniká při plastické deformaci, vlivem napětí při ohřevu či fázové přeměně.

Průběh deformačního zpevnění u monokrystalů se liší od zpevňování polykrystalů, neboť u reálných polykrystalů se uplatňuje několik dalších mechanismů jako zpevnění hranicemi zrn, substitučními atomy, intersticiálními atomy či zpevnění precipitační. Zpevnění hranicemi zrn vyjadřuje Hallův-Petchův vztah:

$$R_e = \sigma_O + k_y \cdot d^{-\frac{1}{2}} \tag{1}$$

kde: σ_0 *– je třecí napětí potřebné pro pohyb dislokací (nízkolegovaná ocel dosahuje cca 40 MPa)* *[MPa]*

k_y *- je materiálová konstanta* *[N*mm$^{-3/2}$]*

d - je střední průměr zrna *[mm]*

Materiál po plastické deformaci má při novém zatížení vyšší odpor proti deformaci tím vyšší, čím vyšší byla předcházející deformace. Změna vlastností materiálů po plastické deformaci se nazývá zpevňování. Intenzita deformačního zpevnění je funkcí počtu skluzových systémů krystalu. Stadium zpevnění a skluz může být laminární (jeden aktivní skluzový systém) či turbulentní (dva aktivní skluzové systémy). Zpevnění při plastické deformaci souvisí buď s těžším vznikem dislokací nebo s jejich omezeným pohybem [40]. Skluzové napětí τ_R (dle Taylora) potřebné na pohyb dislokace v napěťovém poli okolních dislokací s hustotou ρ vyjadřuje vztah:

$$\tau_R = \frac{G \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot L} \tag{2}$$

kde: *G - je modul pružnosti* *[MPa]*

b – je Burgersuv vektor

L - je rovno $\rho^{-1/2}$ a znamená střední vzdálenost mezi dislokacemi [51].

Existuje více teorií zpevňování a nejlépe propracovaná je tzv. teorie „deformačního zpevnění se třemi stádii zpevnění“. Teorie „pile-up“ předpokládá, že v oblasti lineárního zpevnění se dislokace ze zdrojů mohou zastavit před překážkou a další dislokace se nahromadí za nimi. Teorie „dislokačního lesa“ předpokládá, že kovy se střední či nízkou energií chyby vrstvení nemají nahromaděné dislokace před překážkou, ale dislokace tvoří složité sítě.

Nejčastěji vznikají husté nepravidelné shluky s vysokou hustotou dislokací a které oddělují oblasti zrna, kde je hustota nízká. Zdroje dislokací začnou pracovat, když napětí dosáhne dostatečnou hodnotu na to, aby nově vzniklé dislokace mohli protnout dislokace lesa. Teorie „dislokačních skoků“ předpokládá, že při pohybu vakančních skoků vznikají řady vakancí, jež brzdí pohyb dislokací. Tyto mechanismy a faktory se uplatňují jak u monokrystalů, tak polykrystalů, kde navíc přibývá velmi výrazný účinek hranic zrn, jako nepřekonatelné překážky pro pohyb dislokace. Deformační napětí materiálu je závislé na hustotě dislokací R.

$$\tau_k = \tau_O + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \rho^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

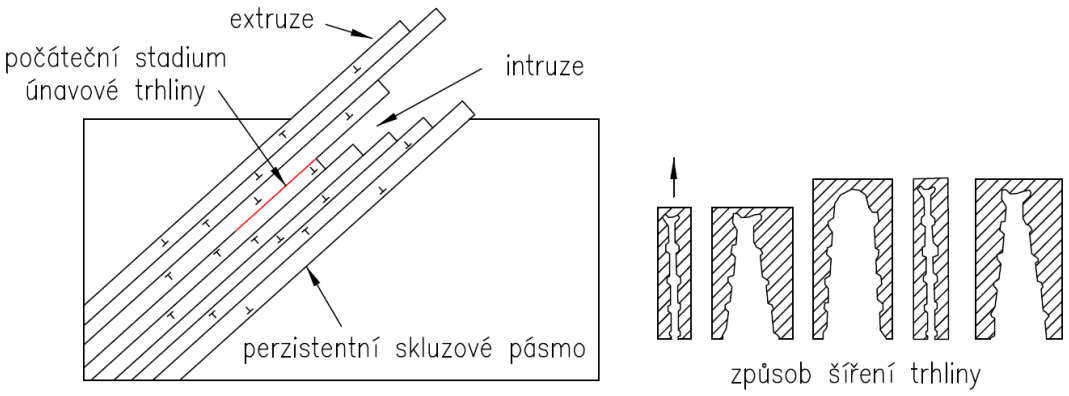
Kde τ_0 je třecí napětí, α je faktor popisující pevnost vazby dislokační sítě.

Velikost deformačního napětí potřebného pro pokračování deformace je funkcí množství mřížkových poruch, kde k je konstanta úměrnosti a τ_0 je počáteční napětí deformace:

$$\tau = \tau_O \cdot k \cdot G \cdot b \cdot \rho^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

Proces únavového poškozování

Únava materiálu je proces změn strukturního stavu materiálu a jeho vlastností, jež je vyvolán cyklickým (kmitavým) zatěžováním, přičemž nejvyšší napětí je menší než mez pevnosti R_M a většinou i menší než mez kluzu R_E. V důsledku toho dochází v materiálu k hromadění poškození, jež se ke konci procesu projeví růstem makroskopické trhliny a únavovým lomem. Místo iniciace lomu je přednostně na povrchu (výjimkou jsou kompozitní materiály). Únavový proces má 3 stadia (změny mechanických vlastností, vznik únavových trhlin a šíření únavových trhlin – viz. obr. 13).



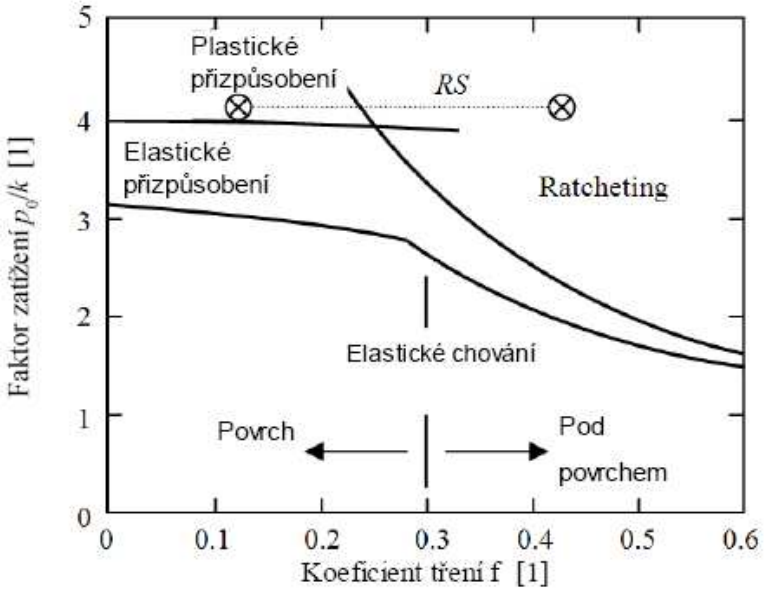
Obr. 13 – Stadium iniciace a šíření únavové trhliny [40]

4.5 Specifikum cyklického zatěžování v systému kolo-kolejnice

V důsledku mikrostrukturních změn v počátečním stadiu cyklického zatěžování dochází ke změně jak fyzikálních vlastností, tak i k napěťově-deformační odezvě materiálu. Intenzita změn zpravidla s počtem cyklů klesá, až dojde k saturovanému stavu. U jednoosého namáhání je tento stav obvykle charakterizován uzavřenou hysterezní smyčkou, jež se získává na servo-hydraulických zkušebních strojích při zkouškách nízkocyklové únavy.

Za směrodatnou je obvykle uvažována uzavřená hysterezní smyčka v polovině životnosti (stanoveno ze záznamů realizovaných zkoušek). Proložením vrcholů několika hysterezních smyček, stanovených pro různé hodnoty rozkmitu deformace, respektive amplitudy deformace, lze získat cyklickou deformační křivku, která je jednou ze základních napěťově-deformačních charakteristik v cyklické plasticitě. Chování kovových materiálů během cyklického zatěžování lze rozdělit na [29]:

- dokonale pružné (mez úměrnosti není překročena v žádném cyklu. Lze předpokládat, že nedojde k porušení);
- elastické přizpůsobení (tzv. elastic shakedown, plastická deformace se objevuje v prvních cyklech a v následujících cyklech je chování elastické. Může dojít k porušení vlivem vysokocyklové únavy);
- cyklická plasticita (tzv. plastic shakedown, je charakterizována uzavřenou hysterezní smyčkou v závislosti napětí–deformace. Tento případ vede k porušení nízkocyklovou únavou);
- cyklické tečení (tzv. ratchetting, postupným nárůstem plastické deformace může dojít k vyčerpání plastických vlastností materiálu. Vznik je podmíněn nesymetrií cyklického zatížení nenulovým středním napětím).



Obr. 14 – Shakedown mapa s vyznačením RS (rolling/sliding) [30]

Pro popis chování kovových materiálů se používá tzv. „Shakedown mapa“ (viz. obr. 14), ve které jsou vyznačeny oblasti různých mezních stavů jako elastické přizpůsobení (elastic shakedown) či ratcheting. Koncepce vznikla v letech 1990 – 1995. Používá se při výpočtu zbytkového napětí dvourozměrného valivého a kluzného kontaktu.

4.5.1 Cyklické zpevňování/změkčování

Proces cyklického zpevňování či změkčování souvisí se zvětšováním či zmenšováním odporu proti deformaci materiálu namáhaného cyklickým zatěžováním. Během tvrdého zatěžování vykazuje materiál (u deformačně řízených zkoušek) cyklické zpevňování, jestliže dochází ke zvětšování amplitudy napětí σ_A, v opačném případě se jedná o cyklické změkčování. Během měkkého zatěžování (např. zatěžování s nenulovou hodnotou středního napětí σ_M) vykazuje cyklicky změkčující materiál zvětšování amplitudy deformace a cyklicky zpevňující materiál vykazuje zmenšování této amplitudy deformace.

Pokud materiál nevykazuje ani jedno z uvedených tranzitních chování, je označen jako cyklicky stabilní. Cyklicky stabilní kovové materiály jsou ale vzácné a většina kovových materiálů se vyznačuje buď cyklickým zpevňováním nebo změkčováním. Tyto vlastnosti cyklického zpevňování/změkčování však nejsou závislé jen na materiálu, ale také na amplitudě zatížení (případně na tzv. historii zatížení).

Mechanismus zpevňování je ovlivněn rychlostí deformace a podmínkami namáhání (zda působí tahové, tlakové či ohybové napětí). Na základě výsledků výzkum procesu zpevňování studované austenitické oceli bylo vyloučeno, že zpevnění vyvolává transformace austenitu na epsilon nebo alfa martenzit. Pokud by bylo nalezeno po zpevnění větší množství těchto fází, jednalo by se pravděpodobně o místa s větším odmíšením uhlíku a manganu. Plastická deformace austenitické manganové oceli tedy probíhá pohybem soustavy dislokací, při kterém se tvoří nové vrstevné chyby a dvojčatové lamely.

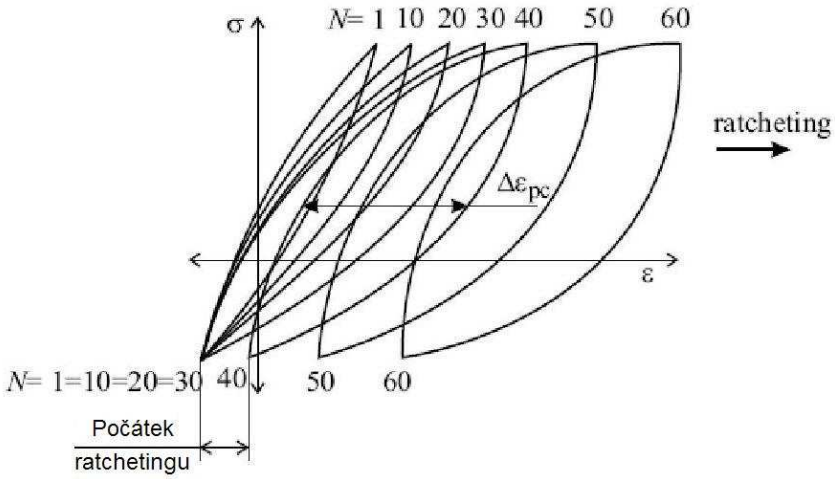
Vznik nových strukturních poruch je příčinou zvýšené tvrdosti v počátečním stadiu deformace. Při jejím pokračování je zpevňování vyvoláno tím, že obě strukturní poruchy zabraňují pohybu soustavy dislokací, tudíž se jejich hustota zvyšuje s současně se zvyšuje (při vyšším stupni deformace) hustota dvojčatových lamel, jež svým nerovnoměrným uspořádáním znovu rozdělují matrici na stále menší oblasti. Během plastické deformace vznikají nové dislokace, jež ve své původní formě nemohou přejít dvojčatovou lamelu.

Z toho důvodu vznikají tzv. interface dislokace, jež se mohou pohybovat až za působení vyššího napětí. Čím jemnější je nové rozdělení matrice dvojčatovými lamelami, tím větší je hustota těchto interface dislokací a tím větší musí být napětí, nutné pro plastickou deformaci. Při zpevňování působí také atomy uhlíku, jež jsou přitahovány do míst s maximální koncentrací dislokací. V deformačně zpevněné

vrstvě jsou tedy vrstevné chyby, dvojčatové lamely a síť kluzových dislokací a stupeň zpevnění závisí na celkovém množství a poměru těchto strukturních poruch [28].

4.5.2 Ratcheting

Kontaktním zatěžováním při konstantní amplitudě napětí σ_A a nenulovém středním napětí σ_M však od jisté hladiny zatížení dochází k akumulaci plastické deformace v jednom směru a dochází k cyklickému tečení (tzn. ratchetingu – viz. obr. 15). Za nejjednodušší případ je považován ratcheting, vznikající při jednoosém namáhání.



Obr. 15 – Schéma hysterezního chování cyklického změkčení mat. před a po začátku ratchetingu [31]

Pokud je tento jednoosý ratcheting zobrazován v napěťově-deformační charakteristice, tak se projevuje otevřenou hysterezní smyčkou v důsledku odlišného nelineárního chování materiálu v tahu a tlaku (vlivem deformačně indukované anizotropie). Cyklické tečení (ratcheting) může také ovlivňovat změna velikosti, polohy a tvaru kontaktní plochy v průběhu zatěžování.

Ratcheting je kvantifikován tzv. hodnotou přírůstku plastické deformace za cyklus, jež lze určit jako rozdíl plastické deformace ve vrcholech dvou po sobě jdoucích hysterezních smyček nebo jako střední hodnotu plastické deformace v cyklu, jež odpovídá aritmetickému průměru plastické deformace v horním a dolním vrcholu této otevřené hysterezní smyčky. Existuje také souvislost mezi cyklickým změkčováním/zpevňováním a vývojem akumulované plastické deformace [30].

Výzkumem ratchetingu jsou prakticky podmíněny možnosti teoretické predikci životnosti v kontaktu kolo-kolejnice, za podmínek při více-osého namáhání.

4.6 Metody studia degradace železničního svršku

4.6.1 Možnosti hodnocení v provozních podmínkách

Zavedené režimy získávaní údajů opotřebení vycházejí ze zjišťování a sledování součásti v průběhu její životnosti, nebo jen během validace, tj. během sledováním vybraných údajů zpravidla na zřízeném zkušebním úseku v železniční trati. Tato validace je součástí postupu pro zavádění nových součástí a je dokladována z důvodu certifikace výrobce k dodržování normy ČSN EN ISO 9001:2000 [32]. V oboru železniční infrastruktury v ČR trvá zpravidla 1 - 5 let dle typu součásti. Roční zátěž zkušebních úseků je zpravidla cca 2 až 47 mil. hrubých tun dle řádu tratě (viz. příloha C tab. C4). Zřízení zkušebních úseků v trati SŽDC je řízeno dle [36], [37] a [38].

Jedním z takových prostředků je i výzkum na železničních zkušebních okruzích (viz. tab. č. 6).

Země	Místo - Organizace	Délka [km]	Rychlost [km/h]
ČR	Cerhenice – VÚŽ	13,2 a 3,95	210 a 85 (120)
Německo	Wegberg - Wildenrath	6	160
Polsko	Žmigroď - CNTK	7,7	120
Francie	Petite Foret - CEF	2,7	110
Rusko	Ščerbinka - VNIIŽT	6	70
USA (Colorado)	Pueblo - Pueblo test centre	---	---
Rumunsko	Faurei	---	---

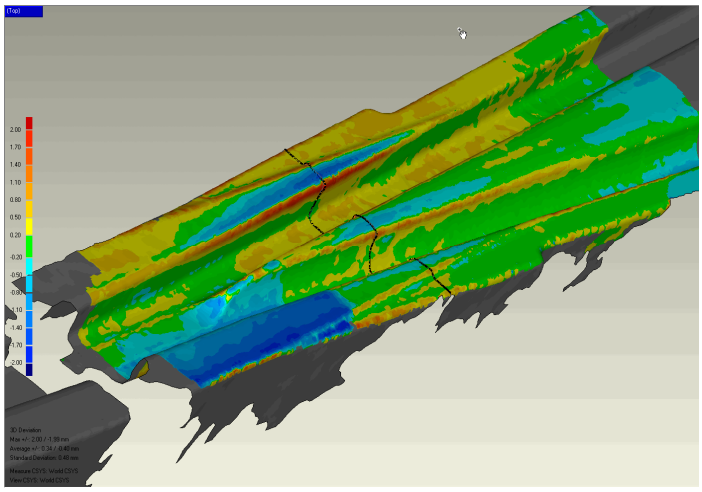
Tab. 6 – Nejvýznamnější zkušební železniční okruhy

V ČR jsou na VUŽ pro jízdní zkoušky k dispozici dvě zkušební tratě s normálním rozchodem 1435 mm, a to velký zkušební okruh (zpravidla pro vozidla) o délce 13,2km pro rychlost až 210km/h a malý zkušební okruh (v minulosti zpravidla pro prvky infrastruktury) o délce 3,95km pro rychlosti do 85 až 120km/h dle projížděného oblouku. V zahraničí jsou inzerovány zkušenosti ze zkušebních úseků z vysoce zatěžovaných tratí, kde roční zátěž dosahuje až 200 mil. hrubých tun (např. USA).

Mezi tradiční prostředky pro hodnocení degradace v trati patří sledování ojetí pomocí ocelového pravítka s klínkem (viz. obr. 16, přesnost měření je $\pm$ 0,1mm) či modernější metody sledování pomocí srdcovkového elektronického profiloměru. Sledování v našich podmínkách probíhá v souladu s BOZP dle [35] a měření je realizováno ve vybraných příčných řezech srdcovek (cca 1 - 4 na srdcovce). Mezi nejmodernější metodu měření patří sledování ojetí pomocí skeneru HandyScan 3D EXAscan, jež je schopen zaznamenat celou oblast horních ploch, přechodu kola z křídlové kolejnice na hrot. Z této oblasti lze následně vybrat, jak jakýkoli příčný řez, tak ale i podélný a následná 3D presentace (viz. obr. 17) pomocí barevné vrstevnicové plochy je maximálně přehledná. V současné době není v ČR 3D skener

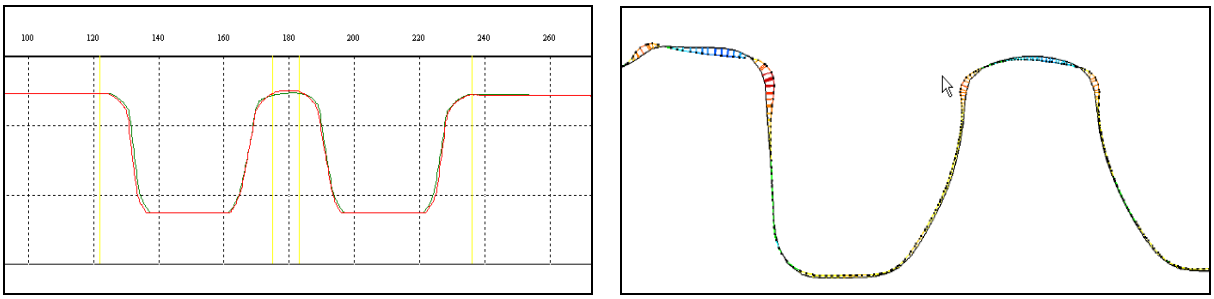
uznáván jako měřidlo pro ojetí částí výhybek ze strany provozovatele železniční dopravní cesty (SŽDC) a tak měření ojetí je třeba při validaci realizovat také standardními měřidly [34] a výsledky měření jsou poté vzájemně porovnávány a ověřovány.

Obr.16 – Měření ocel. pravítkem a klínkem



Obr.17 – Prezentace z vyhodnocení 3D skenování

Tento princip 3D skenování umožňuje při zpracování dat naskenované plochy (tzv. polygonové sítě) převést na obecné plochy, nebo na geometricky definované plochy. Dosahovaná přesnost měření je stejná jako u elektronického srdcovkového profiloměru a dosahuje ± 0,04mm, viz. obr. 18. Ze zkušeností pak bylo definováno, že převod na geometricky definované plochy nedává u komplikovaných součástí (např. u srdcovek) dobré výsledky.



a) *b)*

Obr. 18 - Porovnání řezů – elektronický srdcovkový profiloměr (a) a Skener HandyScan 3D EXAscan (b)

Plochy lze poté exportovat do výměnných grafických formátů a dále kupř. vyhodnocovat validaci, provádět konstrukční úpravy na validované součásti, provádět numerické výpočty či jej lze použít pro slévárenské simulace v programu MAGMA.

V zahraničí jsou používána také jiná standardní či experimentální měřidla než jsou používána v ČR (řídící se dle [16]) pro zjišťování stavu železničního svršku. Jde

o varianty měřícího zařízení typu Krab (např. Krab 84.09, Krab light či VOK), elektronický profiloměr Railproof či laserový profiloměr Contour. Měření pro zjišťování vlnkovitosti či drsnosti je prováděno měřidlem MDK-01. Pro zjišťování stavu degradace a rozpadu geometrických parametrů koleje (GPK) lze používat speciální vyhodnocovací software (např. MR. [41] či ESVELD [42]).

4.6.2 Experimentální způsoby studia degradace v laboratoři

Pro zjišťování degradace, popř. predikce životnosti součástí železničního svršku v oblasti kontaktní únavy, lze v praxi použít i empirický přístup. Tento způsob testování součástí, především s novými materiály, šetří finanční prostředky a je realizován na speciálních zkušebních zařízeních.

Poř.	Experimentální zařízení kolo-kolejnice	Umístění experimentálního zařízení	Poloměry kol [mm]
1.	Experimentální zařízení kolo-kolejnice	Univerzita Pardubice	420 / 300
2.	Twin-disk machine	Japonsko	430 / 430
3.	Two-roller rig test machine	Taito Rapid Transit Autority	--- / ---
4.	Wazau UTM 2000 Two disk machina	Lulea University of Technology	--- / ---
5.	SUROS twin-disk test machina	University of Sheffield	--- / ---
6.	Full scale roller rig	National Traction Power Laboratory	--- / ---
7.	Exp. zař. s kolejnicí ve tvaru prstence	VŠB-TU	150 / 30
8.	TUORS Rolling sliding wear testing machine	VŠB-TU	82 / 216
9.	LEROS Rolling sliding wear machine	Leicester	--- / ---
10.	Roller Rig	Politecnico di Torino	--- / ---
11.	Twin disc machine	DeltaRail	250 / 250
12.	Disc on disc esting machine	National University of Colombia	--- / ---
13.	Two-disc test rig	University of Qeensland	170 / 425
14.	JD-1 wheel/rail simulation facility	Southwest Jiaotong University	1050 / 210
15.	VAS test rig	voestalpine Schienen	1250 / ---
16.	Spinning rail rig	University of Birmingham	1800 / ---

Tab. 7 – Experimentální zařízení simulující kontakt kolo-kolejnice

Nejčastěji je posuzována odolnost materiálu proti kontaktní únavě při odvalování na zařízeních s válcovými zkušebními tělesy (tzv. twin-discs) stejného či mírně odlišného průměru (z důvodu vyvození požadovaného prokluzu). V experimentech jsou poté zjišťovány hmotnostní úbytky, změna tvrdosti povrchu, změna drsnosti povrchu či změna průměru vzorků v závislosti na počtu cyklů.

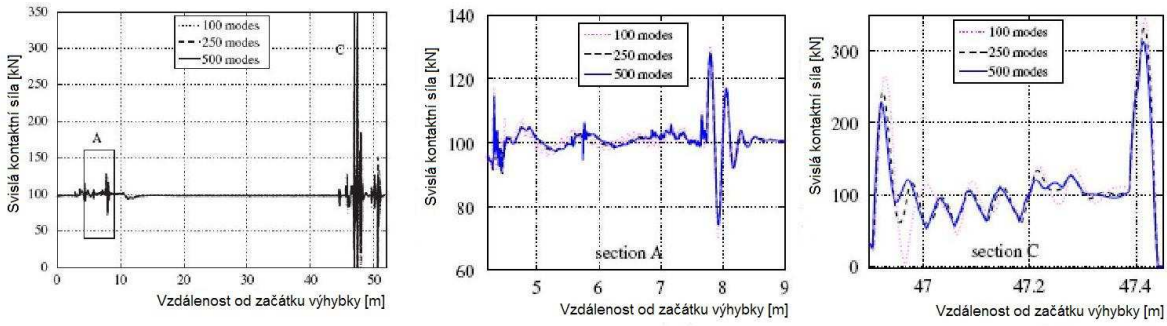
V některých experimentech se uplatňuje přístup, jež využívá výsledky numerického řešení pro stanovení životnosti a vzhledem k dosaženému pokroku v kritériích pro nízko-cyklovou a vysoko-cyklovou únavu materiálu při tzv. neproporcionálním namáhání, je zkoušeno používat stejné přístupy ke stanovení počtu cyklů do iniciace trhliny také v oblasti kontaktní únavy [30]. V laboratořích DFJP Univerzity Pardubice bylo sestaveno experimentální zařízení pro výzkum v oblasti kontaktní únavy s možností simulace kontaktu železničního kola a kolejnice. Obdobné zařízení je také na jiných výzkumných pracovištích či univerzitách (viz. tab. 7 a příloha G).

4.6.3 Simulační výpočty zatížení na železniční výhybce

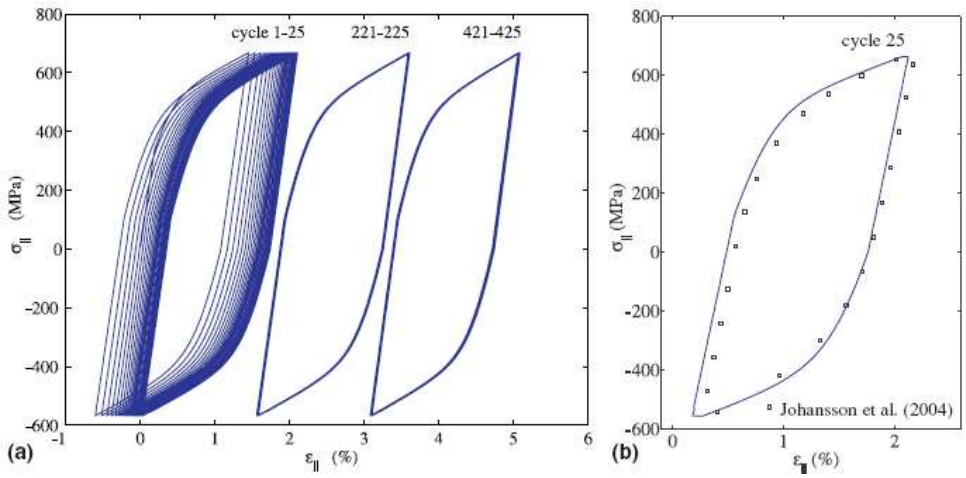
Většina odborných prací zabývající se optimalizací železničního svršku dochází k závěrům a konstatováním o potřebě vytvoření komplexního modelu „železniční vozidlo-svršek-spodek“. Z důvodu řešení projektu VaV fy. DT Prostějov „Zpružnění železniční výhybky“ byl v roce 2010, ve spolupráci s VÚT a UPCE, vytvořen 3D výpočtový model výhybky [44].

Později byly získány informace o vytvoření obdobného modelu na CHARMEC ve Švédsku, jež vznikl s podporou fy. VAE v roce 2009. Existují ještě jiné, méně komplexní modely pro speciální použití, např. [23] pro optimalizaci podpražcových podložek ve výhybce či [22] (NUCARS^{TM}) pro optimalizaci průjezdu výhybkou, tzv. KGO. Dále model DARTS (DynTrack Systém, USA), SUBITI (Technical University of Berlin, Německo), TRACK (Start Grassie Engineering Solutions, Anglie) či VICT (Southwest Jiaotong University, Čína) [49].

Definování sil z 3D výpočtového modelu CHARMEC na vybrané části výhybky (viz. obr. 19) dosahuje nárůstu z cca 100kN na cca 125kN na jazyku a cca 310kN na srdcovce. Tyto hodnoty odpovídají i jiným zdrojům z [47] či [48], jež udávají zvýšení sil až na 4,83 násobek, v závislosti na rychlosti průjezdu kolejového vozidla železniční výhybkou.

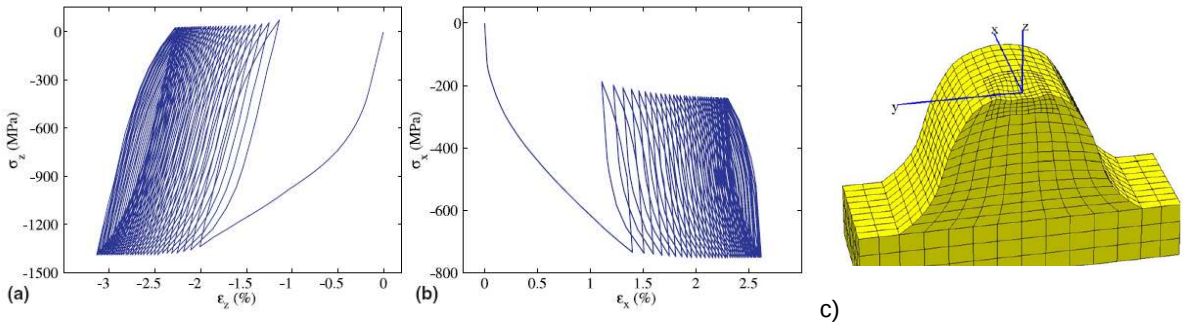


Obr. 19 – Zatížení výhybky ze simulace průjezdu modelem výhybky na CHARMEC [44]



Obr. 20 – Jednoosé cyklické namáhání z modelu (a)
a porovnání mezi analýzou a experimentálními daty(b) [71]

Kromě simulací průjezdu výhybkou jsou prezentovány také výsledky simulace procesu ratcheting, jako např. dle [71]. V tomto případě byly získány experimentální výsledky z kolejnice R260 během cyklického víceosého namáhání s nulovou střední hodnotou a odezva materiálu (viz. obr. 20) pro prvních 25 cyklů. Odpovídající parametry materiálu byly nižší než odpovídalo očekávaným hodnotám ze statického monotónního experimentu. Lamely železniční srdcovky byly reprezentovány modelem pro FEM analýzu, včetně možných posunů. Model byl omezen rovnicí a zvolenými stupni volnosti a byl vytvořen ve velikosti 40x125x70mm (viz. obr, 21c). Tato geometrie byla zatížena celkovým vertikálním zatížením 160kN působícím na kontaktní eliptickou plochu . Vertikální napěťově-deformační odezva v okolí zatížené oblasti je na obr. 21. I když byl model nastaven jen s jednoosým zatížením, je tento jednoduchý příklad ukázkou dalšího vývoje směrem ke zjišťování a analýzám poškození a únavy.



Obr. 21 – Napěťově deformační průběh během 50ti cyklů
v ose Z (a), v ose X (b) a určení souřadného systému modelu hrotu srdcovky (c) [71]

5. HODNOCENÍ PROVOZNÍ DEGRADACE

5.1 Materiálové analýzy provozně vyvolaných poškození

Výchozí materiálové analýzy byly orientovány na identifikaci rozhodujících parametrů degradace u obou zkoušených strukturních variant materiálů – perlitické vs. austenitické oceli. U každé z nich se zaměřily především na typické vady (viz. příloha F), jež lze u daných materiálů (viz. příloha H) a součástí železniční výhybky, z nichž byly vzorky odebrány, očekávat. Tyto analýzy jsou stěžejní z hlediska možné predikce výskytu, iniciace a šíření únavových trhlin, popř. jiných vad. Odběr vzorků byl proveden tak, aby nedošlo k mechanickému nebo tepelnému ovlivnění materiálu.

Vzorky z perlitické oceli byly získány z přímého jazyku 49E1A3 (viz. obr. 22b) na konci své životnosti s velkým výskytem vad typu head checks v různých stádiích vývoje. Odebrány byly příčné a podélné řezy pro strukturní analýzy a možnost verifikace výsledků provedených experimentů.

Vzorky z austenitické manganové oceli byly získány ze srdcovky ZMB výhybky 60E1 1:11-300 (viz. obr. 22a); informace chemického složení materiálu z atestu je součástí přílohy I, tab. I1, zjištěna projetá zátěží cca 145 mil. hrt. Vzorky byly odebrány z typicky namáhaných míst (označeno 1, 2, 3) pro možnost také vzájemného porovnání:

- z oblasti křídlové kolejnice (nepojížděný, nepoškozený vzorek – tzn. výchozí stav)
- z oblasti hrotu srdcovky v šířce cca 40mm (oblast největšího dyn. namáhání)
- z oblasti přípojné kolejnice hlavního směru (typicky namáhaná jako v běžné koleji)

a) *b)*

Obr. 22 – Součásti železniční výhybky z nichž byly odebrány vzorky

5.1.1 Perlitická ocel

Analyzované vzorky byly ze standardní neperlitizované perlitické oceli R260 s rozvinutým poškozením typu Head check. Podle zpracované katalogizace vyskytujících se vad na jazycích železničních výhybek (viz. příloha F a kap. 2.4) se jedná o mechanismus poškozování, který patří vedle ojíždění formou „úbytků“ k nejčastějším. Tato skutečnost je dána především tím, že se zvyšují nároky na přepravní rychlosti, zatížení na nápravu včetně jejího celkového objemu během roku a jsou řešeny aplikací materiálů o vyšší pevnosti. Součást přímého jazyku, z které byly získány vzorky je typickým příkladem, kdy byla používána v náročnějších provozních podmínkách než v době jejího návrhu či vložení do trati. Součástí tohoto trendu zvyšování užitných vlastností je rovněž tzv. perlitizace a proto bylo studium zaměřeno také na tento typ technologického zvýšení užitných vlastností součástí z perlitické oceli. Cílem je získat poznatky umožňující potlačení problému s abrazí, popř. nežádoucí míry deformace pojížděných částí profilů železničního svršku a výskytu únavových vad.

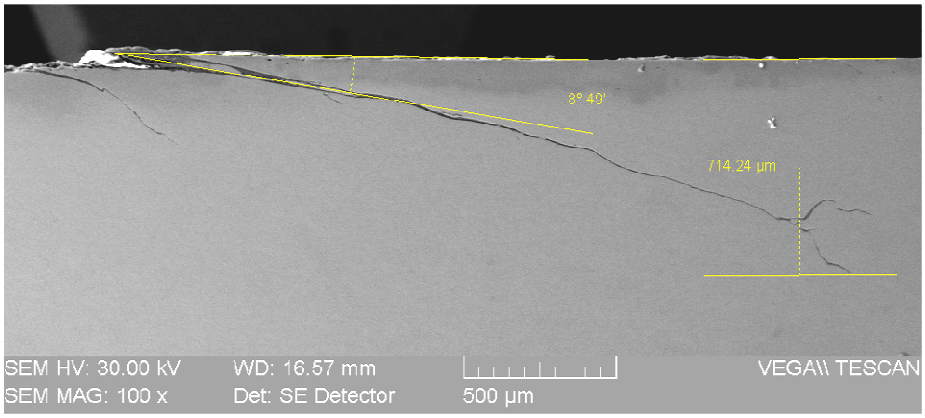
Head checks je typickou vadou tohoto typu, který na rozdíl např. od vady typu shelling není podmíněn nižší metalurgickou jakostí materiálu. V současné době je dosahována podstatně vyšší mikročistota všech typů aplikovaných materiálů, např. výskyt rozměrných vměstků jako důsledek opětovné reoxidace (v minulosti byly často pozorovány tzv. „oxidické pleny“) byl již prakticky plně potlačen. Head checks je charakteristický povrchově evidovaným síťovím souběžných kontaktně-únavových trhlin; pro jeho potlačení se využívá především preventivního broušení a zvyšuje tak celkovou míru „opotřebení“ profilu dané kolejnice.

Vlastní materiálové analýzy byly provedeny v podélných i příčných řezech vzhledem ke směru způsobu pojíždění kolejovými vozidly. Studium bylo zaměřeno na základní parametry procesu poškozování, které byly hodnoceny také u vzorků po experimentálním zatěžování, tj. zejména hloubky plastického přetvoření a jeho vlivu na iniciaci a orientaci dalšího rozvoje poškození.

K iniciaci poškození materiálu z podstaty kontaktně-únavového poškození v dané aplikaci dochází mechanismem kumulativní plastizace vrstev pod kontaktní ploškou. K dekohezi dochází v podstatě lokální ztrátou schopnosti materiálu akumulace další energie mikroplastickou deformací.

V bezprostřední podpovrchové vrstvě, v řádu jednotek mikrometrů, intenzita deformace vede téměř k souběžnému plastickému toku se zatěžovaným povrchem. Ve srovnání s charakterem plastického toku, vyvolaném experimentálně, je třeba uvést, že u reálných profilů není tato orientace převažující. Tyto rozdíly lze na základě provedených srovnání považovat za významné a jsou podnětem k dalšímu výzkumu. Lze předpokládat, že se jedná o důsledek rozdílné geometrie kontaktní dvojice. Na základě uvedeného zjištění byl proveden soubor měření pro vyhodnocení závislosti orientace povrchově iniciovaných trhlin a celkové hloubky poškození. Měření bylo provedeno v různých stadií poškození, tzn. u trhlin s různou povrchově

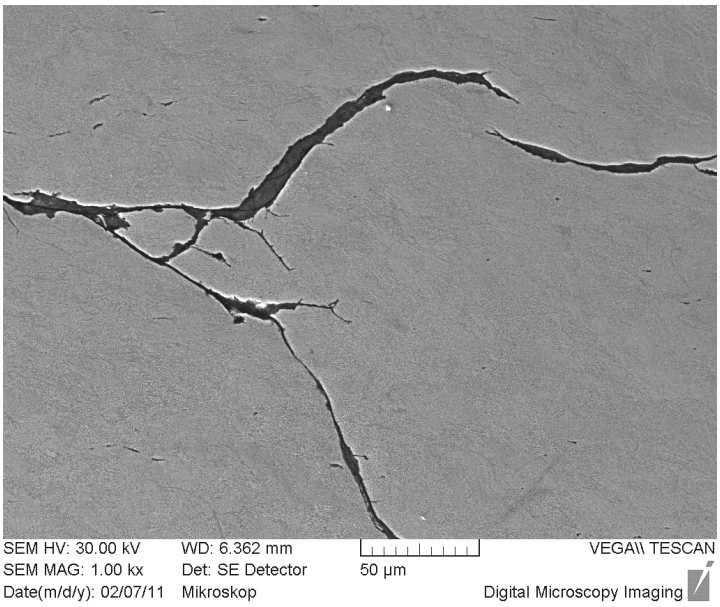
indikovatelnou délkou. Vybrané výsledky provedených měření jsou uvedeny na obr. 23.



Obr.23 – Měření závislosti hloubky poškození a orientace trhlin

Rozvoj trhlin má několik odlišných stadií. V bezprostředně povrchových vrstvách - v dosahu odpovídajících strukturních změn - má rozvoj trhlin zásadní orientaci podle povahy iniciačního mechanismu. V případě intenzivního teplotního zatížení, které vede k překrystalizaci (zakalené vrstvy vlivem prokluzů), podobně i v případě výskytu vrstev po určité „dynamické strukturní destrukci“, je rozvoj alespoň částečně radiální [96]. V případě kontaktně-únavového zatížení bez uvedených extrémních (a v podstatě specifických) vlivů, je rozvoj mikrotrhlin usměrňován orientací povrchového plastického toku oceli.

Další rozvoj je rozhodující mírou ovlivněn dosahem zplastizované vrstvy oceli. Překročení plastické zóny je spojeno s radiálním větvením, které je dále již ovlivněno především „geometrií“ celé soustavy; strukturní vlivy jsou omezené.

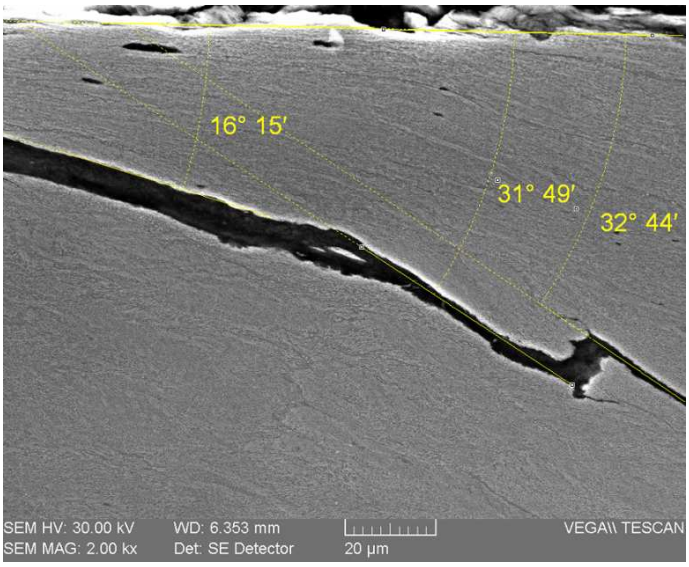


Obr. 24 Charakteristické větvení únavového poškození mimo dosah plastické zóny (zv.1000x)

Z hodnocení vlivu rozdílné intenzity plastické deformace vyplývá její vliv na rozvoj poškození. S rostoucí vzdáleností od povrchu dochází k radiálnímu odklonu plastického toku a s poklesem intenzity plastické deformace tak současně mezilamelární vzdálenost „stoupá“ do hodnot, odpovídajících výchozímu stavu mikrostruktury. V této vrstvě dochází k větvení trhlin (viz obr.24).

Z hlediska bezpečnosti je podstatné, že toto větvení je spojeno nejen se vznikem povrchových šupin a tedy i zvýšeným úbytkem materiálu z kontaktních ploch, ale rovněž také radiálním rozvojem směrem do průřezu kolejového profilu (viz příloha J obr. J1 a J3).

Tato samotná existence trhliny podstatně ovlivňuje další rozvoj deformace. Na čele postupující trhliny vzniká rozhraní nehomogenně rozložené deformace, na níž reaguje další rozvoj trhlin, jejímž důsledkem je vznik deformačních stupňů (viz. obr. 25) v postupující trhlině. V závislosti na hloubce trhliny tak dochází v těchto místech k výše uvedenému větvení nebo změně sklonu dalšího postupu trhliny (viz příloha J obr. J2,J4 a J5).



Obr. 25 – Měření deformačních stupňů trhliny

Vrstvy materiálu, označovány jako „bílé leptatelné vrstvy“ obecně přispívají k porušování v omezené míře. U rozborovaného materiálu byl jejich vliv eliminován abrazí a nerovnoměrným rázovým podélným zatížením. Jejich vznik je spojen s destrukcí původní morfologie karbidické složky a celkovou „přestavbou“ struktury.

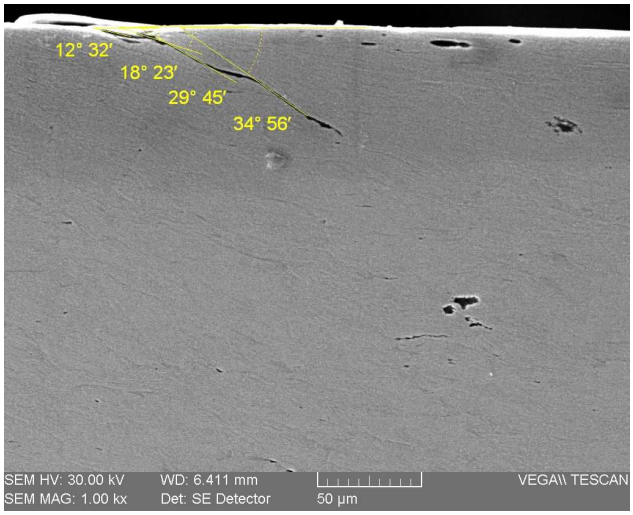
Zjištěná byla tedy rozhodující souvislost s kumulativní dynamickým zpevněním v kontaktní zóně. Byly vymezeny rozhodující parametry degradace materiálu:

- *intenzita plastického zpevnění a její vliv na iniciaci defektů,*
- *rozsah plastické zóny a její vliv na další rozvoj poškození.*

Podstatný vliv na iniciaci provozního poškození má metalurgická jakost materiálu. Jako limitující prvek životnosti se z hlediska tohoto působení prokázal

zejména výskyt netvárných vměstků, které může způsobem ovlivnit průběh degradačního mechanismu. Zjištěný výskyt uvedených inkluzí v povrchových vrstvách vyvolává koncentraci napětí, lokalizaci plastické deformace a následně iniciaci prvních mikroskopických nespojitostí – obr.26. Následkem toho, že etapu iniciace předchází plastické přetvoření okolní matrice, vede další zatížení k rozvoji trhlin ve směru plastického toku.

Vzhledem k tomu, že iniciaci mikrotrhlin předchází intensivní plastické přetvoření matrice, dalším cyklickým zatížením dochází k rozvoji trhlin ve směru plastického toku oceli. Postupem magistrálních trhlin (prakticky souběžně s kontaktní plochou) je izolována povrchová část objemu oceli; dochází k zamezení rozvoje plastické deformace do hloubky a tedy k urychlené ztrátě tažnosti nejvíce zatížených vrstev. Proces vede vedle k limitním změnám mechanických vlastností a současně zpětně k podstatnému zvýšení vlivu vyloučených vměstků v podpovrchové oblasti.



Obr. 26 - Iniciace trhlin v souvislosti s výskytem inkluzí (zv.1000x)

Působení vměstků dle pozorování odpovídá specifickým podmínkám degradace materiálu v kontaktně-únavovém zatížení. Z hlediska možností ovlivnění provozní odolnosti oceli v podmínkách (daných vztahem meze kluzu oceli a modelem reálného zatížení), je důležitá především první fáze únavového poškození. Radiální tlakové zatížení vyvolá trojosou napjatost a smykové napětí s velkými gradiendy. Výsledné namáhání má cyklický charakter; největší tahová napětí působí v určité hloubce pod povrchem pojezdové plochy ve směru s mírným sklonem k povrchu. Proto malé únavové trhliny vznikají na inkluzích a slabých místech struktury, v následující etapě dále se rozvíjejí přednostně k povrchu, kdy směr je řízen podílem smykové složky zatížení. Růst poškození od určité délky a hustoty trhlin je obtížně ovlivnit, proto je rozhodující oddálení inkubační etapy procesu.

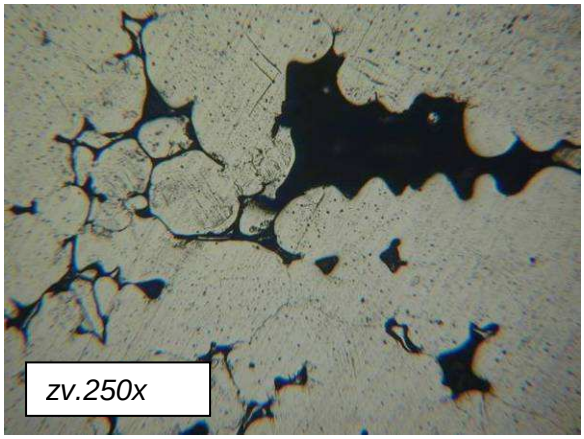
Z toho plyne požadavek na vysokou čistotu oceli, homogenitu - z hlediska odolnosti k rozvoji defektu je vlivná vzdálenost inkluzí (byl pozorován vliv shluků vměstků), která modifikuje rozdělení napětí v kontaktní oblasti.

5.1.2 Austenitická manganová ocel

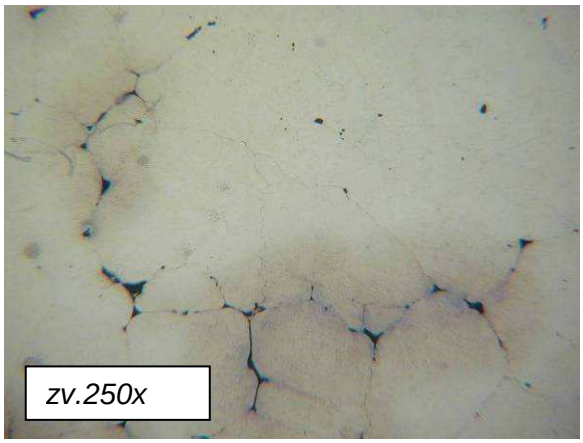
Vzhledem ke specifickým vlastnostem této oceli, především vysoké schopnosti deformačního zpevnění a houževnatosti, vykazuje tato ocel rovněž specifické projevy provozního poškození. V porovnání s perlitickými tvářenými materiály je u těchto ocelí, resp. konkrétních litých profilů, nutno evidovat problémy spojené především s výchozí licí jakostí. Tato problematika je umocněna omezenými možnostmi nedestruktivní kontroly kdy je z důvodu nemožnosti kontroly ultrazvukem používán rentgen.

Současně je ale nutno uvést, že vysoká lomová houževnatost této oceli umožňuje, že kritický rozměr trhliny, jež určuje přípustné limity, je u jinak stejných geometrických a zatěžujících podmínek v porovnání s perlitickými materiály pro tyto způsoby použití podstatně vyšší. K provoznímu poškozování ve spojení s tímto problémem dochází v případech:

- zvýšeného rozsahu licích vad v kritických průřezech (viz. obr. 27)
- nebo výskytu mikrostaženin v kombinaci se snížením kohezní pevnosti hranic zrn, tj. především v souvislosti s výskytem karbidických fází nebo segregací po hranicích zrn (viz. obr. 28)



Obr. 27– Rozsáhlé staženiny v hlavě srdc.



0br. 28 – Řediny austenitické mangan. oceli propojené trhlinami vlivem zatížení

Materiálové analýzy degradace v trati se zaměřily na studium mechanismu „standardního“ opotřebení, tzn. kromě uvedených vlivů, spadající na vrub metalurgie oceli.

K dispozici pro materiálové analýzy byly části srdcovek, kde vzhledem k rozdílům v geometrii lze předpokládat rozdíly v charakteru zatížení i odezvy materiálu. Pro metalografické rozbory byla vybrána oblast s vizuálně rozlišitelným poškozením povrchu (viz. obr. 29). Hodnocený řez byl odebrán z části srdcovky, pojížděné oboustranně, s různou intenzitou zatížení. Strukturní rozbor sledoval rozdíly materiálové odezvy v pásmech dle obr. 29 v oblastech „A, B a C“.

Obr. 29 – Analyzovaný řez srdcovky z austenitické manganové oceli (poškození povrchu)

Metalograficky byly evidovány typické efekty, spojené s dynamickým zatížením austenické manganové oceli – tzn. dislokační systémy s různou hustotou po zatěžovaném profilu. Rozvoj deformace a tím i odpovídající zpevnění do hloubky materiálu jsou podstatně ovlivněny velikostí austenitického zrna. Obr. 28 ukazuje postup deformace v reakci na různou krystalografickou orientaci zrna. Ani v oblastech s nejvýraznějším deformačním přetvořením nedošlo k dekohezi zrn, což je důkazem dostatečné metalurgické jakosti hodnoceného materiálu. Pokud došlo ke kolizi plastického pole a netvárných vměstků, byly iniciovány únavové trhliny. Tyto trhliny v iniciačním stadiu mají rovněž krystalografickou závislost – např. iniciace mikrotrhliny u nitridu na obr. 30. Rozvinutější trhliny, iniciované křehkými inkluzemy byly zjištěny pouze v etapě intenzivnější plastizace a zpevnění, např. obr. K1 přílohy K, kdy došlo k rozvoji únavové trhliny v hloubce cca 1mm.

Obr. 30 – Postup deformace v závislosti na různých krystalografických orientací zrna

Pozornost byla zaměřena také na zjištění provozem vyvolaných strukturních změn a porovnání mechanismu poškození s experimentálně vyvolanými procesy v materiálu. Zjištěny byly rozdíly v intenzitě skluzových systémů a hloubce metalograficky viditelného dosahu plasticity v závislosti na oblasti zatěžovaného profilu, tzn. na odpovídajících rozdílech provozního zatížení. Výběr z výsledků metalografického hodnocení je uveden v příloze K (obr. K1, K2, K3 reprezentují oblast maximálního deformačního přetvoření, konkrétně v dosahu až cca 4mm). Oproti tomu v oblasti méně pojížděné hrany (příloha K – obr. K4 a K5) byl vyvolán dosah dislokační struktury do hloubky cca 1,5mm. K iniciaci povrchových trhlin, jako sledovaného mezního stavu, došlo dvěma rozdílnými mechanismy:

- iniciací povrchových mikrotrhlin v souladu s mechanismem únavového procesu,
- vytvoření a vydrolování vrstvy o podstatně vyšší tvrdosti .

První uvedený proces je podmíněn dostatečnou pohyblivostí dislokací směrem od zatěžovaného povrchu. Nejvýraznější vliv, který kromě strukturních parametrů (diskutovaný rozměr austenitického zrna, výchozí stav dislokační substruktury apod.) rozhodují o uplatnění jednoho z uvedených mechanismů je rychlost zatěžování. Větší rychlost omezuje rozvoj deformace a vede k izolaci a kumulaci deformace v bezprostřední podpovrchové vrstvě. Rázové složky zatížení podporují tento proces v této souvislosti lze uvažovat i o specifickém vlivu zpevňování výbuchem, jež ale nebylo předmětem tohoto výzkumu. Ve druhém případě tedy dochází ke vzniku vrstvy s evidentně omezenou plasticitou. Krátké příčné trhliny jsou omezeny tloušťkou této vrstvy. Dále se rozvíjejí již podle „pravidel“ únavového procesu, tzn. že mechanismus není spojen s rizikem urychleného radiálního rozvoje trhlin. Výjimkou jsou ovšem situace, kdy se trhliny dále rozvíjí pod vlivem nečistot apod. (viz. obr. 31). Podrobněji jsou oba mechanismy dokumentovány v příloze K – obr. K7 a K8.

Obr. 31 – Rozdíl struktury povrchové vrstvy –
- tvorba šupin vs. plynulý rozvoj deformace do profilu (zv. 250x)

Z výsledků rozborů provozního poškozování vyplývá, že další práce nutno orientovat na hledání vazby vybraných provozních parametrů (charakter zatížení, skluzové poměry, apod.) a materiálové odezvy. Přitom vývoj již identifikovaných mechanismů lze korektně sledovat především za podpory experimentu, podepřeného průběžným měřením kupř. tvrdosti kontaktních ploch.

Z provedených hodnocení provozně vyvolaných poškození souhrnně vyplývá:

- vliv mezilamelární vzdálenosti perlitické oceli rovněž na orientaci iniciovaných trhlin,
- byl experimentálně vyvolán odpovídající degradační mechanismus, kdy fáze iniciačního poškození má odpovídající strukturní souvislosti.

Výsledky rozborů přinesly o údaje o typickém rozsahu a charakteru výše diskutovaných parametrů. Tyto výsledky tak poskytly nutný základ pro navazující experimentální práce.

5.2 Statistické vyhodnocení údajů z provozního sledování

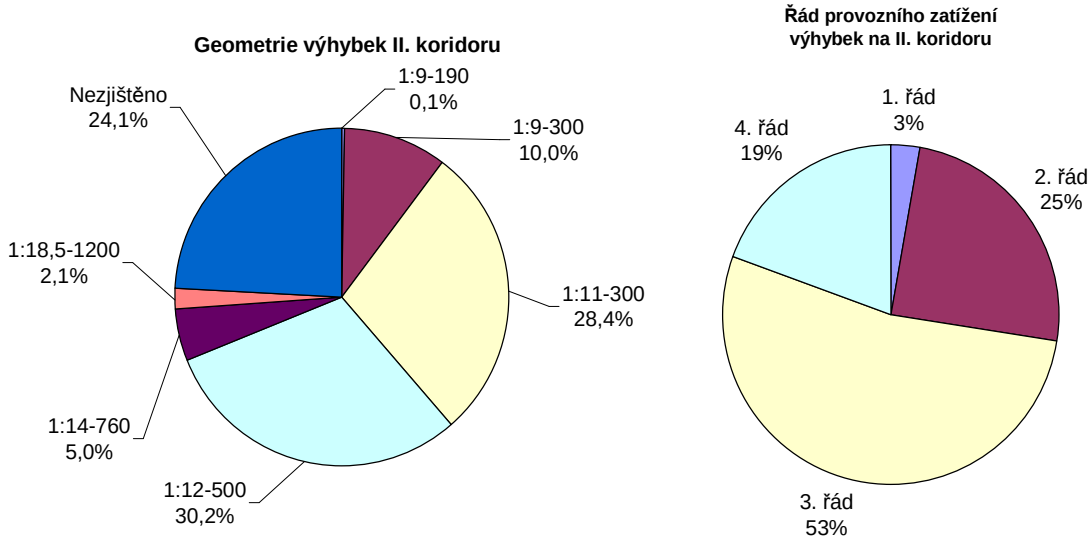
Proveden byl monitoring stavu a míry opotřebení u vybraných součástí železničních výhybek v trati SŽDC dle [62], pomocí ocelového pravítka a klínku. Tato data jsou ukládána do interního systému DT „Magic“ (tento systém tato data nijak nezpracovává), z něhož byly vybrány a vyhodnoceny srdcovky (v šířce hrotu 40mm) první a druhé hlavní koleje v II. tranzitním koridoru v ČR (trať 305 „Bohumín – Přerov“, trať 316 „Přerov – Břeclav“, trať 309 „Přerov – Česká Třebová“, viz. příloha C obr. C3).

Vybraná oblast obsahuje celkem 698 železničních výhybek v 47 stanicích na 318km dlouhé železniční trati (stanice Bohumín-Vrbice nebyla z důvodu nejednoznačných podkladů zahrnuta). Dle specifického znaku byly tyto srdcovky roztříděny dle:

a) geometrie výhybky
b) řádu zatížení koleje v níž je výhybka vložena
c) typu konstrukce srdcovky dle dodavatele
d) materiálu srdcovky

5.2.1 Popis základního souboru

U všech výhybek byl zjištěn „řád zatížení koleje“ (viz. tab. 9) a u 530 výhybek byla zjištěna „geometrie výhybky“ (viz. tab. 8). Počet výhybek pro roztřídění dle „typu konstrukce srdcovky dle dodavatele“ a dle typu „materiálu srdcovky“ nebyl zjištěn. Ze získaných informací plyne, že více než polovina výhybek (53%) je umístěna v 3.řádu zatížení koleje a že nejpoužívanějšími výhybkami dle geometrie jsou 1:12-500 a 1:11-300 (viz. obr. 32).



Obr.32 – Rozdělení srdcovek základního souboru dle řádu zatížení a geometrie výhybky

Geometrie	1:9-190	1:9-300	1:11-300	1:12-500	1:14-760	1:18,5-1200	Nezjištěno
Počet	1	70	198	211	35	15	168

Tab. 8 – Rozdělení srdcovek základního souboru dle geometrie

Řád zatížení koleje	1	2	3	4	5	6
Počet	19	173	371	135	0	0

Tab. 9 – Rozdělení srdcovek základního souboru dle řádu zatížení koleje

5.2.2 Popis výběrového souboru

Z celkového počtu 698 výhybek na první a druhé koleji II. tranzitního koridoru byly získány hodnoty ze 47 výhybek. Dle specifického znaku byly tyto srdcovky roztříděny:

Geometrie	1:9-300	1:11-300	1:12-500	1:14-760
Počet	1	22	22	2

Tab. 10 – Rozdělení srdcovek výběrového souboru dle geometrie

Řád	1	2	3
Počet	2	22	23

Tab. 11 – Rozdělení srdcovek výběrového souboru dle řádu zatížení koleje

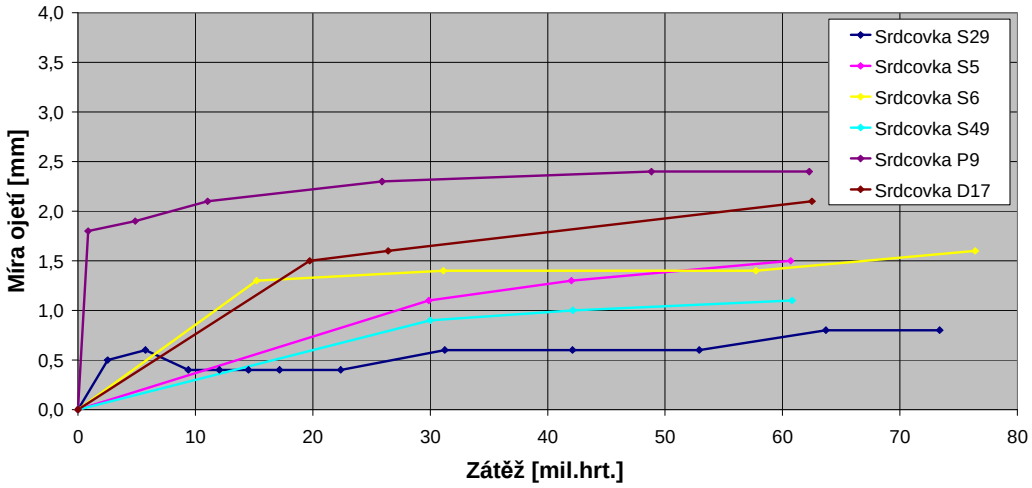
Konstrukce dle dodavatele	U1	U2	C	N
Počet	4	26	8	9

Tab. 12 – Rozdělení srdcovek výběrového souboru dle typu konstrukce srdcovky dle dodavatele

Materiál	13-Mn-B	Lo17CrNiMo
Počet	43	4

Tab. 13 – Rozdělení srdcovek výběrového souboru dle materiálu srdcovky

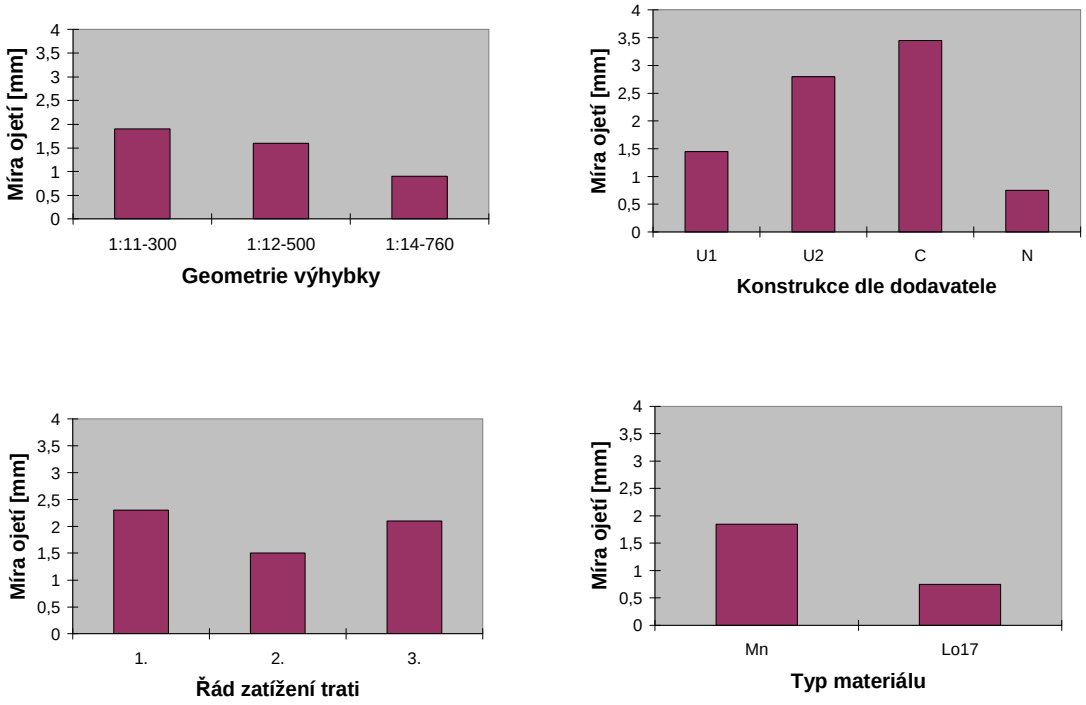
Pouze 6 srdcovek výběrového souboru (viz. obr. 33) bylo vystaveno většímu celkovému zatížení než 60 mil. hrubých tun. Pro toto zatížení 60 mil. hrubých tun bylo zpracováno statistické vyhodnocení a zjištěno minimum (0,75mm), maximum (2,4mm), průměr (1,53mm) a medián (1,45mm).



Obr. 33 – Průběh míry ojetí (degradace) u srdcovek se zatížením větším než 60 mil. hrt.

Byl vyhodnocen výběrový soubor (viz. obr. 34) pro odhad zátěže 60 mil. hrubých tun se zvolenou lineární regresí. Lze konstatovat, že u srdcovky na 1. a 2. koleji II. tranzitního koridoru dosahuje míra průměrného ojetí 1,7mm. Nejlepších výsledků (ojetí 0,75mm) dosahují srdcovky konstrukce U1 a materiálu Lo17. V rámci srdcovek z materiálu 13-Mn-B lze konstatovat, že lepších než průměrných hodnot dosahují srdcovky konstrukce U (ojetí 1,45mm).

Nejnižší negativní vliv byl zjištěn u 2.řádu zatížení koleje, kde ojetí statisticky dosahuje hodnot 1,5mm Ze zvolené lineární závislosti nebyla při kontrole korelačního koeficientu ověřena platnost jen u geometrie výhybky 1:9-300 a dále byl proveden intervalový odhad pro míru ojetí po projetí 30 mil. hrubých tun ($1{,}26 \pm 0{,}77$mm).



Obr. 34 – Míry ojetí (degradace) u srdcovek při odhadovaném zatížení 60 mil. hrt

5.2.3 Výpočet pro předpoklad logaritmického průběhu ojíždění

Byl proveden odhad parametrů regresní funkce dle vzorce:

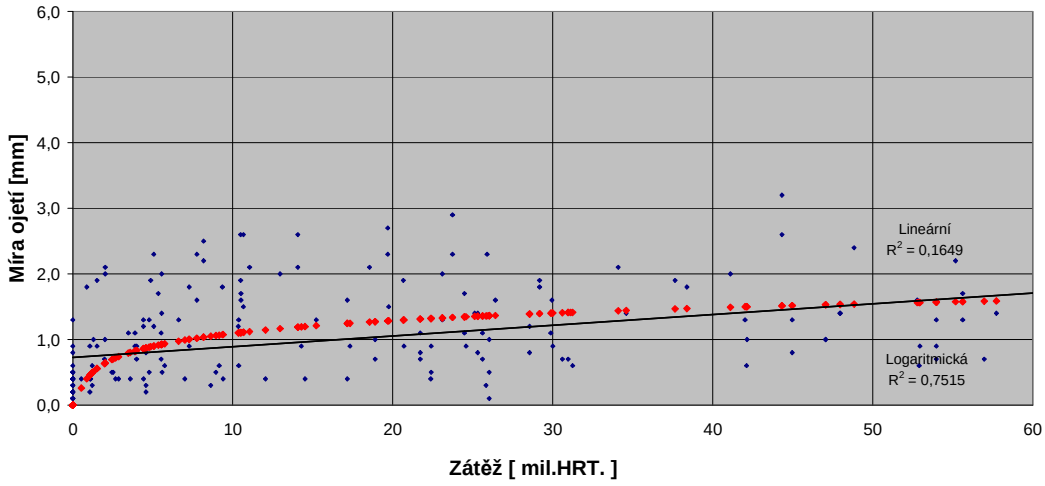
$$b = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^{n} \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^{n} y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln^2 x_i - \left(\sum_{i=1}^{n} \ln x_i \right)^2} \tag{5}$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} \ln^2 x_i \cdot \sum_{i=1}^{n} y_i - \sum_{i=1}^{n} \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^{n} (\ln x_i) \cdot y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln^2 x_i - \left(\sum_{i=1}^{n} \ln x_i \right)^2} \tag{6}$$

$$R^2 = \frac{S_t}{S_y} \tag{7}$$

A definován 95-ti procentní pás spolehlivosti po 60 mil. hrt. dle vzorce:

$$I_{0,95} = (a + b \cdot \ln x) \pm s \cdot t_{\alpha,n-2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\left(\ln x - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} \ln^2 x_i - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} \ln x_i\right)^2}} \qquad (8)$$



Obr. 35 – Průběh ojetí (degradace) u srdcovek s lineárním a logaritmickým předpokladem

Obecná srdcovka	Odhad ojetí po 60 mil. hrt. [mm]	R^2
Lineární průběh ojíždění	1,7	0,1649
Logaritmický průběh ojíždění	1,599	0,7515

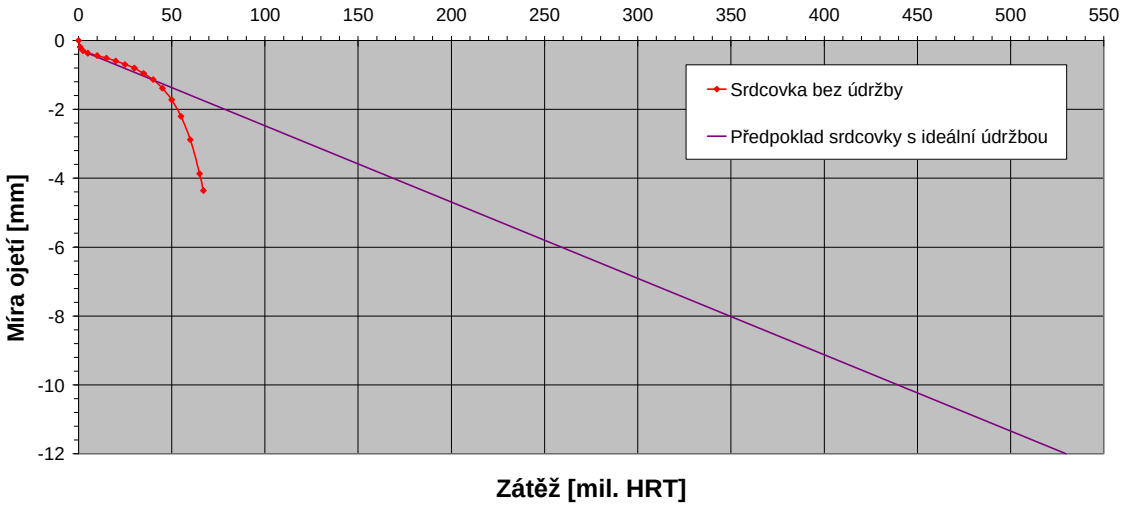
Tab. 14 – Porovnání předpokladu lineárního a logaritmického průběhu ojíždění

Po vyhodnocení ojetí srdcovek v šířce hrotu 40mm, včetně rozdělení podle jejich specifického znaku, v závislosti na projeté zátěži, byl proveden intervalový odhad pro ojetí po 30 mil. hrt. (1,26 ± 0,77mm) a byl proveden výpočet pro předpoklad logaritmického průběhu ojíždění. Lze konstatovat, že předpoklad logaritmického (odhad ojetí je po 60 mil. hrt. s 95% jistotou 1,599 ± 0,127mm – viz. obr. 35) průběhu ojíždění je přesnější než-li předpoklad lineárního průběhu ojíždění, kdy odhad ojetí je po 60 mil. hrt. 1,7mm. Z výpočtu srdcovek, jež už dosáhly zátěže 60 mil. hrt. bylo vypočteno průměrné ojetí 1,53mm.

5.3 Vyhodnocení degradace ze zkušebního okruhu

V posledních 10ti letech bylo provedeno několik zkoušek prototypových srdcovek na zkušebním železničním okruhu VNIIŽT pro zjištění průběhu degradace

těchto vybraných železničních srdcovek, zpravidla s novými prvky jako nový materiál či konstrukce. Byla zachycena obdobná charakteristika degradace (svislého ojetí). Tato charakteristika je typická svými třemi fázemi - tzv. fází záběhu, stabilní práce a fáze výběhu (popř. konečnou fází práce).



Obr. 36 – Průběh degradace (svislé ojetí) u prototypové srdcovky na VNIŽ

„Fáze záběhu“ je charakteristická svým exponenciálním či logaritmickým průběhem, jež je vyvolán intenzivní plastickou deformací. Dochází k tvarování trajektorie horních ploch srdcovek dle projíždějících neideálních (reálných) okolků. Srdcovka je jediná součást železničního svršku, jež se profil kola dotýká v celé jeho šířce a proto je nejvíce pod vlivem jeho tvaru a dodržení předepsaných rozměrů.

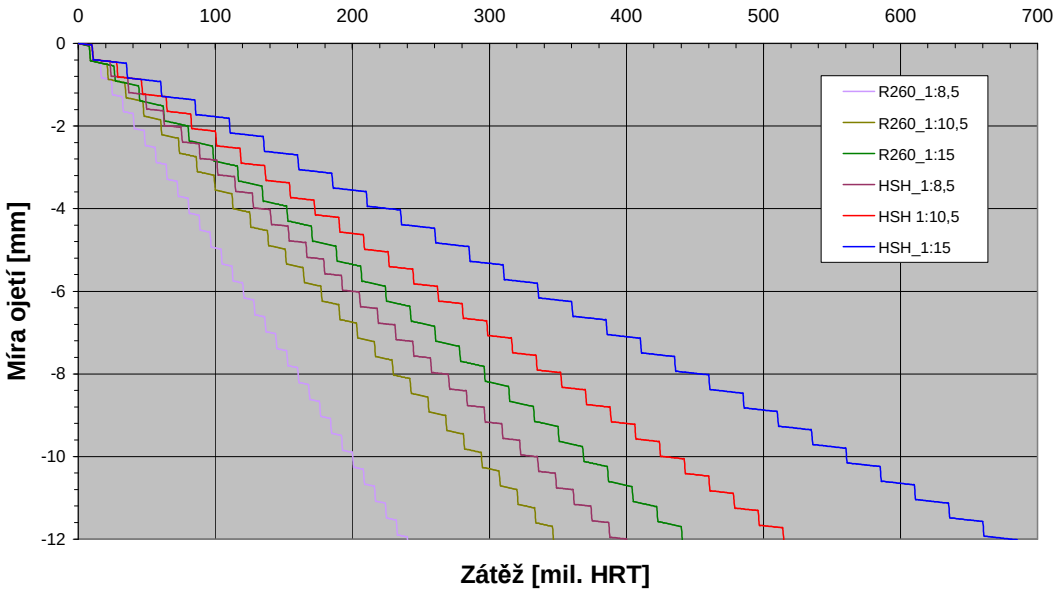
Fáze „Stabilní práce“ má lineární průběh a představuje charakteristický průběh deformace (svislé ojetí) během životnosti této součásti s možností jejího prodloužení vhodnou údržbou (broušením). Její délka a průběh je dán především základními mechanickými vlastnostmi materiálu a geometrií srdcovky (čím je větší rádius do odbočky, tím je větší délka přechodové oblasti při přejezdu okolku z křídlové kolejnice na hrot srdcovky), zatížením na nápravu kolejových vozidel a jejich rychlostí.

Z uvedeného příkladu (viz. obr. 36) by při ideálním způsobu ojíždění (tzv. magickém – dle [4]) byla životnost na hlavních tratích (ojetí do 6mm) cca 260 mil. hrt. Na takto definovanou životnost má ovšem také vliv opotřebení během předcházející fáze, tzn. čím větší by bylo opotřebení během fáze záběhu tím kratší a menší je fáze stabilní práce a možnosti jejího ovlivnění.

„Fáze výběhu“ je typická rozvojem defektoskopických vad a svým mocninným průběhem (dochází k vyčerpání plasticity). Lze provádět opravy a zvyšovat životnost pomocí navařování.

5.4 Zkušenosti s degradací výhybek

Kromě vyhodnocení výsledků ze zkušebního okruhu a zpracování vybraných dat DT k problematice degradace srdcovek z části tratě SŽDC byly zjištěny i informace ze zkušeností a předpisů ARTC (Australian Rail Track Corporation). Je třeba konstatovat, že ARTC má zkušenosti s údržbou cca 4x větší délky železniční trati (viz. příloha B) než SŽDC, ale na níž jsou použity jiné profily než u SŽDC, po nichž kolejová vozidla jezdí nižšími rychlostmi se zpravidla vyšší zátěží na nápravu a také vyšší roční zátěží.



Obr.37 – Degradace (svislé ojetí) srdcovek tratí dle požadavků na údržbu ARTC

Zjišťování stavu kolejnic (nejpoužívanější profil kolejnice je tzv. „60kg rail“ – viz příloha L) měřením, je dle [55] prováděno na 200m délky s místy měření vzdálených od sebe 0,5m s odchylkou od průměru max. 0,2mm. Při broušení materiálu z hlav kolejnic je odebíráno min. 0,2mm. U srdcovek je broušením také minimálně odebíráno 0,2mm, ale obvykle dochází k odběru min. 0,4 až 0,5mm. Harmonogram broušení srdcovek je závislý na typu kategorie srdcovky - dle geometrie (1:8,25; 1:10,5; 1:15 nebo vyšší) a materiálu (standardní odpovídající R260 nebo HSH) [54].

Z předpokladu svislého ojetí 0,075mm za 10 mil. hrt. a harmonogramu broušení byl vytvořen graf odhadu degradace srdcovek v tratích ARTC (viz. obr. 37). Předpokládaná průměrná životnost na hlavních tratích (ojetí do 6mm) těchto 6ti variant je cca 220 mil. hrt. s minimem 121 a maximem 336 mil. hrt. v závislosti především na geometrii [71]. Ze zkušeností z USA byly získány odhady životnosti kolejnic dle poloměrů oblouků v místech jejich vložení (viz. tab. 15), jež lze předpokládat také u jazyků v oblouku ve výhybkových konstrukcí.

Poloměr oblouku koleje [m]	∞	1750	875	580	440	350	290	250	220	190	175
Životnost [mil.hrt.]	1460	1050	640	540	510	440	390	380	370	350	330

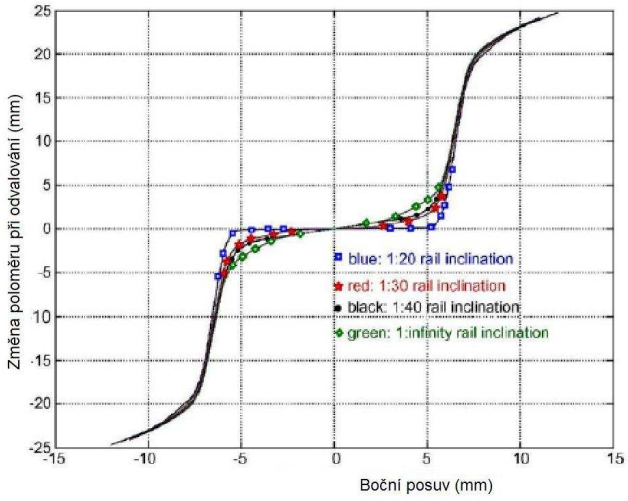
Tab. 15 – Zkušenosti z USA k životnosti kolejnic dle jejich poloměru oblouku [76]

Dále bylo zjištěno, že u švýcarských drah byla provedena kalkulace životnosti železničních výhybek a vyčíslena na 13,8 let s počátkem degradace po 3 letech [76].

6. EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM DEGRADACE

Jak již bylo uvedeno, degradace součástí železniční výhybky je výrazně ovlivňována mnoha parametry v kontaktu kolo-kolejnice. Co se týče experimentálních analýz, je jedním z klíčových problémů vhodná geometrie kontaktu, konkrétně poměr vůči reálným geometrickým parametrům, jež je závislý na použitém profilu kolejnice (viz. příloha L, tab. L1), jízdního profilu železničního kola a míry jejich ojetí (viz. příloha D, obr. D1). V přístupu k evidenci vlivu geometrie se zásadně liší aktuálně používané principy experimentálního hodnocení. Při řešení této problematiky bylo u různých, v zahraničí prezentovaných experimentálních metodik, dosaženo různé míry přiblížení k reálným podmínkám. Typy a vybrané srovnávací technické parametry experimentálních zařízení, simulujících kontakt kolo-kolejnice jsou prezentovány v příloze G, tab. G1.

Experimentálně vyvolaný degradační mechanismus a také rozsah vyvolaného poškozování je v rámci experimentálních činností ovlivněn (kromě materiálů těchto součástí) především působícím zatížením železničního kola (závislého na zatížení na nápravu z tab. 4 v kapitole 1.3), jeho jmenovitým průměrem a poloměrem plochy železničního profilu. Jmenovitý průměr železničních kol je např. u typu „Bonatrans 29“ 813-920mm či typu „Bonatrans BBS“ 730-920mm. Časté jsou také hodnoty u jiných výrobců např. 1100, 1150, 1170 či 1250mm. Jízdní obrys kol, jež se použije k výpočtu kontaktního napětí, může být např. typu ZI-3, ZI-4, 1/40, S1002, EPS, UIC ORE válcové či UIC ORE středně opotřebené. Kromě toho, že se hodnoty poloměrů a tvarů jízdních profilů kol a kolejnic v průběhu používání mění svým opotřebením mohou být navíc opatřovány cílenou úpravou (broušením) jiným profilem, např. u profilu kolejnice 60E1 jsou opatřovány tzv. lots 136. Kolejnice mohou být na pražci ve výhybce také uloženy s různým úklonem, tzn. že i když jde o stejný profil kolejnice, dochází k rozdílným kontaktním podmínkám v systému kolo-kolejnice. Změna poloměru v místě kontaktu tak při odvalování železničního kola způsobuje změnu napětí - případ závislosti pro jízdní obrys S1002, kolejnici 60E1, rozchod 1435 a průměr kola 920mm je na obr. 38.



Obr. 38 – Změna poloměru při odvalování pro různé úhly úklonu kolejnice [92]

Charakteristické jsou u železničních tratí případy :

- bez úklonu (např. ČR či Slovensko)
- 1:20 (např. Francie, Norsko či Austrálie)
- 1:30 (např. Švédsko)
- 1:40 (např. Německo či Dánsko)

Výpočet kontaktního normálového napětí je víceparametrová problematika; zavedené metody výpočtu se liší rozsahem evidovaných podmínek a vlivů (např. [72],[73],[93],[94] či [17]). Jako orientační vztah lze použít:

$$p_{\max} = 1{,}5.\frac{Q}{\pi.a.b} \tag{9}$$

$$a = \alpha \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot Q \cdot \left(1-\nu^2\right)}{E \cdot \left(\frac{1}{r_d}+\frac{1}{r_k}\right)}} \tag{10}$$

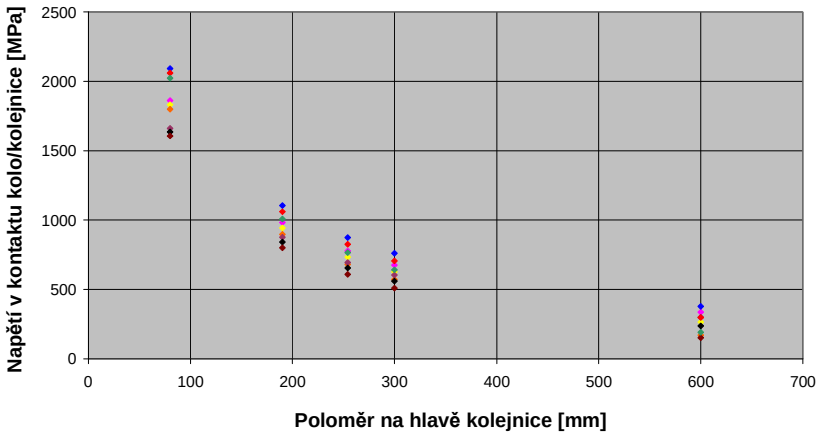
$$b = \beta \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot Q \cdot \left(1-\nu^2\right)}{E \cdot \left(\frac{1}{r_d}+\frac{1}{r_k}\right)}} \tag{11}$$

kde: p_{MAX} *– kontaktní normálové napětí* *[MPa]*
Q *– svislá kolová síla* *[kN]*
a, b *– velikost poloos dotykové plošky* *[mm]*
α, β *– tabelárně udávané konstanty* *[-]*
ν *- Poissonovo číslo* *[-]*
E *– modul pružnosti* *[MPa]*
r_d, r_k *– poloměr kola a kolejnice* *[mm]*

Po dosazení hodnot, odpovídajících vybraným parametrům provozu:

- poloměrů hlav profilů železničních kolejnic (dle přílohy L obr. L2; tzn. 80, 190, 254, 300 a 600mm),
- za předpokladu pojíždění železničními koly s jmenovitými průměry 920, 1050 a 1250mm,
- s jejich charakteristickým zatížením 80, 112,5 a 160kN,
- a tabelárně udávaných konstant α = 1,892 a β = 0,6114,

bylo dosaženo různých hodnot kontaktního napětí (viz. obr. 39), jež nabývalo hodnot 152 – 2024MPa. Tento rozsah odpovídá i hodnotám (v závislosti na vstupních parametrech) cca 600 – 2 566MPa udávaných v aktuálních pracích, zabývajících se definováním silových poměrů a odezvami vybraných materiálů v kontaktu kolo-kolejnice jako např. [61], [63], [64], [67], [68] či [75].



Obr. 39 – Napětí v kontaktu kolo kolejnice pro vybrané parametry

6.1 Návrh parametrů experimentálního zatěžování

Z důvodu, že dílčím cílem disertační práce byl návrh parametrů pro zatěžování na experimentálním zařízení, a ne simulace a detailní rozbor jednoho zvoleného kontaktu (jako např. [65]), pro zjištění degradace kolejnic a vybraných pojížděných částí výhybky, byl zvolen pro způsob zatížení vztah (9) až (11). Velikost a průběh zatížení, jež působí na výhybku během průjezdu železničního vozidla se liší od zatížení ve volné trati a proto za hodnoty sil, jež působí na vybrané části výhybky byly zvoleny výsledky dle [44], jež řádově odpovídají [64] a jsou také z hlediska vstupních parametrů nejkomplexnější a vycházející z podmínek na tratích v ČR. Tyto hodnoty sil, výsledné kontaktní napětí a parametry elipsy kontaktní plochy uvádí tab. 16.

Vertikální zatížení na výhybce			**Kontaktní plocha**			**Poznámka**
Oblast	**Síla [kN]**	**Rádius [mm]**	**a [mm]**	**b [mm]**	**P_{MAX} [MPa]**	
Kolejnice	112,5	300	15,7	5,1	675,5	90 km/h + ideální stav
	152,3	300	17,4	5,6	747,3	200 km/h + nerovnost
Jazyk	112,5	300	15,7	5,1	675,5	90 km/h + ideální stav
	141,6	300	16,9	5,5	727,3	200 km/h + nerovnost
Srdcovka	112,5	300	15,7	5,1	675,5	90 km/h + nerovnost
		80	10,2	3	2009	
	254,1	300	20,6	6,7	886,3	120 km/h + nerovnost
		80	12,4	4	2441,5	
	321,2	300	22,3	7,2	958,3	160km/h + nerovnost
		80	13,4	4,3	2639,9	
	421,5	300	24,4	7,9	1049	200km/h + nerovnost
		80	14,7	4,7	2890,2	

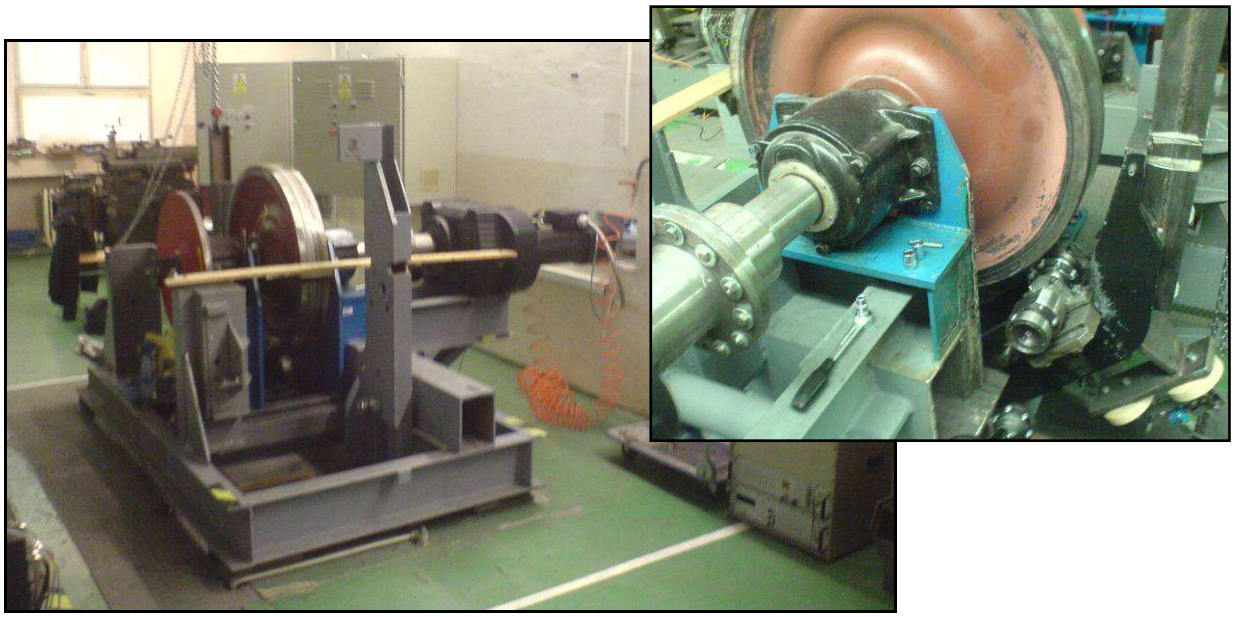
Tab.16 – Velikost kontaktní plochy a Hertzova tlaku mezi kolem a částmi železniční výhybky

Z vypočtených hodnot provozního kontaktního napětí plyne požadavek na kontaktní zatížení při experimentálním zatěžování, pro vyvozené hodnoty mezi 675,5 až 2890,2MPa.

Testování kontaktně – únavové odolnosti vybrané série materiálů bylo realizováno na specielním zařízení, vyvinutém v laboratořích Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice (viz. obr. 40). Zařízení umožňuje vyvodit volitelné hodnoty relativního podélného nebo příčného skluzu; parametry zařízení:

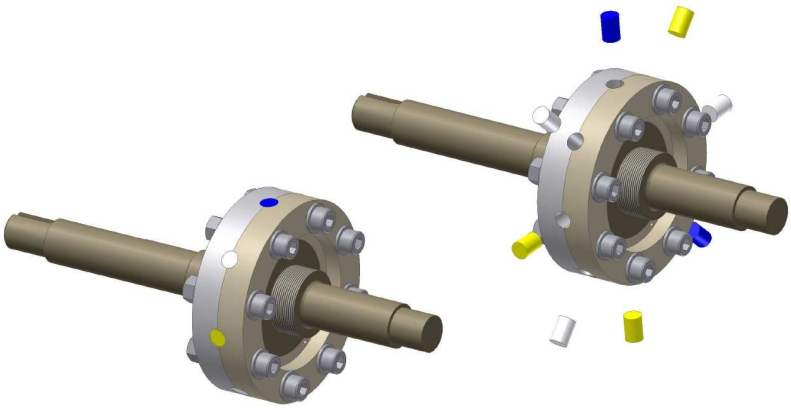
převod velké převodovky	1:50
převod kolo/nosič	1:6,77
průměr kola	920mm
průměr nosiče vzorků	136mm
kroutící moment motoru pro kolo	95Nm
kroutící moment motoru pro nosič vzorků	31Nm
otáčky motoru	3 000min^{-1}
otáčky malého motoru	2 433min^{-1}

Princip zařízení spočívá v odvalování železničního kola o průměru 920mm po ploše kotouče (nosiče vzorků) o průměru 136mm. Hodnota radiální síly byla stanovena teoreticky s ohledem na poměr rádiusů v kontaktu na základě Hertzovy teorie pro styk dvou válcových ploch. Odvalovací zkoušky byly provedeny při zabudování osmi vzorků válcového tvaru, o průměru 10 či 12mm a délek 15 či 17mm, po obvodu nosiče vzorků (viz. obr. 41). Pro zkoušky byly navrženy maximální hodnoty skluzu cca 2% a čelo nosiče vzorků bylo opatřeno zaoblením R300 (dle kolejnice 60E1).



Obr. 40 – Zkušební zařízení DFJP pro simulaci podmínek kolo-kolejnice

Způsob umístění a možnosti vyjímání zkušebních vzorků nosiče vzorků je znázorněn na obr. 41.



Obr. 41 – Způsob umístění a vyjímání vzorků z nosiče vzorků

Nosič vzorků umožňuje umístění vzorků z různých materiálů a jejich vystavení stejným zatěžovacím podmínkám pro možnost jejich vzájemného porovnání. Simulovány byly režimy zatížení, rozdílné především v podílu podélného skluzu a radiálního zatížení.

Vzájemný vztah vybraných provozních parametrů oproti experimentálním parametrům je zobracen v tab.17. Míra, do jaké bylo simulováno reálné odvalování železničního kola po kolejnici, vyplývá zejména z verifikace výsledků analýz experimentálně vyvolaných vlivů porovnáním s výsledky hodnocení reálného provozního poškození.

Reálný stav: Kolo-pojížděná součást výhybky		**Stand DFJP: Kolo-nosič vzorků**	
Průměr kola [mm]		**Průměr kola [mm]**	
920 - 1 250		920	
Rádius hlavy kolejnice [mm]		**Rádius čela nosiče [mm]**	
80 - 300		300	
Síla [kN]		**Síla [kN]**	
112,5 – 421,5		5-8	
Kont. tlak [MPa]		**Kont. tlak [MPa]**	
676 – 2890		974 - 1139,2	
Relativní skluz [%]		**Skluz [%]**	
2		0-2	

Tab. 17 – Srovnání parametrů v kontaktu kolo-kolejnice a kolo-nosič vzorků

Součástí prací byla také modifikace tohoto zkušebního zařízení. V průběhu experimentálních prací, v návaznosti na výsledky každé ukončené série testů a

hodnocení, byly provedeny potřebné konstrukční úpravy (výrobní výkresová dokumentace je součástí přílohy M). Jednalo se kupř. o úpravy pro zvýšení tuhosti nosiče vzorků, rozměry vzorků byly přizpůsobeny zjištěné tendenci rozšiřování kontaktní stopy vlivem opotřebení povrchu apod.

6.2 Metodika vyhodnocení

Experimentální práce byly rozčleněny do 4 navazujících sérií experimentů, v nichž se za různých zátěžových podmínek testovaly sady vzorků celkem 4 různých jakostí materiálů srdcovek. Tato část experimentálních prací zahrnula 3 dílčí úkoly:

- výzkum mechanismu poškozování v závislosti na různých poměrech zatížení;
- sledování jednotlivých etap degradace povrchových vrstev (tzn. časové závislosti procesu poškozování);
- testování kontaktně únavové odolnosti odlišných materiálů částí železniční výhybky.

Metodika testování byla navržena tak, aby umožnila sledování a zaznamenání rozvoje kontaktního poškození v čase. V rámci jedné zkoušky bylo testováno vždy současně 8 vzorků. Vývoj této metodiky testování kontaktně–únavových vlastností materiálů byl nejdříve zaměřen na:

- ověření rozšířených možností regulace a rozsahu podélného skluzu;
- testování způsobu evidence rozvoje abrazivního opotřebení v čase.

Jednalo se o dvě složky provozního zatížení, jejichž poměr byl zásadní pro další rozvoj poškození, tzn. i pro konkrétní parametry životnosti materiálů kolejnic či součástí železniční výhybky. Abrazivně vyvolané úbytky materiálu z kontaktních ploch mají určitý „samočistící“ efekt, kdy dochází ke spontánnímu odstraňování vrstvy, degradované dynamickým zpevněním. Podmínkou pro řádné hodnocení odolnosti materiálu ve zvolených podmínkách zatížení je možnost evidence doprovodných strukturních změn ve zvolených časových intervalech. V této souvislosti byl pro ověření navržené metodiky testování do zkoušek zařazen austenitický materiál, který je specifický právě vysokou citlivostí na poměr dynamické vs. abrazivní složky zatížení. Abrazivní opotřebení bylo evidováno hmotnostními úbytky v časových intervalech současně při měření povrchového zpevnění. Ve zvolených intervalech byly vzorky podrobeny strukturním analýzám a bylo provedeno vyhodnocení míry dosahu zpevnění měřením mikrotvrdosti. Tento postup vychází ze zkušeností s řešením předchozích prací na tomto experimentálním zařízení (viz. [95] a [96]).

S ohledem na míru intenzity zpevňování těchto typů materiálů bylo obtížné optimálně nastavit mechanické parametry tepelného opracování použitého nosiče. Experiment byl proto proveden ve dvou režimech, kdy byl současně testován vliv

zvýšení normálovému zatížení při daném podílu podélného skluzu v iniciačním stadiu zpevňování. Byly provedeny sady zkoušek:

- s nižší tvrdostí nosiče pro test výchozích hodnot zpevňování austenitické oceli;

- s vyšší tvrdostí nosiče pro dlouhodobější testy.

Průběžné měření povrchové tvrdosti bylo prováděno přenosným tvrdoměrem Equotip 2 v každém intervalu měření ve třech bodech u všech vzorků (tzn. okraj-střed-okraj vzorku) tak, aby byla zachycena závislost rozvoje kontaktní plochy během zatěžování. Vyhodnocení bylo provedeno ze středních hodnot pro každou danou etapu měření a vyhodnocení vedlo k několika poznatkům ohledně metodiky vyhodnocení:

- základní tendence zpevnění je lépe vyjádřena při evidenci postupného „záběhu“ kontaktní ploch – tzn. předpokladu střední hodnoty po šířce plošky;

- hodnocení na stejné odvalovací kružnici podstatně lépe eviduje procesy spojené s poškozováním kontaktní plochy, jež ovlivňují hodnoty tvrdosti (tzv. efektem „odpevnění“ - časově omezeným poklesem pevnosti).

Kombinace obou postupů této metodiky vyhodnocení s nezbytným doplněním o strukturní rozbor vyvolaných změn v zatížené vrstvě dala dobrý předpoklad pro správné vyhodnocení materiálové odezvy na kontaktní zatížení. Uvedeným postupem hodnocení bylo zjištěno zpevnění přibližně ve stejném gradientu u obou postupů. U obou strukturních variant materiálu bylo zjištěno nelineární zpevnění.

Dále byl pro měření mikrotvrdosti použit přístroj ZWICK/ROELL ZH HV10. Měření bylo prováděno jak v liniích v kolmém směru či definovaném úhlu k zatěžovaným povrchům a ve vybraných případech také přímo na zatěžovaném povrchu. Pro měření byly použity přímo jednotlivé metalografické výbrusy vyhotovené pro strukturní analýzy. Měření tak umožnilo přímé přiřazení zjištěných hodnot tvrdosti strukturní a fázové charakteristice odpovídající dané oceli.

Příprava vzorků pro materiálové analýzy:

- Provedena byla standardní příprava metalografických výbrusů; pro preparaci byly použity materiály dentakryl a plněná fenolformaldehydová pryskyřice (tzv. bakelit). Pro elekronovou mikroskopii bylo provedeno naprašování vzorků vrstvou Ag pomocí zařízení SC7620 Quorum. Pro leptání byl použit 3% Nital.

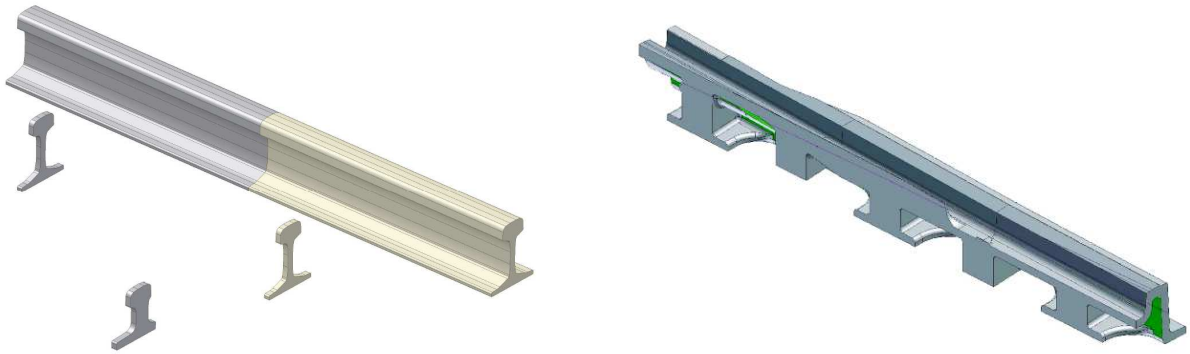
- Fotodokumentace byla pořízena rastrovacím elektronovým mikroskopem TESCAN 5130SB a světelným metalografickým mikroskopem Neophot 32.

- Chemické mikroanalýzy byly prováděny energiově disperzním analyzátorem EDAX Brooker.

6.3 Testované materiály

Nejběžněji používanou ocelí na železničních tratích v ČR je v současnosti ocel s označením R260 (dle ČSN EN 13674-1), jež svými vlastnostmi odpovídá dříve používané oceli označované UIC 900A (podle vyhlášky UIC 860) či 95 ČSD-Vk. S touto perlitickou ocelí bez tepelného zpracování či legování jsou z hlediska užití a údržby dobré zkušenosti. Její cena je nízká, vyhovuje běžným provozním podmínkám a proto je jak v síti SŽDC tak i v převážné části evropské železniční sítě nejpoužívanějším materiálem. SŽDC má v dnešní době dobré zkušenosti s kolejnicemi s tepelně zpracovanou hlavou – tzn. s kolejnicemi třídy R350HT. Tato ocel je v ČR používána od cca první poloviny devadesátých let a za tuto dobu bylo na místech jejího použití pozorováno, že má minimálně dvojnásobně vyšší otěruvzdornost a odolnost vůči kontaktně-únavovým vadám oproti oceli R260 [22]. Rychlému opotřebení ovšem nepodléhají jen kolejnice ve volné trati, ale také výhybkové součásti, tzn. především silně zatížený ohnutý jazyk s ohnutou opornicí. Pro snížení opotřebení a dosažení méně časté výměny především těchto výhybkových dílů SŽDC používá tzv. perlitizovanou ocel.

Jde o ocel z materiálu R260, která je tepelně zpracována obdobným způsobem jako ocel R350HT. Z provozního ověřování vyplývá, že např. perlitizovaný jazyk má cca 1,5 násobnou odhadovanou životnost oproti jazyku z oceli R260 (odhad proveden ze zkušenosti pracovníků SŽDC z 2010 a dle pracovníků DT z 2006). Pro ověření těchto odhadů byl do experimentů zahrnut vzorek z takto perlitizované kolejnice. Austenitická manganová ocel byla (13-Mn-B) byla do experimentů zařazena pro výzkum degradačního mechanismu odlišné strukturní báze. Pro odběr vzorků perlitických ocelí v různém stavu tepelného zpracování byla použita kolejnice R260 délky 1,5m (viz. příloha M, výkres V3-22189), jež byla z poloviny perlitizována a z poloviny zůstala v původním stavu (viz. obr. 42a). Vzorek materiálu z 13-Mn-B byl odebrán z podélného řezu střední části srdcovky v oblasti hrotu (viz. obr. 42b).



a) *b)*

Obr. 42 – Součásti železniční výhybky z nichž byly získány vzorky

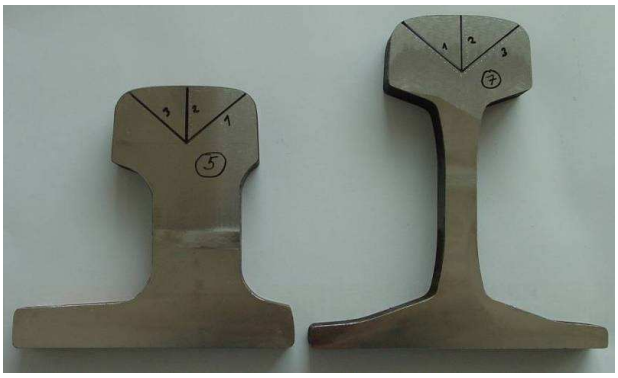
Chemické složení a hodnoty tvrdosti testovaných materiálů jsou uvedeny v tab. 18, a podrobné informace z atestů k jednotlivým materiálům jsou v příloze I, tab. I1, tab. I2 a tab. I3).

Materiál	Číslo tavby	Tvrdost [HB]	Výrobce	Chemické složení (%)				
				C	Si	Mn	P	S
R260	T56082	277	TŽ	0,73	0,34	0,98	0,016	0,014
13-Mn-B	95418	199	SL TŽ	1,14	0,46	12,96	0,035	0,006
350HT	407319	369	VAS	0,75	0,46	1,18	0,013	0,012

Tab. 18 – Charakteristiky kolejnic pro odběr zkušebních vzorků

6.3.1 Výchozí rozbory zkušebních vzorků

Dosah a intenzita výchozího povrchového zpevnění vlivem tepelného zpracování byly vyhodnoceny měřením tvrdosti. Rozdíly u jednotlivých materiálů mapují pevnostní rozdíly testovaných ocelí před experimentálním zatěžováním. Vzorky perlitických materiálů (R260, R260 perlitizováno a 350HT) byly odebrány jako celistvé řezy profilů kolejnic a z nich dále byly vyhotoveny válečky pro nosič zkušebních vzorků s požadovanými rozměry (viz. příloha M, výkres V4-7539). Vzorky s průřezem profilu kolejnice 60E1 a 60E1A1 (viz. obr. 43) byly 20mm široké s povrchovou úpravou, jež umožňovala měření příčné a povrchové tvrdosti [23]. Povrchová tvrdost byla měřena tvrdoměrem Equotip 2 (viz. tab. 19); průběhy pro měření průběhu tvrdosti v příčném řezu těchto profilů jsou vyznačeny na obr. 43.

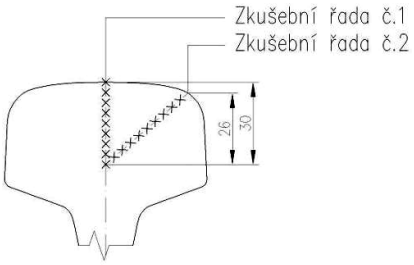


Obr. 43 – Profily pro odběr testovaných vzorků

Jakost materiálu	Číslo vzorku	Profil kolejnice	Tvrdost [HVLD]	Tvrdost [HB]
R260	3	60E1	277	273
R260 perlitizováno	7	60E1	354	349
350HT	5	60E1A1	367	362

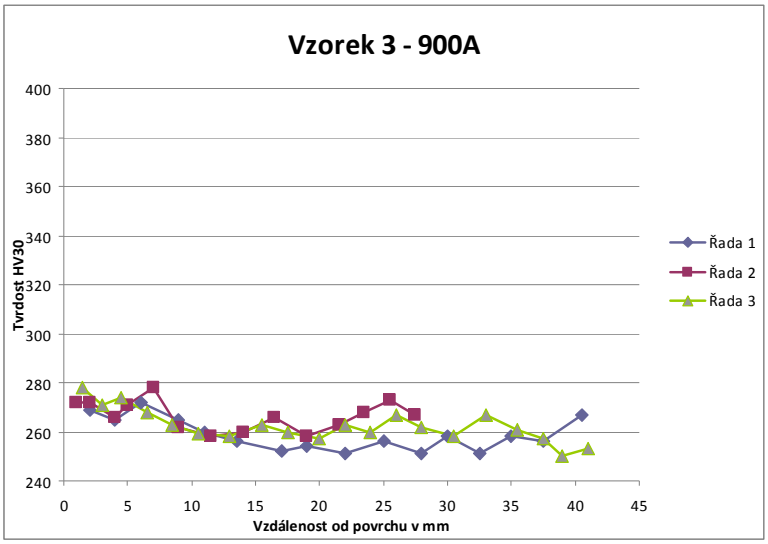
Tab. 19 – Charakteristika zkoušených vzorků materiálů

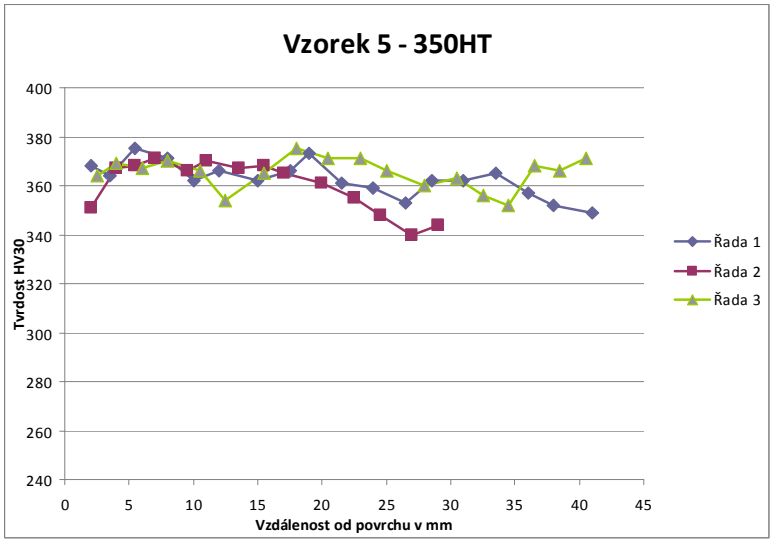
Tvrdosti na průřezech profilů kolejnic byly měřeny ve 3 řadách. Řada 2 byla kolmá na osu profilu hlavy kolejnice a řady 1 a 3 byly pod úhlem 45° na přímce z hrany poloměru R13 do hloubky 30mm (viz. obr. 43 a 44). Výsledky vyhodnocení průběhu tvrdosti dokumentuje obr. 44.



Obr.44 – Výchozí měření průběhu tvrdosti na hlavě kolejnice před vs. po tepelném zpracování

Výsledky vypovídají o stabilním zpevnění po tepelném zpracování v celé hodnocené vrstvě. Hodnoty průběhu tvrdostí v závislosti na hloubce a strukturní rozbor výchozího stavu testovaných variant ocelí byl použit při vyhodnocování ojíždění kolejnic (ve svislém směru a pod úhlem 45°) a sloužil také jako srovnávací materiál při hodnocení experimentálně vyvolaných strukturních změn.





Obr. 44 – Průběh tvrdosti na hlavách profilů kolejnic v závislosti na stavu tepelné zpracování

6.4 Realizace experimentu

V rámci experimentálních prací byly realizovány čtyři série experimentů (sady I - IV), s cílem ověření chování materiálů kolejnic v závislosti na různých parametrech zatížení (viz. tab. 20). Vyvolané kontaktní napětí odpovídalo vypočtenému rozsahu hodnot v reálné trati.

Vertikální zatížení na zkušebním stavu				Kontaktní plocha		
Nosič	**Síla [kN]**	**Rádius čela nosiče [mm]**	**Skluz [%]**	**a [mm]**	**b [mm]**	**P_{MAX} [MPa]**
Sada I	5	300	do 1	2,7	0,9	974
Sada II	5	300	do 1	2,7	0,9	974
Sada III	8	300	2	3,2	1,1	1139,2
Sada IV	5	300	2	2,7	0,9	974

Tab. 20 – Základní parametry provedených experimentálních sérií

Výchozí série experimentů (tzn. sady I a II) byly zaměřeny na testování a vyhodnocení až do vysoko-cyklové únavy. Tyto sady měření měli omezené možnosti regulace skluzového poměru, ale u dalších sérií již bylo umožněno :

- hodnocení zpevnění podle aktuálního stavu opotřebení (evidence měření hmotnostních úbytků)
- přesná regulace otáček nosiče pro zvolený relativní skluz

6.4.1 Experimentální sada I

V této etapě experimentálních prací byly testovány 3 typy materiálů (R260, R260 perlitizováno a 350HT – viz. příloha H, tab. H1).

Parametry zatěžování:

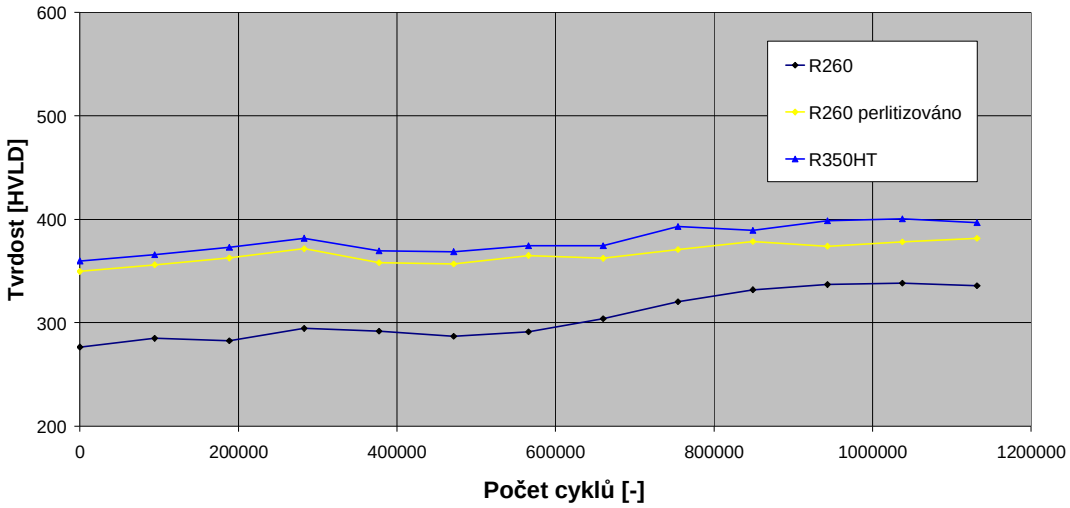
otáčky „rotujícího železničního kola“	$60min^{-1}$
otáčky nosiče zkušebních vzorků	$406,2min^{-1}$
brzděné otáčky nosiče zkušebních vzorků	$393min^{-1}$
přítlak	5 kN
relativní skluz	1%

Během experimentu byla evidována povrchová tvrdost zkušebních vzorků v nosiči a evidovány doprovodné vlivy, jež mohly mít vliv na výsledné vyhodnocení (viz. příloha N, tab. N1). Ze tří hodnot povrchové tvrdosti každého z 8mi vzorků umístěném v nosiči byla vypočtena střední hodnota daného materiálu a zaznamenána v závislosti na odpovídajícím počtu cyklů (viz tab. tab. 21).

Kumulativně hodin		4	8	12	16	20	24
Tvrdost [HVLD]	**R260** (vzorky č. 1, 4, 7)	285	283	294	292	287	291
	R260 perlit. (2, 5, 8)	356	363	372	358	357	365
	350HT (3, 6)	366	373	382	370	369	374
Celkem cyklů		94320	188640	282960	377280	471600	565920
Kumulativně hodin		**28**	**32**	**36**	**40**	**44**	**48**
Tvrdost [HVLD]	**R260** (vzorky č. 1, 4, 7)	304	320	332	337	338	336
	R260 perlit. (2, 5, 8)	362	371	379	374	378	381
	350HT (3, 6)	374	393	389	399	401	397
Celkem cyklů		660240	754560	848880	943200	1037520	1131840

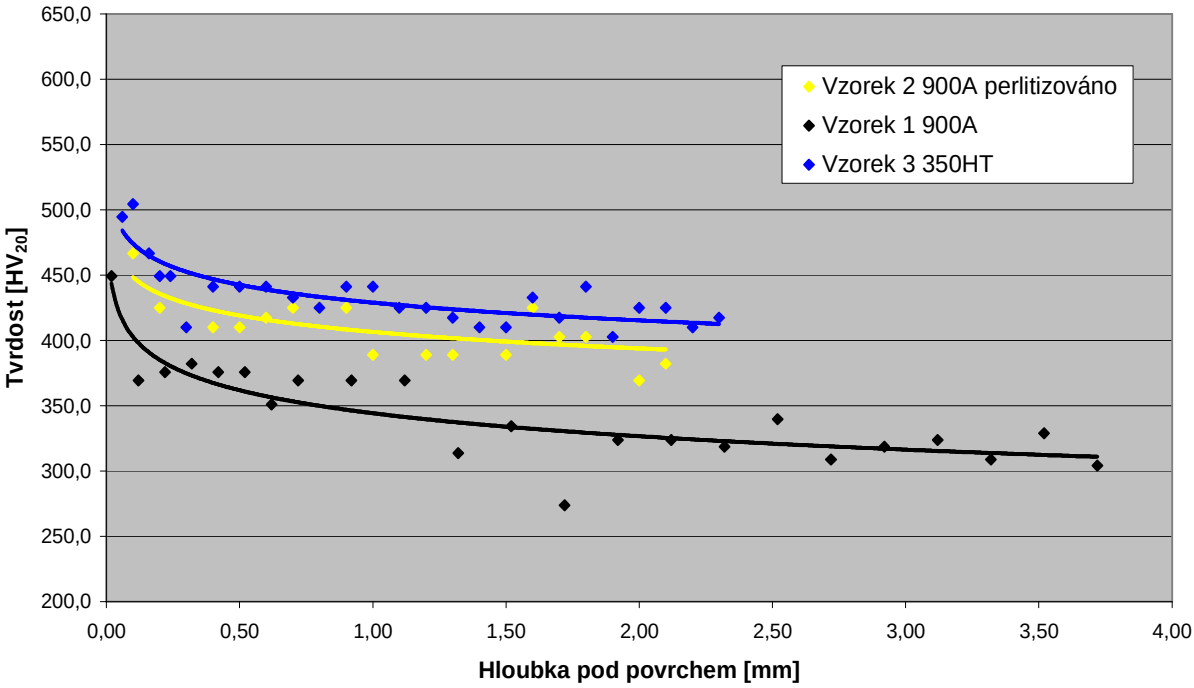
Tab. 21 – Časová závislost vyvolaných změn povrchové tvrdosti sady I

Na základě těchto údajů byl hodnocen časový rozvoj povrchového zpevnění testovaných materiálů. Všechny tyto perlitické materiály vykazují podobné průběhy změny povrchové tvrdosti(viz. obr. 46). U materiálu R260 perlitizováno lze konstatovat, že dosahuje hodnot blízkých R350HT. Materiál R260 v závěrečné fázi začíná zpevňovat více než R260 perlitizováno a 350HT, ale nedosahuje jejich hodnot. Lze konstatovat, že perlititace zvyšuje tvrdost materiálu bez omezení na jeho přirozeně omezený způsob zpevňování během zatěžování a že perlitizace materiálu neznamená jednorázové zvýšení tohoto parametru na úkor následného průběžného zpevnění až na tyto hodnoty.



Obr. 46 – Časový průběh povrchového zpevnění testovaných materiálů - sada I

Gradient vyvolaného zpevnění ve finálním stavu zatěžování ve srovnání testovaných materiálů prezentuje obr. 47. Uvedené hodnoty jsou středními hodnotami ze tří řad při měření průběhu mikrotvrdosti; konkrétně byly měřeny vzorky č. 1,2 a 3, prezentující testované jakosti ocelí. Z výsledků vyplývá, že k největším změnám dochází do hloubky cca 0,5mm a nad cca 2,5mm jsou hodnoty stabilní. Charakteristiky průběhu tvrdostí nebyly srovnávané v absolutních hodnotách, ale pouze relativně, z důvodu potřeby definování především obecné závislosti.



Obr. 47 – Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada I

6.4.2 Experimentální sada II

V této etapě experimentálních prací byly zapracovány zkušenosti z analýz vzorků z experimentální sady I. Testovány byly 4 typy materiálů (R260, R260 perlitizováno, 350HT a 13-Mn-B – viz. příloha H, tab. H1). Oproti sadě I byly navíc zařazen do sady zkoušených materiálů vzorky z austeniticko manganové oceli. U této oceli byl předpoklad odlišného deformačního chování. Vysoká „citlivost“ tohoto typu materiálu na poměry dynamických složek zatížení a náchylnost na zvýšené abrazivní opotřebení ve výchozím, nezpevněném stavu, zároveň umožnila sledování případných odchylek zatížení během zkoušek. Zařazení tohoto materiálu do zkoušek, a to v režimu přímého srovnání s perlitickými variantami ocelí, ověřil použitou metodiku hodnocení časového průběhu zpevnění a abrazivních úbytků materiálu.

Parametry zatěžování:

otáčky „rotujícího železničního kola“	$60min^{-1}$
otáčky nosiče zkušebních vzorků	$406,2min^{-1}$
brzděné otáčky nosiče zkušebních vzorků	$399min^{-1}$
přítlak	5 kN
relativní skluz	do 1%

Během experimentu byla evidována povrchová tvrdost (viz. obr. 46) zkušebních vzorků (viz. příloha N, tab. N2). Výslední hodnoty v tab. 22 představují střední hodnotu daného materiálu ze tří hodnot povrchové tvrdosti v závislosti na počtu cyklů, resp. na době zatěžování.

Kumulativně hodin		**4**	**8**	**12**	**16**	**20**	**24**	**28**
Tvrdost [HVLD]	**R260** (2, 6)	309	310	329	326	324	327	320
	R260per. (3, 5)	374	359	367	381	380	387	385
	350HT (1, 7)	390	380	390	400	397	391	401
	13-Mn-b (4, 8)	355	344	383	376	383	355	362
Celkem cyklů		95760	191520	287280	383040	478800	574560	670320
Kumulativně hodin		**32**	**36**	**40**	**44**	**48**	**52**	
Tvrdost [HVLD]	**R260** (2, 6)	318	322	322	318	319	312	
	R260per. (3, 5)	378	377	365	375	378	374	
	350HT (1, 7)	388	400	384	384	392	389	
	13-Mn-b (4, 8)	358	348	330	339	352	331	
Celkem cyklů		766080	861840	957600	1053360	1149120	1244880	

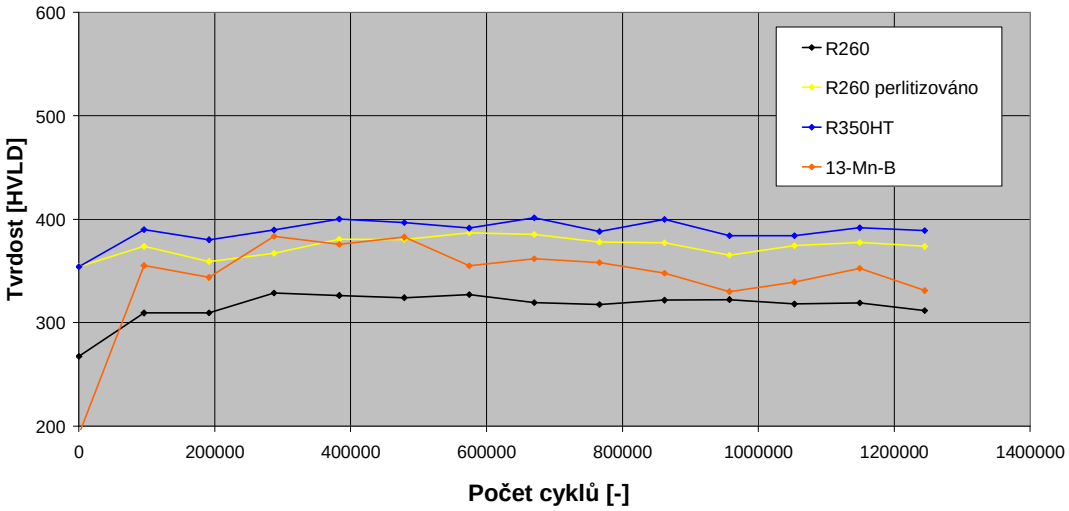
Tab. 22 – Časová závislost vyvolaných změn povrchové tvrdosti sady II

U vzorků R260, R260 perlitizováno a 350HT bylo zjištěn stabilní rozvoj zpevňování. Všechny perlitické materiály vykazovaly podobný průběh změny povrchové tvrdosti a u materiálu R260 perlitizováno lze konstatovat, že dosahuje hodnot blízkých R350HT.

Oproti tomu u vzorků z materiálu 13-Mn-B došlo k intenzivnímu zpevňování během prvních cyklů zatížení; následující změny tvrdosti povrchu byly ve srovnání s perlitickými ocelemi výrazně nestabilní. Byl uvažován předpoklad, že v návaznosti na stadium výchozího zpevnění dochází k poškození a opotřebení povrchu. Z hlediska stanovených cílů výzkumu bylo podstatné rozlišit, do jaké míry se na těchto povrchových ztrátách materiálu uplatňuje:

a) nerovnoměrné abrazivní opotřebení,

b) úbytky vlivem kontaktně-únavového poškození (tj. odlupováním materiálu při iniciaci únavových mikrotrhlin)



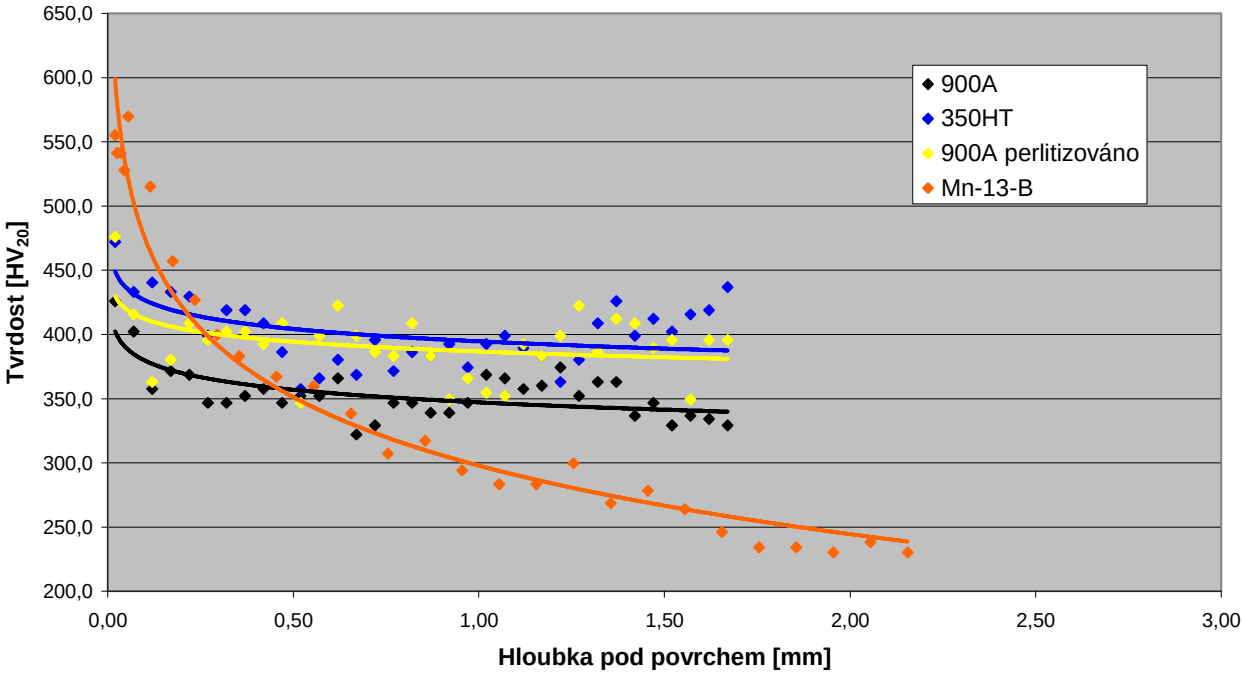
Obr. 48 – Časový průběh povrchového zpevnění testovaných materiálů - sada II

Austenitická manganová oceli Mn-13-B má principielně vyšší citlivost na dynamické složky zatížení a také na podíl abrazivní složky opotřebení. Během této etapy byly v této souvislosti získány dva stěžejní poznatky:

- do metodiky potřeba zařadit evidenci abrazivního opotřebení v čase,
- k rozhodujícímu nástupu sledovaných procesů zpevňování dochází již v prvních etapách zatěžování, tzn. během prvním cca 190 tisících cyklů.

Vyhodnocením tvrdosti vzorků perlitických materiálů v závislosti na hloubce od povrchu, jež byl vystaven zatížení, bylo zjištěno, že k největším změnám dochází do hloubky cca 0,4mm (viz. obr. 49) a od cca 1,5mm dochází ke stabilnímu průběhu. Oproti tomu u ausenitické oceli došlo k podstatně rozsáhlejšímu rozvoji plastické deformace i následného zpevnění. U daného režimu zatěžování bylo vyvozeno zpevnění až do cca 1,7mm. Ve srovnání s perlitickými variantami je typický rovněž rovnoměrný gradient tvrdosti, tj. vyjma bezprostředně povrchové vrstvy (viz dále strukturní analýzy) není zde tendence lokalizace zpevnění.

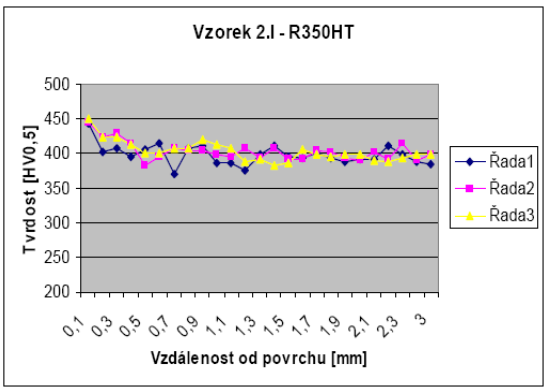
Hodnoty na obr. 47 jsou středními hodnotami ze tří řad při měření průběhu tvrdosti. Z testovaných vzorků byly jako referenční měřeny vzorky č. 1,5,6 a 8.



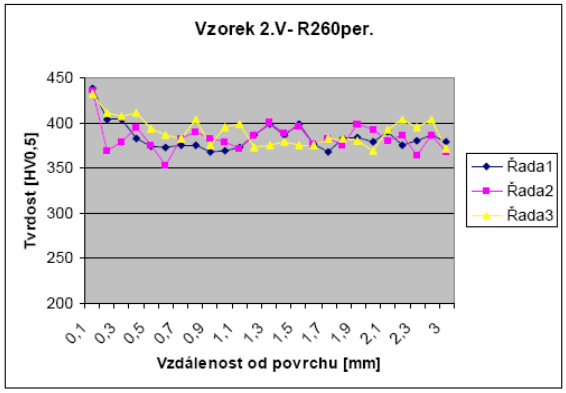
Obr. 49 – Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada II

Tato sada byla měřena ještě na jiném pracovišti metodou $HV_{0,5}$ [78] pro posouzení příp. vlivu rozdílů použité metodiky; na obr. obr. 50 je zobrazen průběh tvrdosti každé ze 3 řad pro každý jednotlivý zkušební vzorek. Z porovnání vyplývají obdobné charakteristiky pro všechny materiály kromě R260, kdy jde identifikovat do hloubky cca 0,3mm podstatné zvýšení tvrdosti až k hodnotám cca 400HV, jež metodou HV20 (obr. 47) nebylo evidováno. Tento rozdíl je způsoben kromě změny zatížení (z HV_{20} na $HV_{0,5}$) také volbou jiných měřených vzdáleností.

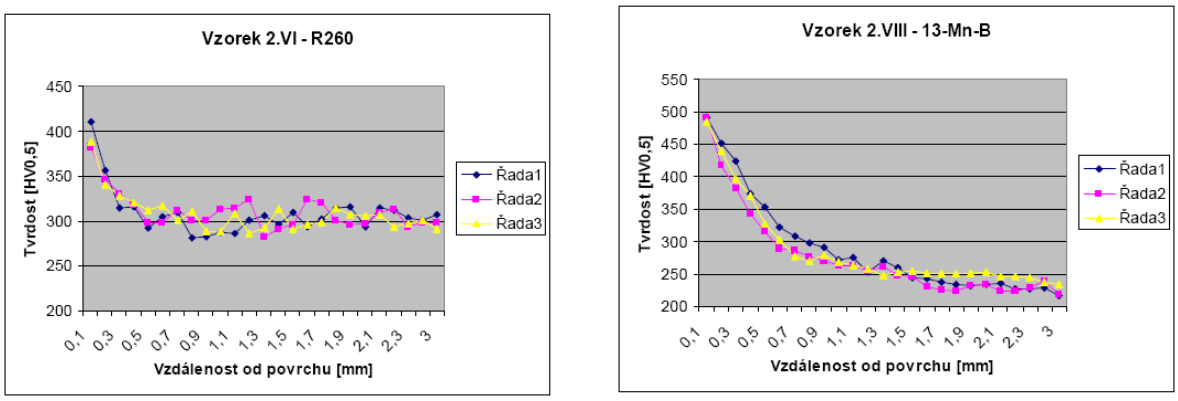
Materiál Mn-13-B u obou měření (obr. 48 a 49c) vykazuje hloubku zpevnění cca 1,7mm. Těsně pod povrchem při měření metodou HV20 (obr. 47) dosahuje hodnot tvrdosti až 550HV, jež vzhledem k odměřenému počtu hodnot v této vrstvě lze považovat za přesnější než u HV0,5 (obr. 48d).



a)



b)



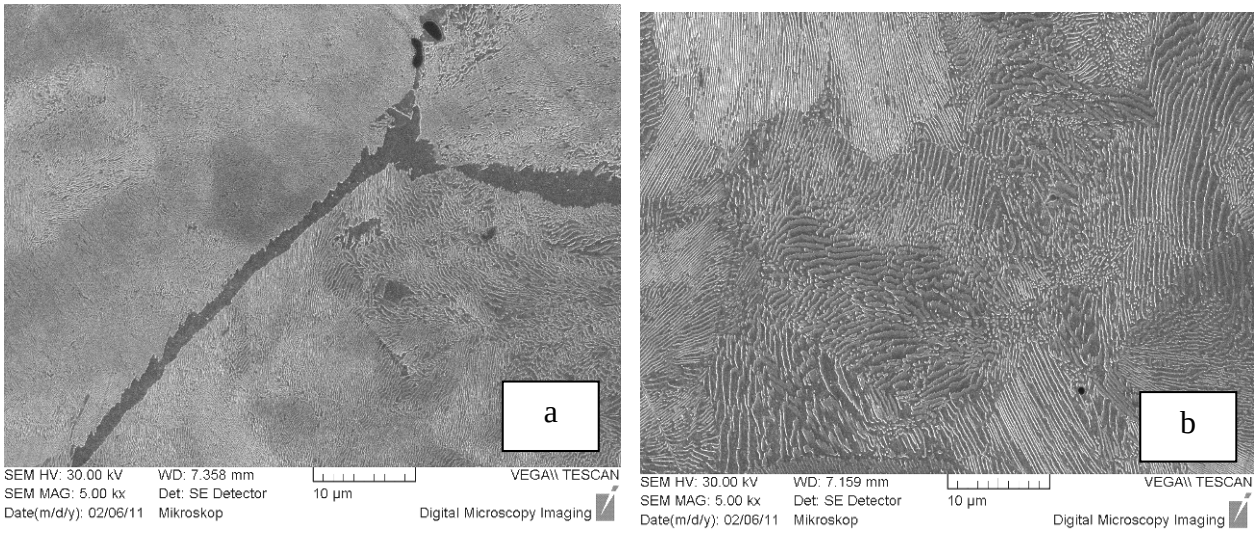
c) *d)*

Obr. 50 – Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada II [78]

6.4.3 Strukturní analýzy perlitických ocelí

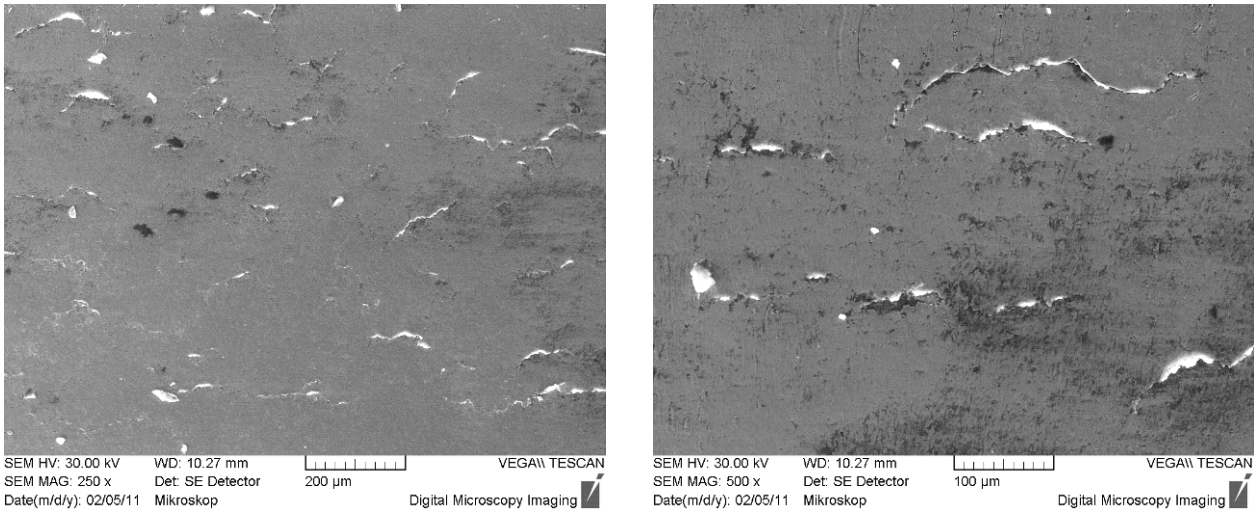
Na vzorcích byly vyhotoveny podélné řezy, vedené středem kontaktní stopy a jedna polovina válečku byla použita pro měření mikrotvrdosti a druhá pro metalografický rozbor. Byly vytvořeny snímky mikrostruktury neleptaných pro vyhodnocení povrchových mikrotrhlin (viz. příloha O, obr. O1 až O4) a leptaných pro dokumentaci odpovídajících strukturních změn v odpovídajícím zvětšení (viz. příloha P, obr. P1 až P4) každého ze 4 typů zkoušených materiálů. Detailnější fotodokumentace materiálu 13-Mn-B viz. příloha Q.

Výchozí stav struktury materiálů sady I a II je dokumentován v příloze R na obr. R1 až R6. Lze pozorovat evidentní zjemnění struktury obou materiálů po perlitizaci a výrazné snížení mezilamelární vzdálenosti ve srovnání s materiálem R260. Rozdíly tohoto parametru se odrážejí v rozdílných hodnotách tvrdosti vzorků ve výchozím stavu před experimentálním zatěžování.



Obr. 51 – Rozdíl mikrostruktury materiálu R260 perlitizováno (a) vs. R260 (b) (zv. 5000x)

Další strukturní parametr, který má podstatný vliv na odezvu jednotlivých variant perlitických ocelí, je podíl proeutektoidního feritu. U hodnocených vzorků byl zjištěn rozdíl v jeho výskytu, konkrétně u obou perlitizovaných ocelí byl vyšší než u oceli R260. Tento rozdíl dokumentuje dvojice na obr. 49. Největší výskyt byl pozorován u vzorků, které byly odebrány z materiálu R260 po perlitizaci, kde strukturně volný ferit tvořil místy až souvislou obálku původních austenitických zrn (viz. obr. 51).



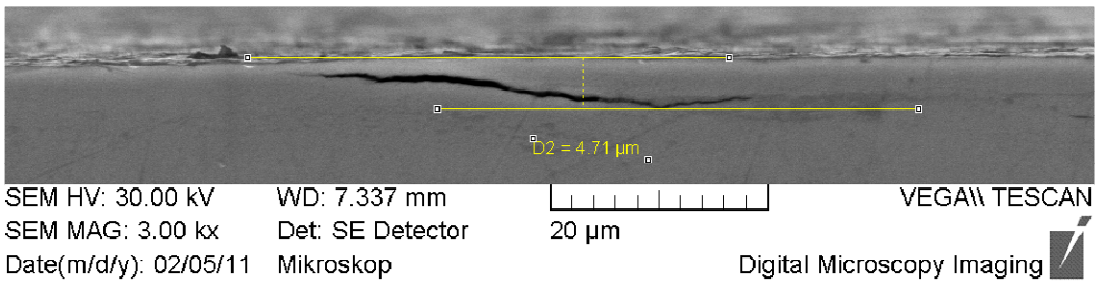
Obr. 52 – Povrchové poškození materiálu R260 (a) vs. R260 perlitizováno (b)

U obou materiálů po tepelném zpracování je evidentní významné zjemnění zrna vlivem opakované eutektoidní reakce, kdy výchozí rozměr austenitu kopíruje právě proeutektoidní obálka, která byla lokálně po tepelném zpracování zachována. Zjištěné rozdíly v obsahu proeutektoidního feritu měly částečně vliv i na výsledy hodnocení vyvolaného poškození.

U všech materiálů s perlitickou strukturou bylo vyvoláno poškození v podobě mělkých šupin (obr.52). U srovnávaných materiálů byl hodnocen výskyt šupin a hloubka odpovídajících trhlin při vyvolaném dosahu deformační zóny. Výběr fotodokumentace pro porovnání je v příloze R obr. R7.

Nejnižší povrchově pozorovatelné poškození bylo za daných experimentálních podmínek vyvoláno u vzorků z materiálu 350HT. U materiálu bez perlitizace byl vyvolán nevýraznější výskyt šupin. Dále byly zjištěny odpovídající trhliny, ale svojí hloubkou nepřesahovaly hloubku mikrotrhlin u zbývajících testovaných materiálů. Experimentálně bylo vyvoláno poškození v iniciačním stadiu řádově v jednotkách µm u všech perlitických materiálů (viz. obr. 53). Kompletní srovnávací fotodokumentace je součástí přílohy R obr. R8, R9, R10, R11.

Míra i charakter opotřebení povrchu je také pod vlivem odchylek jakosti testovaných materiálů. V rámci provedených experimentů byl např. zjištěn vliv zvýšeného podílu proeutektoidního feritu u oceli R260 po perlitizaci ve srovnání s materiálem 350HT.

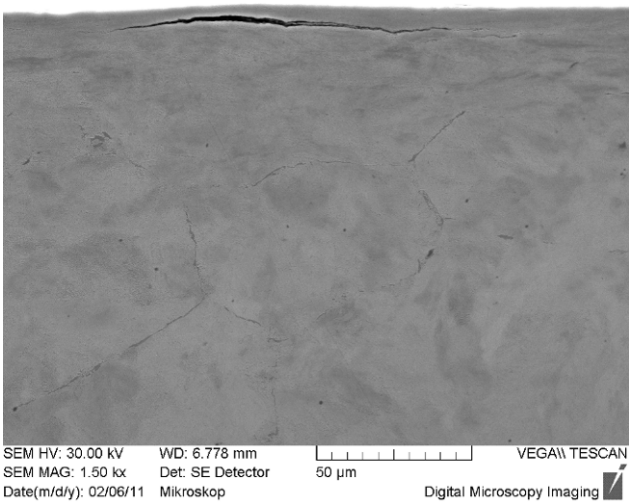


Obr. 53 – Vzorek „II-1“ (350HT – zv. 3000x)

U materiálu R260 po perlitizaci bylo zjištěno téměř souvislé síťoví, zatímco u 350HT bylo zjištěno tenčí, nesouvislé. U obou těchto materiálů, určených pro perlitizaci, je ve srovnání s ocelí R 260 normativně limitován užší rozptyl obsahu uhlíku, směrem k maximu předepsanému u materiálu R260, tj. pro minimalizaci proeutektoidního feritu (viz. srovnávací fotodokumentace testovaných materiálů v příloze R, obr. R1 až R6).

Strukturně volný, proeutektoidní ferit je z hlediska odolnosti povrchu u kontaktně-únavového zatěžování nežádoucí. Při jeho zanedbatelném podílu dochází k iniciaci i rozvoji trhlin – viz obr. 54. Rozhodujícím způsobem jsou ovlivněny stavbou perlitických kolonií, kdy jsou trhliny rozvíjeny perlitickým feritem. Za těchto podmínek je jak pro rozvoj plastické deformace, tak i pro rozvoj poškození rozhodující parametr mezilamelární vzdálenosti. K iniciaci defektů ale dochází ve stavu plastického přetvoření, tzn. kdy již dochází k destrukci původní lamelární stavby.

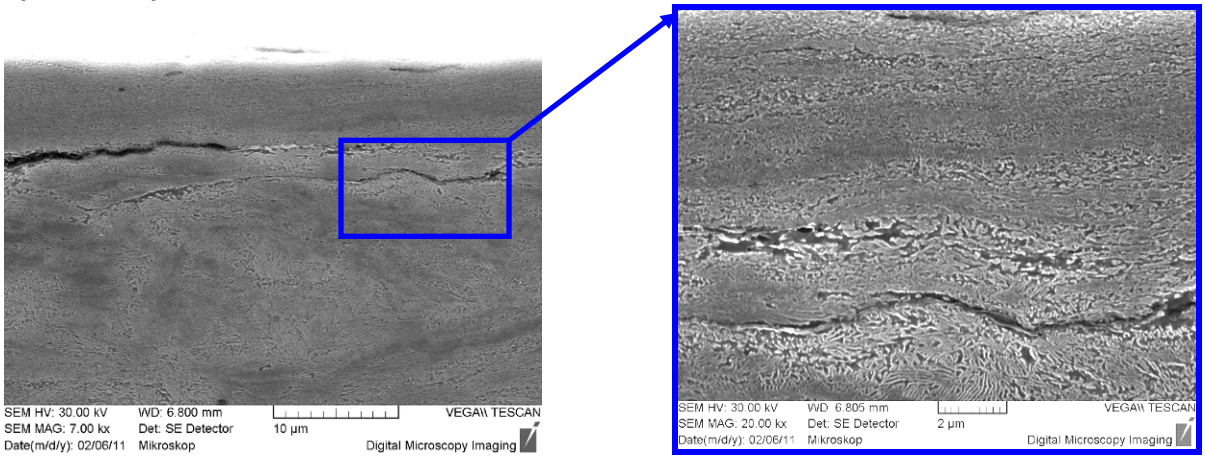
U perlitických ocelí, se ohledně responze na kontaktní zatížení uvádí tendence „natáčení“ lamel souběžně s povrchem [68]. Výsledky provedených rozborů tyto názory potvrzují, ovšem iniciace byla zjištěna právě až ve stavu tzv. “drcení“ lamel, tzn. že tento efekt nelze podle těchto výsledků uvažovat jako jednoznačně preferující pro tuto strukturu před např. ocelemi na bainitické struktuře.



Obr. 54– Poškození iniciované deformačně usměrněným proeutektoidním feritem Vzorek „II-5“ (R260 perlitizováno – zv. 1500x)

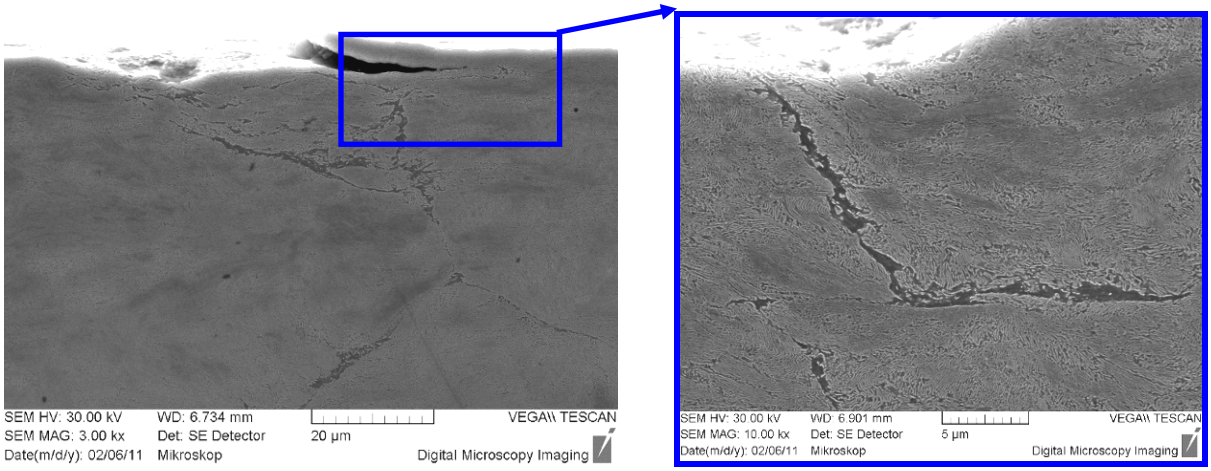
Obr. R12 až R15 v příloze R podrobněji dokumentují diskutovaný efekt u materiálu R260 ve srovnání s materiálem 350HT. Plastický tok v tomto stadiu usměrňuje další postup trhlin přibližně v souběžném směru s povrchem. Další rozvoj mimo takto přetvořenou vrstvu je tedy podmíněn přesahem poškození pod tuto vrstvu.

Při jejich zvýšeném podílu bylo pozorováno (např. u vzorku „II-5“), že v místech jejich výskytu v povrchových (respektive bezprostředně v podpovrchových oblastech) je tato fáze místem iniciace a preferenčního rozvoje poškození (obr.55). V kontrastu s tím je na obr.56 dokumentována situace, kdy u vzorku „II-5“ (R260 perlitizováno), je jak iniciace, tak další rozvoj mikrotrhlin veden proeutektoidním feritem. Na obr. 56a lze pozorovat také lokální kumulace feritu, jež vedou ke vzniku vydroleniny.



a) *b)*

Obr.55 - Vzorek „II-5“ (R260 perlitizováno) - postup mikrotrhliny proeutektoidním feritem



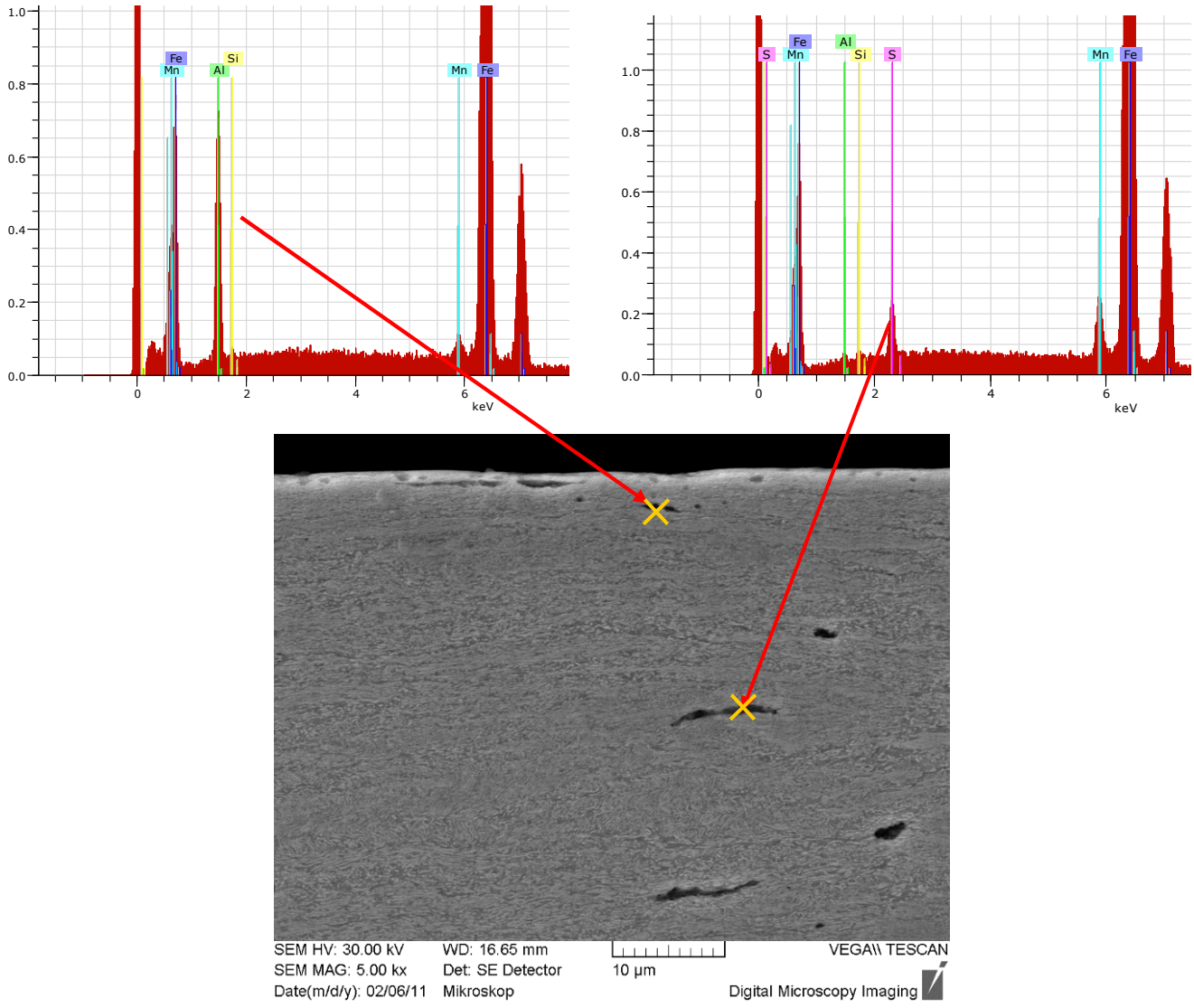
a) *b)*

Obr.56 - Vzorek „II-5“ (R260 perlitizováno – zv. 10 000x) - vydrolení materiálu v místě výskytu proeutektoidního feritu u zatěžovaného povrchu

Další hodnocené paramatery:

Vliv inkluzí - Identifikace vměstků byla provedena chemickou mikroanalýzou (viz. obr. 55) a rozbor byl zaměřen na oblasti, kde vyskytující se nečistoty ovlivnily iniciaci nebo charakter rozvoje poškození.

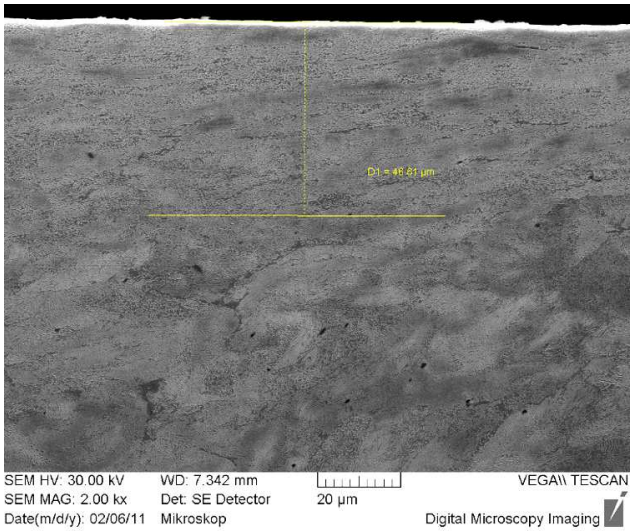
V této souvislosti byly zjištěny kompletní oxidické, sulfidické, popř. oxisulfidické vměstky. Na iniciaci působí především křehké oxidické vměstky. Dále byly zjištěny převážně oxidy hliníku a křemíku. V případě rozměrnějších inkluzí tohoto typu nebo větších shluků působí jako koncentrátory pro iniciaci únavového poškození. Podíl nitridů, popř. karbonitridů byl u všech testovaných ocelí zanedbatelný. U sulfidů typicky docházelo k jejich intenzivní plastizaci v deformované zóně. K iniciaci poškození docházelo v souvislosti s jejich výskytem a pak vlivem dekohezí, vycházející z fázového rozhraní.



Obr.57 - Vzorek „II-5“ (identifikace inkluzí, působících při iniciaci mikrotrhlin – zv. 250x)

Hloubka plastické zóny - dosah plastického přetvoření byl hodnocen srovnávacím měřením vzorků série II, jež byly rozděleny v podélných řezech pro možnost obrazové analýzy. Celkem bylo provedeno 5 měření u každého jednotlivého vzorku. Měřeno bylo pásmo intenzivního přetvoření a metodiku prezentuje obr. 56, ostatní výsledky diskutovaných srovnání jsou uvedeny v příloze R, obr. R16 až R18.

Z výsledků vyplývá, že u obou perlitizovaných ocelí bylo za daných testovacích podmínek toto pásmo intenzivního přetvoření srovnatelné a naměřené hodnoty se pohybovaly v rozsahu 20-30μm. Oproti tomu u vzorků jakosti R260 byla hloubka tzv. plastizace 45 až 60μm, tzn. 2-3 násobně přesahující dosah intenzivní plastizace u vzorků po perlitizaci. V návaznosti na další výsledky strukturního rozboru z tohoto zjištění vyplývají konkrétní rozdíly v odolnosti proti poškozování povrchu, a to, že plastická deformace u všech testovaných typů perlitických materiálů probíhá za postupného „usměrňování“ struktury ve směru působení tangenciální síly.



Obr.58 - Vzorek „II-6“ (Měření dosahu deformační zóny – zv. 2000x)

6.4.4 Experimentální sada III

V této etapě experimentálních prací byly zapracovány zkušenosti z prací s experimentálními sadami I a II a jejich vyhodnocením. Především došlo ke zlepšení způsobu regulace a ke změně šířky zkušebních válečků z 10mm na 12mm. V této etapě se experimentální práce zaměřily na testování jednoho typu materiálu - 13-Mn-B – viz. příloha H.

Parametry zatěžování:

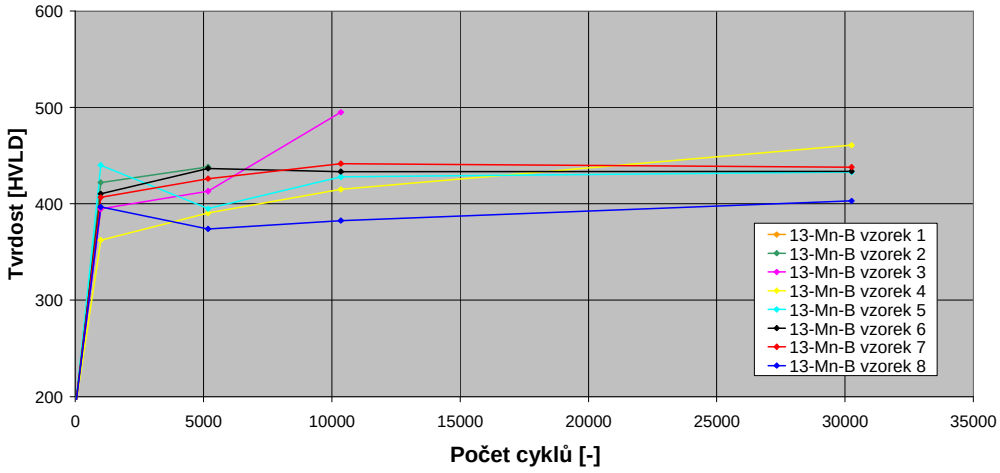
otáčky „rotujícího železničního kola“	$60min^{-1}$
otáčky nosiče zkušebních vzorků	$406,2min^{-1}$
brzděné otáčky nosiče zkušebních vzorků	$398,1min^{-1}$
přítlak	8 kN
relativní skluz	2%

U této sady osmi vzorků stejného materiálu byl použit rozšířený princip testování, kdy po ukončení určitého počtu cyklů bylo z nosiče vyjmut jeden zkušební vzorek. To umožnilo strukturní analýzy materiálu ve zvoleném stadiu zatěžování a tedy evidenci změn v závislosti na počtu cyklů pro vybraný materiál. Průběžně byly sledovány změny v šířce kontaktní plochy; tyto změny byly zohledněny v nastaveném zatížení v konkrétní etapě zkoušky.

Kumulativně minut		**2,5**	**13**	**26**	**76**
Tvrdost [HVLD]	**Vzorek 1**	395	---	---	---
	Vzorek 2	422	438	---	---
	Vzorek 3	395	413	495	---
	Vzorek 4	362	390	415	461
	Vzorek 5	440	395	428	433
	Vzorek 6	410	437	433	434
	Vzorek 7	407	426	442	438
	Vzorek 8	397	374	383	403
Celkem cyklů		995,25	5175,3	10350,6	30255,6

Tab. 23 – Časová závislost vyvolaných změn povrchové tvrdosti sady III

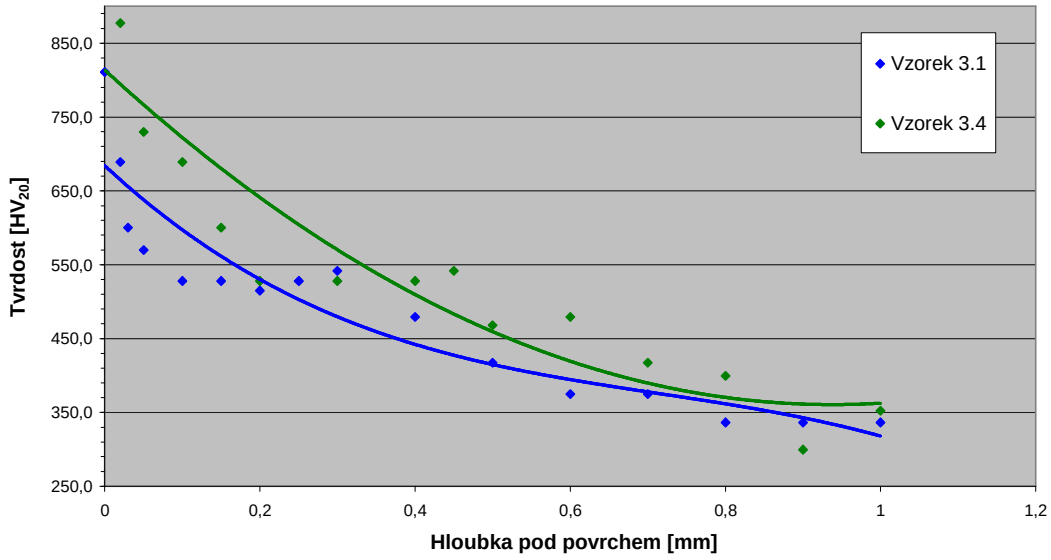
Obr. 59 prezentuje výsledky hodnocení povrchové tvrdosti (podrobněji viz. příloha N, tab. N3). Údaje v tab. 23 představují střední hodnotu daného materiálu ze tří hodnot povrchové tvrdosti v závislosti na počtu cyklů a na čase. Uvedená zatěžovací doba byla ve skutečnosti navýšena o cca 2 min. záběhu (tzn. doby ustavení otáček pro definovaný relativní skluz).



Obr. 59 – Časový průběh povrchového zpevnění testovaných materiálů - sada III

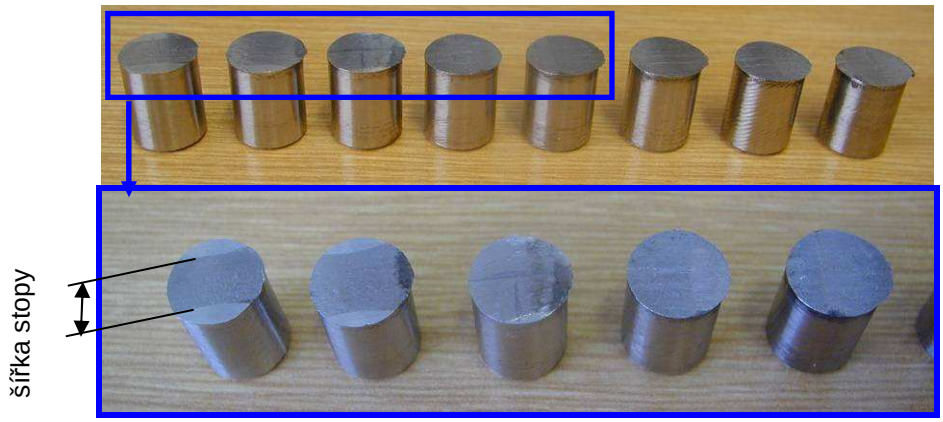
Materiál Mn-13-B po počátečním zpevnění začal vykazovat s rostoucím počtem cyklů přibližně konstantní průběh (ve shodě se sadou II). Díky kratším intervalům měření povrchové tvrdosti lze konstatovat, že ke zpevnění materiálu došlo v prvních cca tisíci cyklech. Dále po cca 5ti tisíci cyklech dochází k zřetelné změně (snížení) povrchové tvrdosti, lze předpokládat, že v této oblasti počtu cyklů došlo k abrazivními úbytku. U vzorku č.3 bylo po cca 10ti tisíci cyklech naměřeno celkově nejvyšší hodnoty tvrdosti (495HVLD) během celého průběhu experimentu sady III.

Z výsledků ze sady II vyplývá, že k největším změnám dochází v oblasti cca 0,5mm pod povrchem; na tuto oblast bylo zaměřeno hodnocení sady III. Z průběhu tvrdosti vybraných vzorků (vzorky 1 a 4 – viz. obr. 60) v závislosti na hloubce od povrchu vyplývá dosažený rozdíl zpevnění během zatěžování, s gradientem do hloubky cca 1mm pod povrchem.



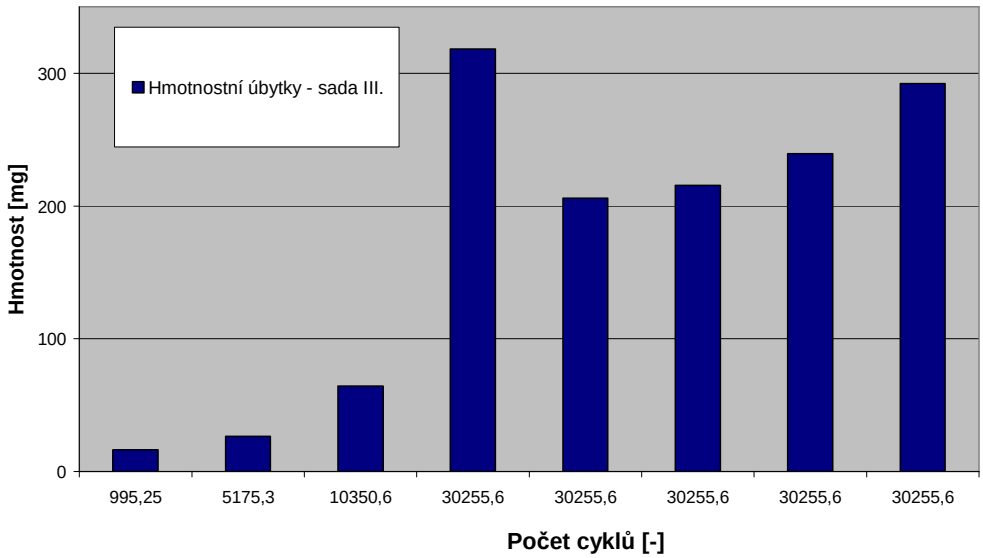
Obr. 60 – Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada III

Během experimentu byla průběžně zaznamenávána změna šířky kontaktní stopy -viz tab. 25. Po cca 10ti tisíci cyklech došlo k přesahu šířky stopy celkové šířky (průměru) zkušebního válečku, to bylo zohledněno u následující experimentální sady. V jednotlivých etapách byl upravován přítlak tak, aby se v poměru ke časovým změnám kontaktní plochy zachoval vyvozený přítlak (finální navýšení dosáhlo cca 9kN). Změny šířky kontaktní stopy při experimentálním odvalování austenitické oceli jsou dokumentovány na obr. 61.



Obr. 61 – Rozvoj kontaktní plochy při experimentálním zatěžování austenitické oceli

Dále byly do tab. 24 zaznamenávány hodnoty hmotnostních úbytků u daných vzorků - viz obr. 62, z něhož vyplývá rozvoj abrazivního opotřebení s dobou kontaktně-únavového zatížení. Navýšení abrazivního úbytku evidentně souviselo s poklesem pevnosti povrchové vrstvy. Vliv na vyvolaný degradační mechanismus byla předmětem hodnocení strukturních souvislostí. Referenční materiál byly vzorky, vykazující největší zpevnění (461HV) a největší hmotnostní úbytky (318,3g).



Obr. 62 – Hmotnostní úbytky sady III

Vzorek č.	1	2	3	4	5	6	7	8
Počet cyklů	995,25	5175,3	10350,6	30255,6	30255,6	30255,6	30255,6	30255,6
Šířka stopy [mm]	8	9	11	---	---	---	---	---
Hmot. úbytek [mg]	16,4	26,5	64,3	318,3	206	215,5	239,4	292,2

Tab. 24 – Hmotnostní úbytky sady III

6.4.5 Experimentální sada IV

V této etapě proběhli experimentální práce a vyhodnocení dle ověřeného postupu experimentální sadou III, jen s jinými zatěžovacími parametry, tzn. že v této etapě byl testován 1 typu materiálu (austenitická manganová ocel -13-Mn-B).

Parametry zatěžování:

otáčky „rotujícího železničního kola“	60min^{-1}
otáčky nosiče zkušebních vzorků	406,2min^{-1}
přítlak	5 kN
relativní skluz	2%

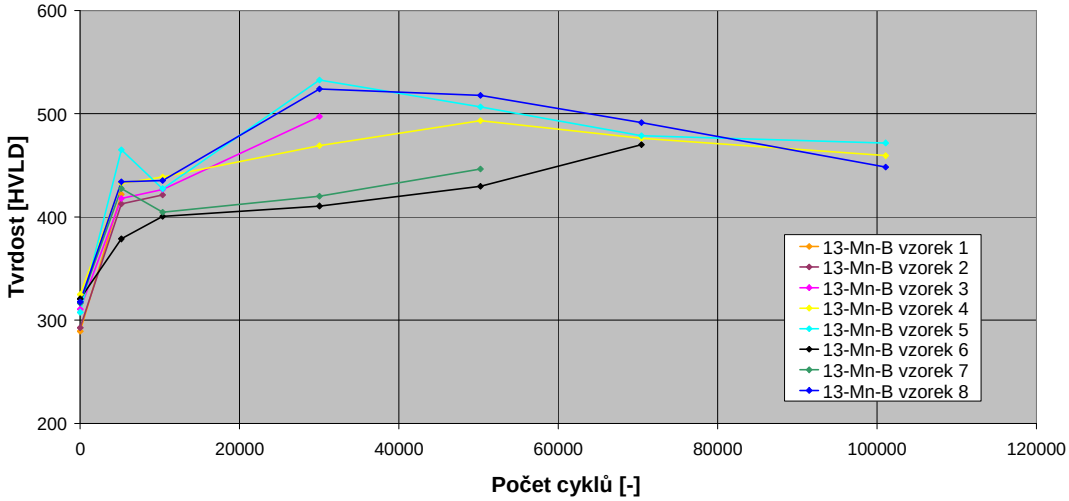
Při testování této sady vzorků byly obdobně jako u předešlé sady při stanoveném počtu cyklů postupně vyjímané vzorky pro kompletní materiálové analýzy dle stanovené metodiky.

Během experimentu byla evidována povrchová tvrdost zkušebních vzorků (viz. příloha N, tab. N4). - tab. 25 ; grafické vyhodnocení viz. obr. 63.

Kumulativně minut		**13**	**26**	**76**	**127**	**178**	**255**
Tvrdost [HVLD]	**Vzorek 1**	422	---	---	---	---	---
	Vzorek 2	413	421	---	---	---	---
	Vzorek 3	418	427	497	---	---	---
	Vzorek 4	433	439	469	493	476	459
	Vzorek 5	465	427	533	507	479	472
	Vzorek 6	379	401	411	430	470	---
	Vzorek 7	428	405	420	446	---	---
	Vzorek 8	434	435	524	518	491	448
Volné otáčky nosiče [min^{-1}]		406	406	401,5	404	404	406
Brzděné otáčky nosiče [min^{-1}]		398	398	394	396	396	398
Celkem cyklů		5174	10348	30048	50244	70440	101086

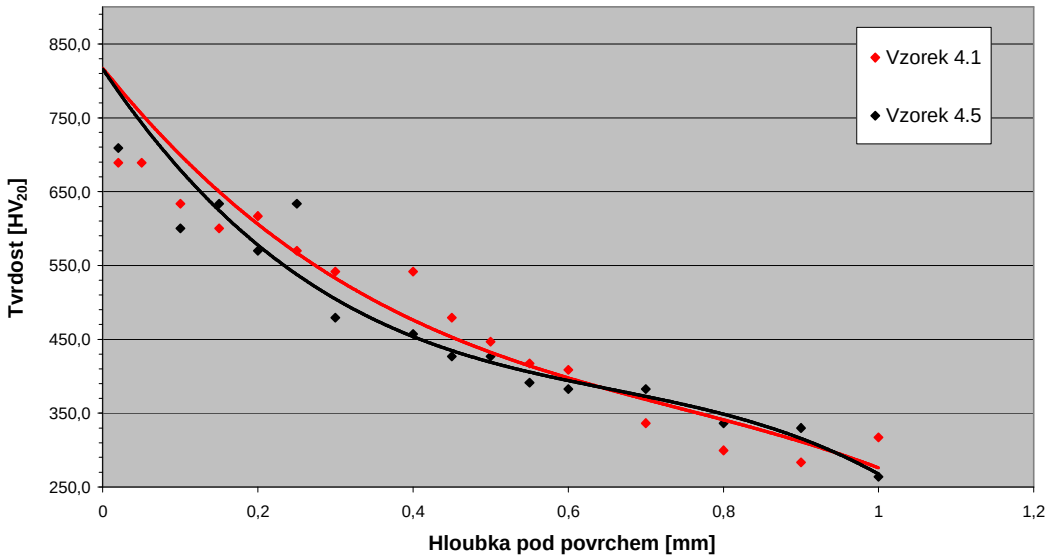
Tab. 25 – Průběh zatěžování při zjišťování povrchové tvrdosti sady IV

Po počátečním zpevnění (do 5ti tisíc cyklů) začal materiál po cca 10ti tisíci cyklech vykazovat mírnou změnu (snížení) povrchové tvrdosti a dále následovala po cca 30ti tisíci cyklech největší zpevnění během celého experimentu sady IV a u vzorku 8 bylo dosaženo největší tvrdosti (524HV).

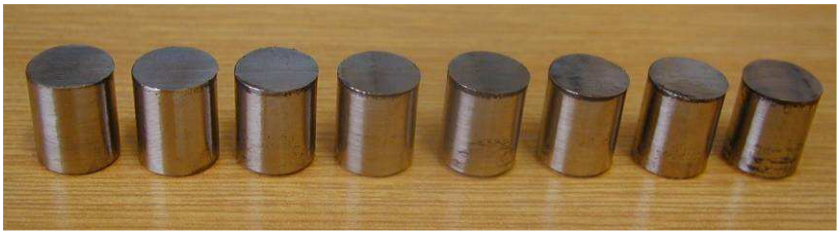


Obr. 63 – Časový průběh povrchového zpevnění testovaných materiálů - sada IV

Měřením tvrdosti vybraných vzorků (vzorky 1 a 5) v závislosti na hloubce od povrchu, jež byly vystaveny rozdílnému zatížení, byly zjištěny obdobné průběhy, dosahující max. hodnot cca 840HV – viz. obr. 64. I přes vyšší zatížení vzorků 5 dosahovaly hodnoty tvrdostí mírně nižších hodnot než u méně zatíženého vzorku 1. Zde byl rovněž metalograficky pozorován efekt průběžného odstraňování povrchově zpevněné vrstvy.



Obr. 64 – Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada IV



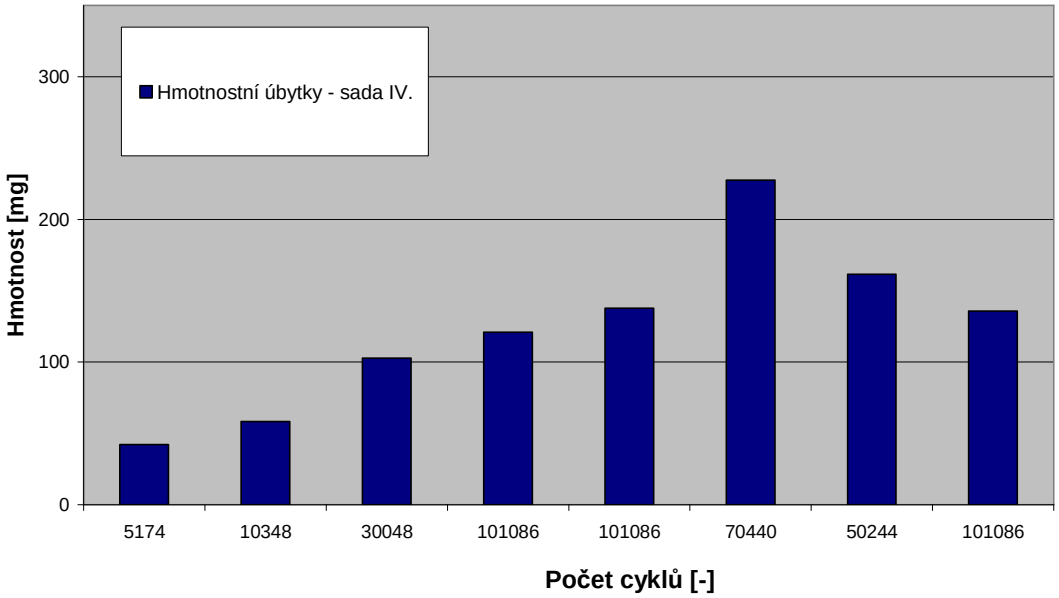
Obr. 65 – Zkušební vzorky sady IV po vyjmutí z nosiče

Vyjmuté válečky s kontaktní stopou po celém čele jsou dokumentovány na obr. 65.

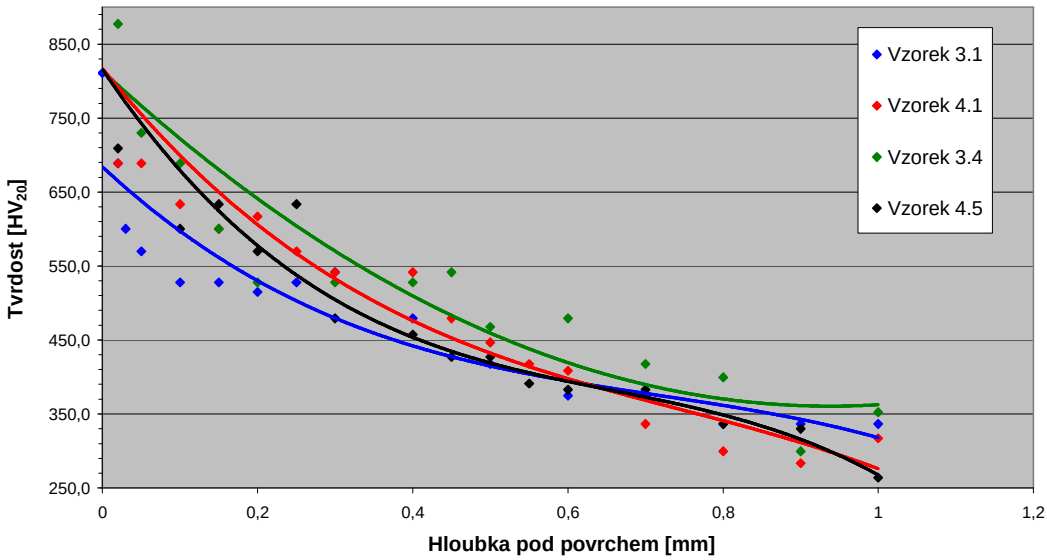
Vzorek č.	1	2	3	4	5	6	7	8
Počet cyklů	5174	10348	30048	101086	101086	70440	50244	101086
Hmot. úbytek [mg]	42,1	58,3	102,8	120,9	137,7	227,4	161,5	135,6

Tab. 26 – Hmotnostní úbytky sady IV

Tab. 26 zaznamenává hodnoty hmotnostních úbytků u daných vzorků a tyto hodnoty byly vykresleny do obr. 64, z něhož lze identifikovat- zřetelně menší úbytky materiálu u dříve vyjmutých vzorků (vzorky 1, 2 a 3) z nosiče. U dříve odebraných vzorků 6 a 7 oproti zbylým však nelze pozorovat rovnoměrnou závislost mezi počtem cyklů a abrazivním úbytkem. Největšího úbytku bylo dosaženo u vzorku 6, jež dle obr. 66 vykazuje postupný úbytek zpevňování .

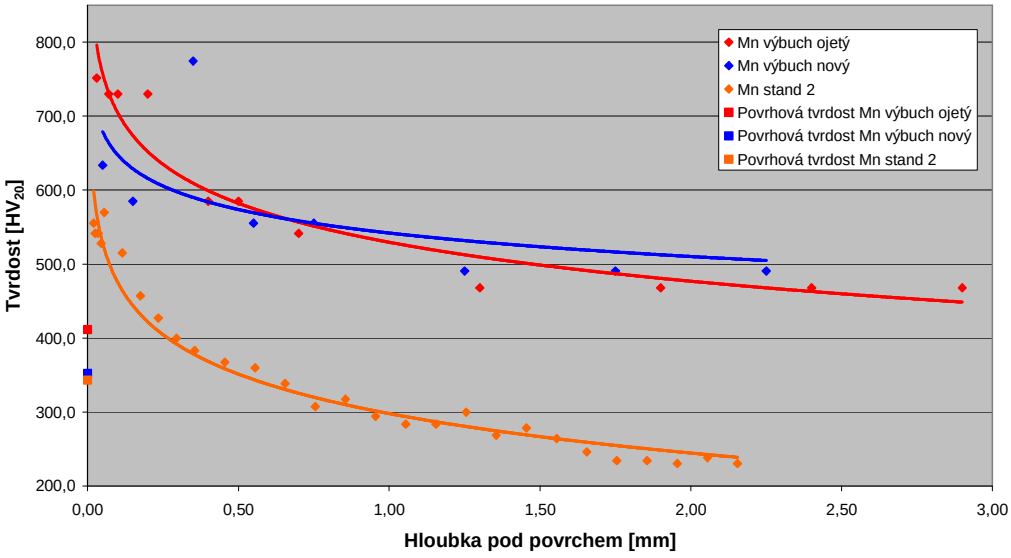


Obr. 66 – Hmotnostní úbytky sady IV



Obr. 67 – Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada III a IV

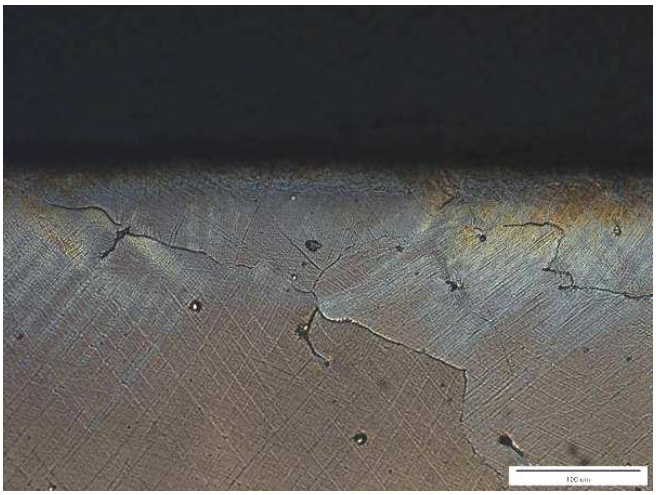
Při porovnání průběhu tvrdostí sady III a IV (viz. obr. 67) lze pozorovat, že hodnoty u méně zatížené sady IV leží v intervalu hodnot sady III, jež byly zatěžovány větším zatížením. Evidentně zde působí rozdílný vyvolaný poměr kontaktního tlaku vs. relativního skluzu. Podobněji tento vliv evidují strukturní rozbory. Při porovnání vzorků z experimentu a z trati (viz. obr. 68) lze identifikovat menší hodnoty tvrdosti (menší zpevnění materiálu) vlivem menšího zatížení, než je v trati.



Obr. 68 – Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem – vzorky Mn z trati a sady II.

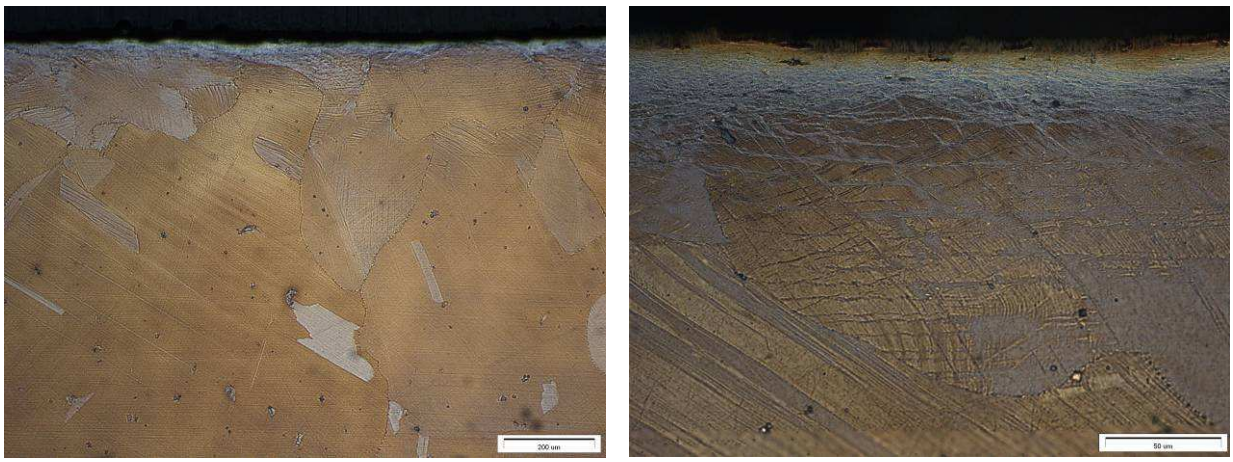
6.4.6 Metalografický rozbor austenitické manganové oceli

Z materiálových analýz vyplývají strukturní změny, jež jsou odpovídající zjištěným pevnostním změnám povrchových vrstev. Byly dokumentovány prakticky všechny efekty vyplývající z rozboru provozní degradace, tzn. vznik a postup dislokačního zpevnění v závislosti na intenzitě a době zatížení s rozdíly v mechanismu degradace, jež jsou dány poměrem dynamické a skluzové složky zatížení a také rozvoj mikrotrhlin v závislosti na vyvolaném mechanismu poškození.



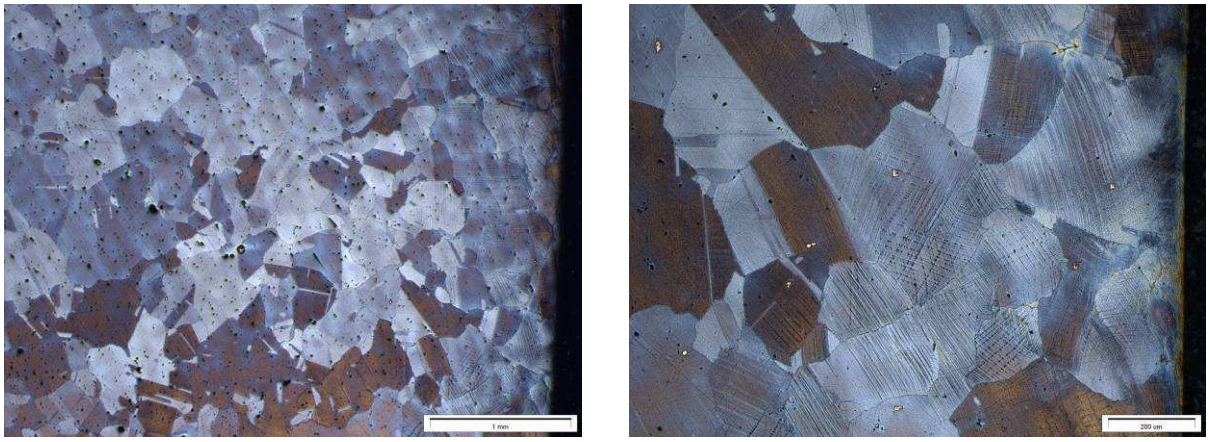
Obr. 69 – Vzorek „III-1“(13-Mn-B – rozvoj trhlin)

V souladu s principem vzniku a výše uvedené poškození byly zjištěny rozdíly v sériích III a IV. Konkrétně u sady III byl vlivem vyššího kontaktního zatížení vyvolán efekt extrémní lokalizace deformace. V dané etapě zatěžování nebyla tloušťka vyvolané vrstvy doprovázena vznikem síťovím příčných trhlin. Jedná se o iniciační stadium ve shodě se zbývajícími výsledky a rovněž také u perlitických strukturních variant. Z analýzy lze konstatovat, že docházelo přednostně k odlupování mělkých šupin v řádu μm a vznikaly tak mikroskopické nerovnosti, které zvyšovaly opotřebení (viz. obr. 69 a 70).



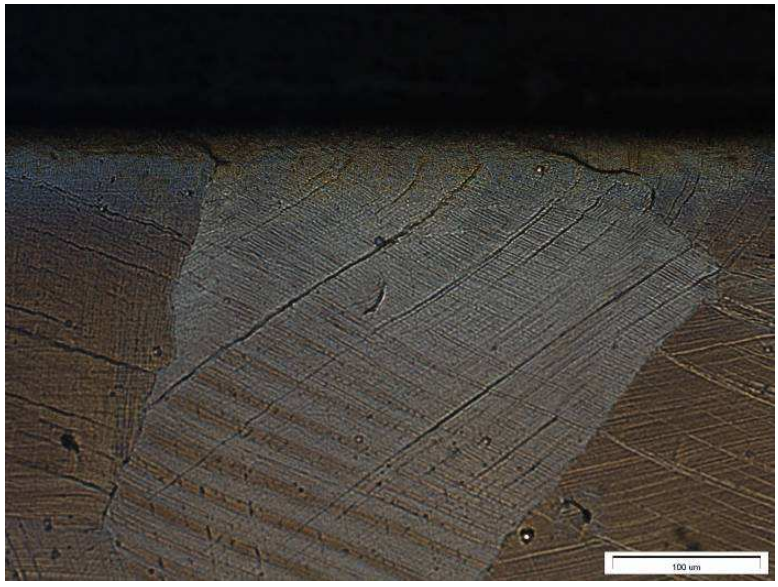
Obr. 70 – Vzorek III-8 (13-Mn-B – rozvoj trhlin – zv. 100x a 500x)

Naproti tomu u série IV bylo aplikováno nižší normálové zatížení při stejném relativním skluzu, tzn. byly změněny poměry složek zatížení a došlo k „podpoře“ abrazivního opotřebení a tomu i odpovídajících hmotnostních úbytků (viz příloha S, obr. S1 až S5).



Obr. 71 – Vzorek IV-1 (13-Mn-B – dosah dislokačního zpevnění - zv 32x a 100x)

Dochází k postupnému rozvoji tohoto efektu (viz. obr. 69) a u vzorku 8 sady IV je možno pozorovat např. iniciaci povrchových mikrotrhlin (mechanismus je ve shodě s únavovým procesem – viz. obr. 72) a toto identické poškozování bylo pozorováno u pojížděných hran ze vzorků z trati, tzn. že lze předpokládat také působení vyšší skluzové složky zatížení a vyvolání abrazivního samočistícího efektu.



Obr. 72 – Vzorek IV-8 (13-Mn-B – postupný rozvoj trhlin)

6.5 Shrnutí výsledků provedených experimentů

Provedený soubor experimentů byl zaměřen na:

- vývoj a ověření metodiky testování degradace v kontaktu,
- konkrétní parametry simulované „provozní“ odolnosti vybraných materiálů.

V rámci celkem čtyř sérií experimentálního odvalování za spolupůsobení podélného skluzu byla metodiky upřesněna především co se týče režimu hodnocení. Navrženy a ověřeny byly postupy pro možnost hodnocení strukturních změn v časové závislosti a pro možnost hodnocení abrazivního opotřebení.

Získány byly konkrétní údaje, umožňující srovnání tendencí ke zpevňování v závislosti na výchozím stavu tepelného zpracování perlitických ocelí. Metalografické analýzy vyvolaných změn v povrchových vrstvách byly zaměřeny na studium strukturních vlivů. V této souvislosti lze jako stěžejní vyjmout zjištění negativního vlivu proeutektoidního feritu, který byl zjištěn právě u materiálů, určených pro perlitizaci. Dále byly popsány parametry iniciace a rozvoje únavových mikrotrhlin v závislosti na dosahu poškození vs. dosahu plastické zóny.

Austenitická ocel byla ve výchozích sériích testů zařazena do přímého srovnání s perlitickými variantami materiálů pro železniční srdcovky. Z tohoto srovnání vyplynuly principielní rozdíly nejenom v rozvoji, resp. tendenci ke kumulaci plastického přetvoření, ale i mechanismu degradace. Finální experimenty byly zaměřeny na první etapy zatěžování austenitické oceli, které jsou dle výsledků předešlých sérií nejvýznamnější pro další rozvoj poškození. Ze souhrnného posouzení výsledků všech provedených analýz, popisujících vývoj povrchového zpevnění, poškození a působící mechanismus degradace vyplývá, že testované kombinace zatěžujících parametrů (kontaktní tlak vs. relativní skluz) vyvolávají principielní změny mechanizu opotřebení.

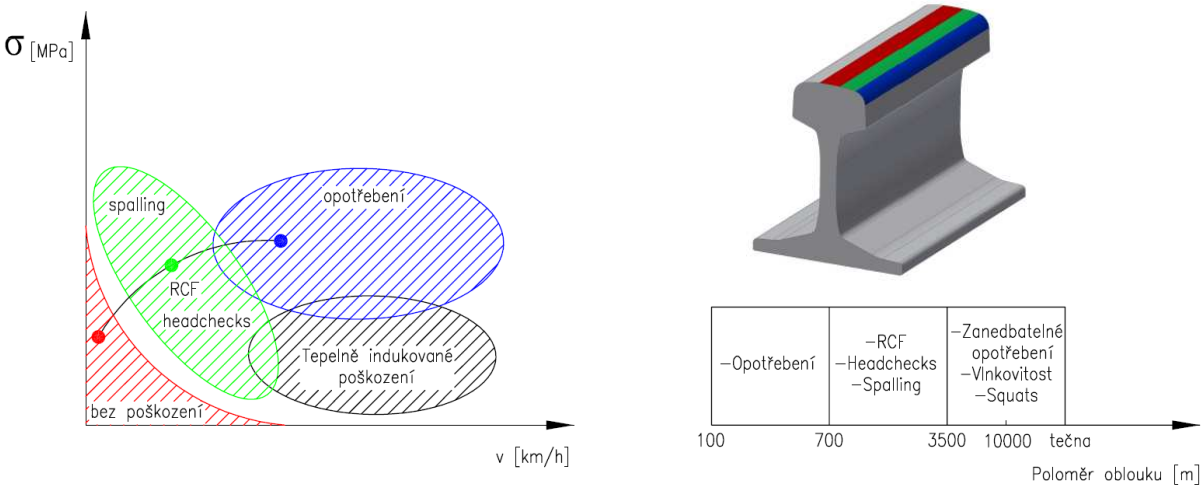
7. PROVOZNĚ VYUŽÍVANÉ PŘÍSTUPY K HODNOCENÍ DEGRADACE

V provozní praxi železniční výhybky existuje mnoho zavedených opatření, jak snižovat či dokonce předcházet opotřebení kolejnic a zbylých součástí výhybek (např. používání ocelí vyšších jakostí či maziv pro snižování koeficientu tření bez výrazného negativního vlivu na adhezi) [79].

7.1 Degradace součástí výhybky

Jak již bylo uvedeno, degradace železničních výhybek je závislá na degradaci jejich jednotlivých pojížděných součástí. Dle svého charakteristického způsobu degradace lze rozdělit tyto součásti na kolejnice přímé a v oblouku (včetně jazyků), srdcovky a přídržnice. Problematika životnosti, degradace a určení nákladů během životního cyklu je pro tyto součásti řešena na mnoha pracovištích s různými přístupy a výsledky.

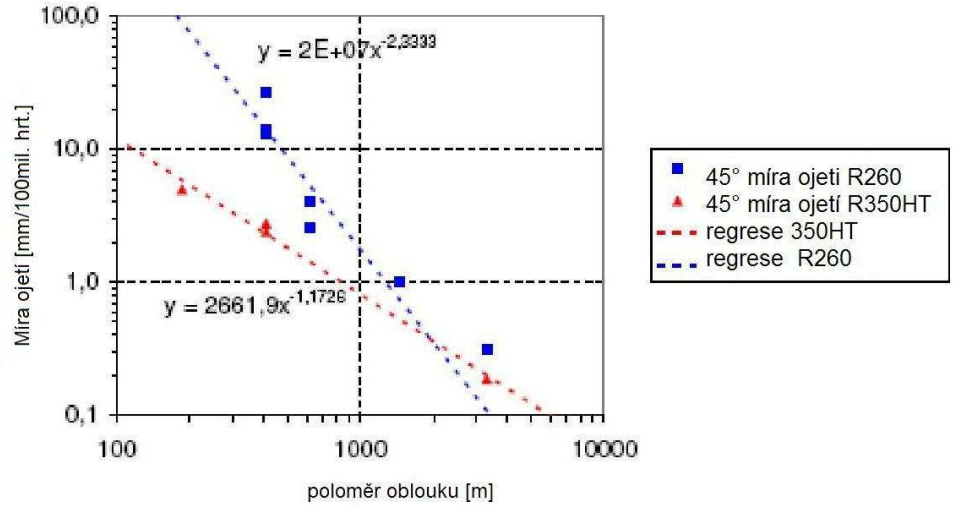
Doba životnosti kolejnice bez regenerace je stanovována s ohledem na množství projeté zátěže. V běžných podmínkách dosahuje 500 až 700 mil. hrt. projeté zátěže [4]. Dle [80] a [81] dochází k svislému ojíždění kolejnic s materiály blízkými k R260 v řádu cca 0,1mm na 10 mil. hrt. Kolejnice je na svém povrchu různě a charakteristicky degradována, tento způsob degradace celkově popisuje obr. 73, jež při vypracování vycházel z více zdrojů (např. z [74]).



Obr. 73 – Charakteristický způsob degradace kolejnice

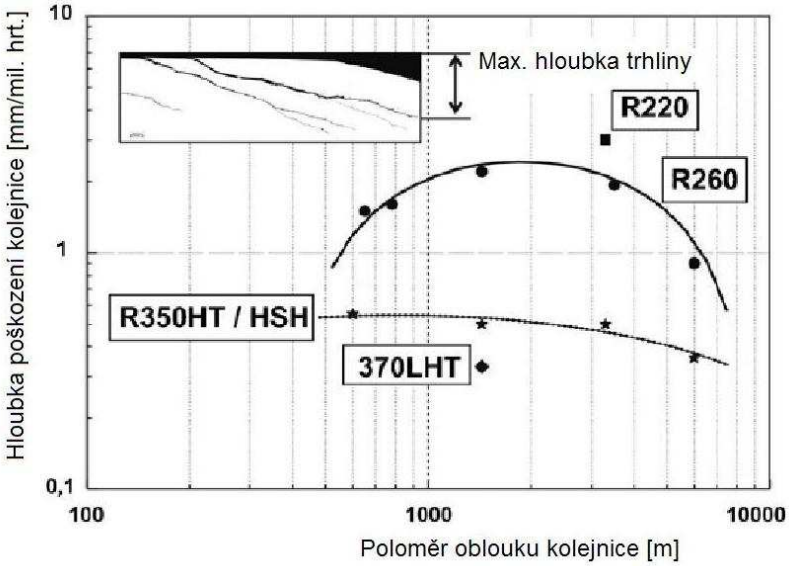
Z výsledků [83] bylo definováno, že materiál R350HT součástí železničního svršku je v porovnání s R260 trojnásobně odolný proti ojíždění a dvojnásobně odolný proti vzniku kontaktně-únavových vad, tato závislost byla definována po projeté zátěži 100 mil. hrt. [82]. Hloubka RCF trhlin prakticky udává míru kovu, jež je třeba odstranit opravnými zásahy. Dále v [83] byla definována v obloku koleje s poloměrem 3000m závislost pro svislé (0,2166mm na 10 mil. hrt.) a 45° bo ční (0,3076mm na 10 mil. hrt.) ojetí a zachycena logaritmická míra 45° ojetí v závislosti na poloměru oblouku kolejnice (viz. obr. 74). Závislost pro materiál R260 perlitizovaný tedy bude ležet v oblasti mezi těmito definovanými závislostmi pro R260 a R350HT.

Dle [84] dosahuje svislá trhlina z RCF velikosti 0,05 až 0,15mm na 10 mil. hrt. Dle [85] je ideální práh zásahu pomocí brousících vlaků pro cyklické opravné broušení v okamžiku, kdy hloubky trhlin dosahují 0,2 až 0,6mm.

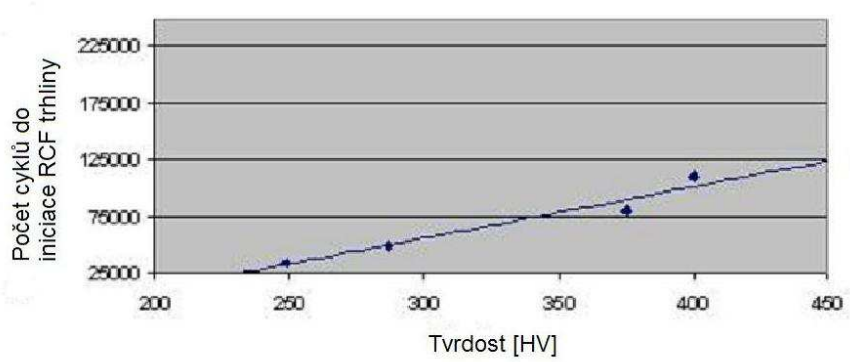


Obr. 74 – Logaritmická míra 45° bočního ojetí kolejnice z R260 a 350HT [83]

Nejucelenějších výsledků v této oblasti dosáhly experimentální činnosti pracovníků VAS, kdy byla definována závislost ojíždění a vzniku RCF u vybraných perlitických materiálů (viz. obr. 75) a pro různé perlitické materiály byla definována závislost míry ojetí a počtu cyklů do iniciace trhliny (viz. obr. 76).



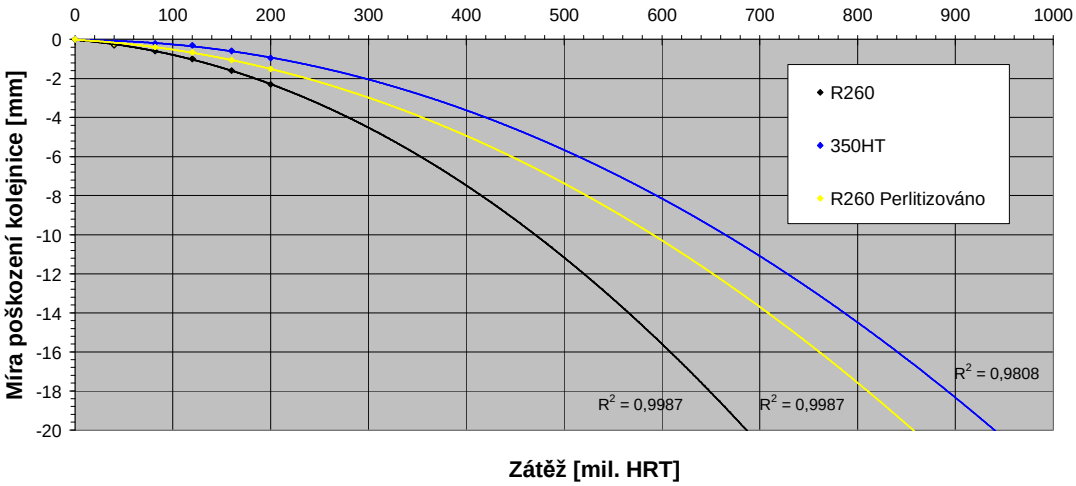
Obr. 75 – Hloubka trhlin z RCF v závislosti na poloměru oblouku trati pro vybrané perlitické materiály [68]



Obr. 76 – Závislost počtu cyklů do iniciace trhliny u perlitických materiálů z experinetů na Test rig VAS [86]

Při porovnání výsledků disertační práce a [86], lze konstatovat, že i přes rozdílné simulace a zatěžovacích podmínek na experimentálních zařízení dochází k iniciaci trhlin v řádově obdobných hodnotách, tzn. cca 70 tisíc až 120 tisíc na VAS a z našich experimentů v hodnotách do 150 tisíců cyklů. I přes omezené možností experimentálních zařízení pro simulaci kontaktu kolo-kolejnice lze z těchto hodnot vycházet pro odhad okamžiku iniciace trhlin v trati u perlitických materiálů dle projeté zátěže po vložení či opravě železniční výhybky.

Pro možnost určení životnosti kolejnic a jazyků byl z definované závislosti v [82] vynesen trend až do limitních hodnot, jež dovolují použití předpisy pro kolejnice či součástí železniční výhybky v trati (viz. obr. 77). Tato závislost byla doplněna o materiál R 260 perlitizovaný jehož hodnoty průběhu tvrdostí v závislosti na hloubce průřezu byly získány z výchozích rozborů zkoušených materiálů (viz. kapitola 6.3.1). Z takto získané závislosti lze dle zkušeností optimalizovat plán údržby a definovat životnost výhybkové konstrukce s použitými díly z perlitické oceli.



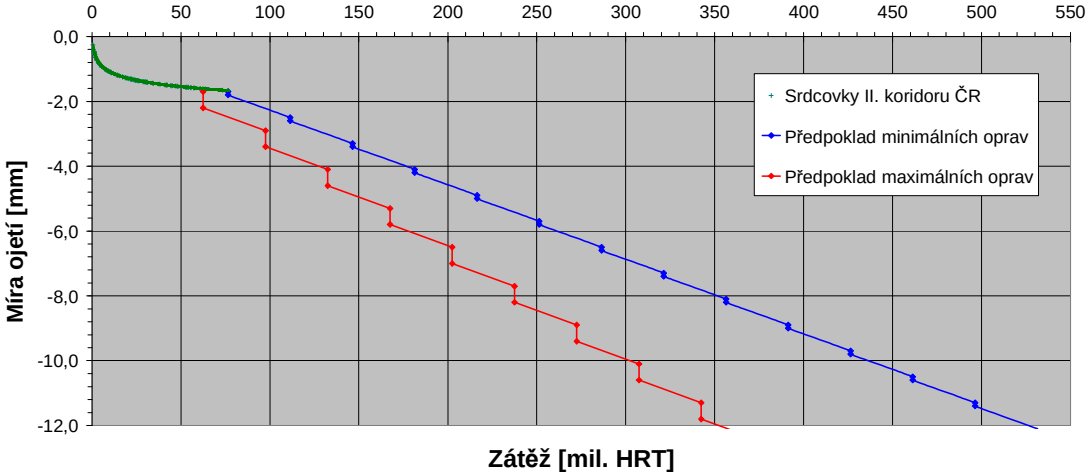
Obr. 77 – Šíření trhlin v kolejnicových perlitických materiálech

Z experimentálně získaných výsledků doplněných o výsledky z [83], [68] a [86] lze konstatovat, že perlitizací upravené vzorky materiálu (tzn. R260 perlitizováno),

prokazovaly zvýšenou odolnost proti opotřebení a šíření trhlin RCF, jež byla větší než odhadovaných 150% odolnosti materiálu R260 (viz. kapitola 6.3) a to cca 85% odolnosti materiálu 350HT (tzn. cca 250% odolnosti materiálu R260). Jednalo se o plochy vybraných výhybkových součástí, jako jazyků, opornic, přípojných kolejnic k srdcovkám typu monoblok, přípojných a hrotových kolejnic k srdcovkám se zkráceným monoblokem, křídlových a hrotových kolejnic k srdcovkám s kovaným kaleným klínem popř. k srdcovkám z kolejnic.

Přídržnice vzhledem ke svojí snadné vyměnitelnosti a nastavitelnosti není pro životnost železniční výhybky limitující faktor a proto nebyl definován její způsob degradace (tzn. rychlost bočního ojíždění, protože je vyšší než rozvoj RCF).

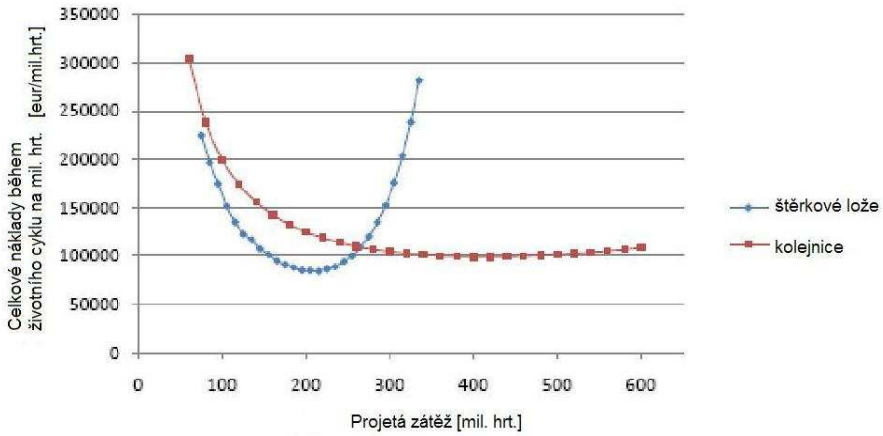
Možnost zobrazení průběhu degradace srdcovky železniční výhybky je ze zjištěných informací popsána na obr. 78. Její počáteční fáze (viz. kap. 5), je definována srdcovkami II. koridoru ČR a meze její předpokládané celkové životnosti jsou dány četností a mírou hloubky potřebného opravného zásahu (závislého mj. na použitém materiálu).



Obr. 78 – Průběh míry ojetí (degradace) u srdcovek se zatížením větším než 60 mil. hrt

7.2 Degradace výhybky z hlediska nákladů během životního cyklu

Úvahy o nákladech životního cyklu nabývají stále většího významu pro všechny organizace vytvářející dlouhodobé investice. Konstrukční a materiálové specifikace součástí výhybky musí mít ohled na nápravové zatížení, dynamické síly a zrychlení, aby splňovaly požadavky pro vysoko-rychlostní, konvenční či vysoko-zátěžové tratě. Kromě ceny výrobku má významný vliv na LCC také dodavatelsko-odběratelský řetězec, instalace, údržba a celkový předpoklad životnosti. Pro určení parametrů a faktorů pro výpočet LCC lze vycházet např. z [56], [87] či [88].



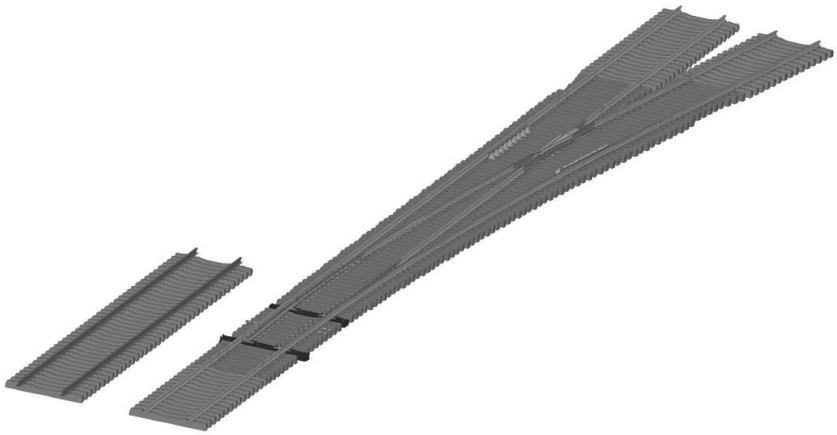
Obr. 79 – Výpočet LCC pro 100km železniční trati [87]

Mezi klíčové faktory je řazena vstupní kvalita trati, logistika doručení, výluka na trati během instalace, intervaly kontrol, čas údržby trati, čas na výměnu kolejnic a součástí, životnost jednotlivých komponentů. LCC optimalizovaných výhybkových systémů jsou ovlivňovány následujícími možnostmi [88]:

- minimalizacemi sil na kolejnicích, výhybkách, křížení pomocí optimalizace výhybkového zakřivení a kontaktně/přechodových geometrií,

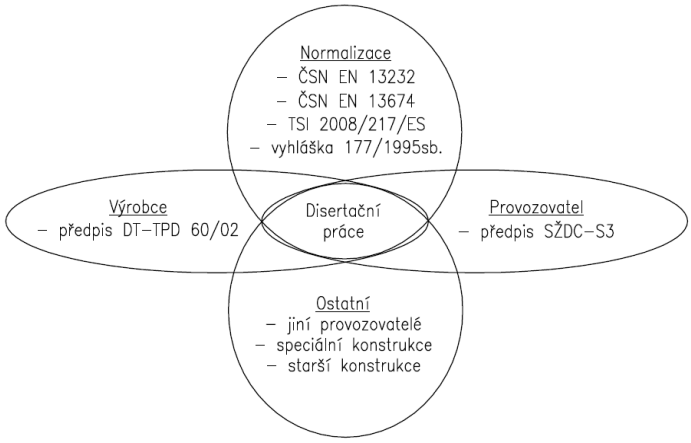
- poskytováním ideálních podmínek pro údržbu (např. prostřednictvím automatického podbíjení pod celou výhybkou bez demontáže součástí), použitím nízko-údržbových částí, aby se minimalizovaly náklady na kontrolu a údržbu a zvýšení dostupnosti zejména v oblasti přestavování, detekování a zamykání výhybek.

Způsob výpočtu LCC dle [87] (viz. obr. 79) pro širou trať či obdobným způsobem pro železniční výhybku, v závislosti na její délce značně zkresluje, protože operuje jen s jedním parametrem a nezachycuje velké množství variant konstrukčního sestavení součástí vlastní výhybky včetně přínosů jejich charakteristik během doby životnosti (viz. obr. 80).



Obr. 80 - Kolejové pole délky 25m a výhybka J60-1:12-500

Z toho důvodu je potřeba jednoznačná identifikovatelnost součástí a sestav železničních výhybek pro něž je zjišťována míra degradace a LCC. Bylo zjištěno, že jak různí výrobci, různí provozovatelé, tak i současné a minulé normalizační předpisy (např. [16], [23], [17,]) používají rozdílné označování či jejich rozsah (viz. obr. 81) a z hlediska určení degradace železniční výhybky je bylo třeba všechny obsáhnout.



Obr. 81 - Způsoby definování železniční výhybky

Proto bylo pro jejich jasnou identifikovatelnost provedeno jejich rozepsání do přehledných tabulek (viz. příloha U) z nichž následně je možné (po definování degradace jednotlivých součástí) provádět výpočty LCC či přesné statistické zpracovávání (jako např. v tab. 27).

Typ výhybky / náklady	SJ50-12-1:15	UIC60-760-1:15-Mn	UIC60-760-1:15 PHS
Investice [eur]	10 000	14 000	25 000
Svařování/navařování [eur]	4 280	2 142	215
Technická životnost [roků]	8	10	25
Výměna součástí [eur]	0	0	5 x 2 150
Ruční broušení [eur]	670	280	150
Strojní broušení [eur]	3140	3140	0
Celkem za 25 let [eur]	56 531,25	48 905	36 115

Tab. 27 - Příklad výpočtu LCC železniční výhybky dle [83]

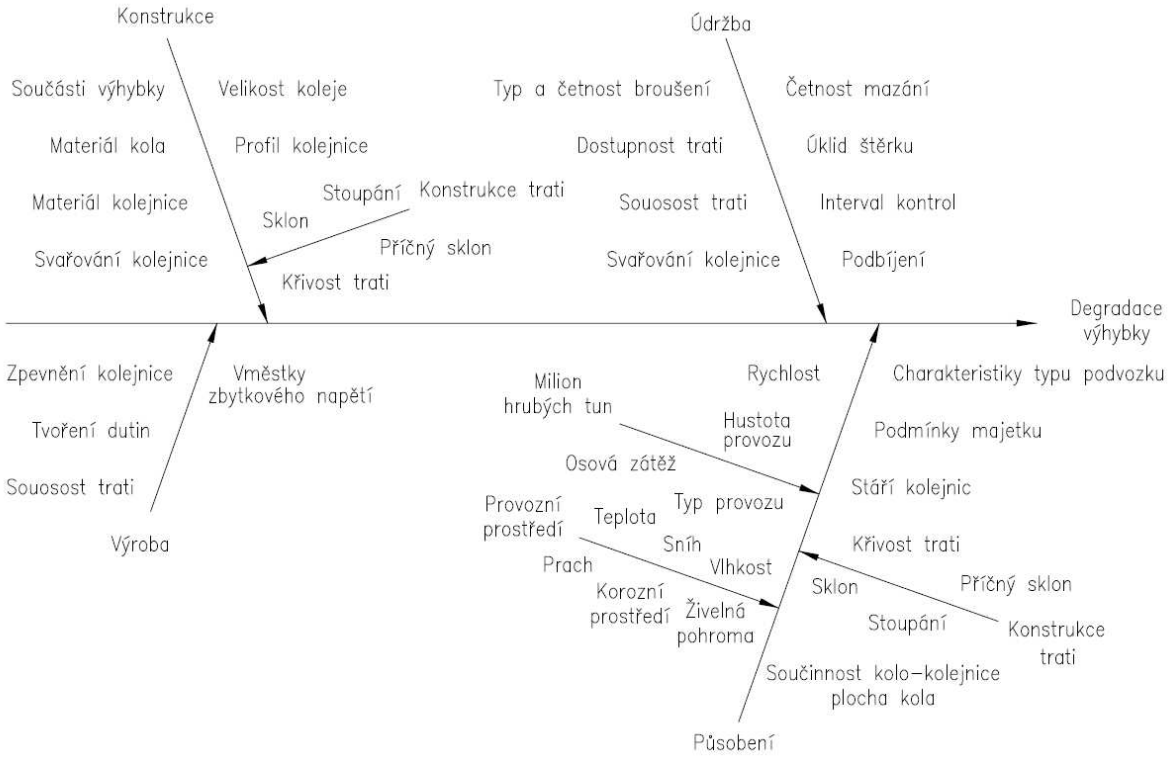
Cena výhybky roste s její délkou (tzn. s větším poloměrem odbočení, jež umožňuje vyšší rychlost při jízdě do odbočného směru; je také namáhána v tomto směru také vyššími silami – viz. příloha T).

Pro různě zatížené tratě (viz. příloha C) jsou charakteristické jiné profily kolejnic s jinou hmotnostní délkou. Proto pro možnosti výpočtu a práce s daty z různých částí světa, kde platí jiné předpisy a zvyklosti byla provedena katalogizace zjištěných typů kolejnic (přes 175 profilů). Hmotnostní délka kolejnice závisející na profilu je ovšem jen jedním faktorem ovlivňujících způsob degradace výhybky.

7.3 Faktory ovlivňující degradační proces

Je udáváno, že existuje mnoho dalších faktorů, které vedle mechanických parametrů řídí charakter materiálové odezvy – např. materiálové zpevnění, zbytková napětí, změny kontaktních podmínek vlivem plastické deformace nebo opotřebení. Vztah opotřebení kolejnicové oceli a provozního zatížení je charakterizován nejenom mechanismy, ale i dynamikou opotřebení. Opotřebovávání kolejnic ani rozvoj kontaktně-únavových vad nejsou jednoduše popsatelné děje, neboť závisí na mnoha faktorech, jako jsou tvar a materiál hlav kolejnic, úklon kolejnic, pružnost upevnění, druh pražců, geometrické parametry a geometrická kvalita koleje, provozní zatížení, hmotnost na nápravu, jízdní vlastnosti vozidel, traťová rychlost, materiál a jízdní obrys kol, udržovací stav vozidel a mnoho dalších [79].

Navíc dle [89] dochází v průběhu roku k menšímu ojetí kolejnic během vlhkého podnebí. Zvlhčení hlav kolejnic také snižuje výhodnost HSH kolejnic s vyšší tvrdostí a dle [90] ji snižuje z míry přibližně dvojnásobného snížení ojetí na cca 1,5 násobek. Tyto faktory také např. ovlivňují výskyt různých typů vad (např. dle [91] vzniká 76% vad typu squat na polovině kolejnice nad pražcem).



Obr. 82 – Faktory ovlivňující degradaci výhybky

V [77] byly sumarizovány faktory ovlivňující degradaci železniční kolejnice a z toho důvodu, že se jednalo o nejucelenější nalezenou práci na toto téma byly tyto faktory doplněny o specifika součástí výhybky oproti volné trati (viz. obr. 82) a bylo definováno 71 faktorů (viz. příloha V) ovlivňujících železniční výhybku s rozdělením na 4 hlavní oblasti (konstrukce, výroba, působení a údržba).

7.4 Doporučení opatření pro zvýšení životnosti výhybky

Doporučení pro zvýšení životnosti výhybky, vycházející z výsledků disertační práce, lze definovat především v oblasti volby vhodného typu materiálu či typu konstrukčního řešení. V kapitole 5 na obr. 32 je z vyhodnocených dat opotřebení srdcovek II. koridoru zachycena závislost, kdy se s zvětšujícím poloměrem oblouku odbočného směru železniční výhybky snižuje míra (šířce hrotu srdcovky 40mm) ojetí díky zvětšující se přechodové oblasti mezi hrotem a křídlovou kolejnicí. Z toho důvodu je doporučena instalace pevných srdcovek s geometrií 1:12-500 a 1:14-760 oproti geometrii 1:11-300 a nižšími.

Dalším konstrukčním doporučením je potvrzení vhodnosti používání perlitizace pro kolejnice a jazyky z materiálu R260. Tento materiál při experimentálním testování vykazoval oproti odhadům výrobce a provozovatele dopravní cesty vyšší odolnost a životnost než 1,5 násobnou a to cca 2,5 násobnou.

V oblasti údržby pro možnosti sledování a predikce ojetí a vzniku vad na výhybkách se doporučuje vytvoření programu, jež by nahradil ruční vyhledávání z přehledně vytvořených příloh této práce. Přílohy umožňují vytvořit strukturu rozpadu sestav výhybek na výhybky, ty dále na jednotlivé součásti a u těchto součástí na existující typy (např. srdcovky – viz. příloha X, tab. X1) a u nich možnost zaznamenávání vznikajících charakteristických vad (viz. příloha F, tab. F1 až F3) s faktory (viz. příloha V), jež je ovlivňují. Tento program by poté umožnil snadné statistické vyhodnocování s možností převodu zkušeností z jednoho typu svršku na obdobný o stejné hmotnostní délce (s předpokladem, že různé kombinace jízdních profilů kol a kolejnic jsou ze zkušenosti natolik optimalizované, že dosahují stejných účinků). Dále by bylo umožněno také porovnávat jednotlivé konstrukční řešení srdcovek a výsledky porovnat např. s doporučovanými oblastmi použití dle VAE z 90. let 20. stol. (viz. příloha X, obr. X1).

V oblasti technicko-ekonomických přínosů se doporučuje vycházet ze zpracovaných podkladů pro výpočty LCC výhybkových konstrukcí.

8. SHRNUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ, CELKOVÉ ZÁVĚRY PRÁCE

Výzkum degradačního procesu železniční výhybky byl založen na:

- hodnocení geometrických parametrů provozního poškozování v aktuálním sortimentu materiálů, profilů a rozptylu provozních zatížení;
- analýzy provozně vyvolaného kontaktně-únavového poškozování kontaktních ploch;
- experimentální studium vlivu konkrétních parametrů zatěžování na vyvolaný degradační mechanismus.

Hodnocení provozního poškozování bylo zaměřeno na nejvýznamnější typy kontaktně-únavových vad, typických pro oba typy studovaných materiálů. Výsledky této části prací sloužily pro upřesnění návrhu metodiky experimentální části výzkumu, tj.:

- byly stanoveny nejvýznamnější kriteria pro hodnocení experimentálně vyvolané poškození,
- byl ověřen zvolený způsob hodnocení vlivu testovaných složek zatížení na mechanismus iniciace poškození.

Byly získány údaje ohledně rozsahu, doprovodných strukturních změn a celkového mechanismu poškozování. Zjištěné parametry provozního poškození zároveň umožnily verifikaci experimentálně vyvolaného poškozování porovnáním s procesy provozního poškozování. Z hlediska sortimentu hodnocených materiálů byla metodika práce založena na srovnání procesu degradace dvou strukturních variant materiálů. Perlitické oceli představují skupinu materiálů, které mají v konstrukci kolejového svršku nejrozšířenější uplatnění. Hlavním problém tohoto typu materiálu je skutečnost, že jak kontaktně-únavová odolnost, tak možnosti pozitivního ovlivnění lomového chování, jsou u dané struktury limitovány. Podstatně zvýšení metalurgické jakosti těchto materiálů vedlo k významnému potlačení některých typů kontaktně – únavových vad. Další zvýšení provozní odolnosti je v dnešní době dosahováno především zjemněním mezilamelární vzdáleností perlitu tepelným zpracováním, tzv. perlitizací. Do prováděných zkoušek byly proto jako reprezentativní perlitické materiály zařazeny různé jakosti takto zpracovaných ocelí.

Výsledky experimentů potvrdily pozitivní vliv perlitizace. Zjištěn byl prakticky souběžný charakter časového rozvoje zpevňování u obou typů perlitizovaných ocelí i u materiálu ve výchozím strukturním stavu. Z toho lze vyvodit, že perlitická ocel si i po tomto tepelném zpracování zachovává původní kapacitu ke kumulaci plasticity. U hlediska souvisejících strukturních změn byl zjištěn jistý rozdíl v charakteru plastického přetvoření ve srovnání s analyzovaným provozním poškozením typu Head check. Výsledky poukazují na možný vliv geometrie u experimentální simulace. Ověření tohoto předpokladu a studium vlivu na orientaci dalšího rozvoje povrchově iniciovaných trhlin je jedním z témat pro navazující výzkum.

Další výsledky poukázaly na konkrétní strukturní vlivy na proces poškozování. Kupř. výskyt proeutektoidního feritu podle výsledků významně ovlivní iniciaci kontaktně-únavových vad především u tepelně zpracovaných jakostí perlitické oceli. Hadfieldova ocel, používaná pro nejvíce exponované části výhybkových konstrukcí, byla experimentálně testovaná jako materiál s odlišným typem struktury a odlišným provozním chováním. Hlavním problémem je zde vyšší náchylnost k výskytu vnitřních vad, ke strukturním i chemickým heterogenitám. Co se týče kontaktně-únavové odolnosti, tato je ovlivněna kromě vnitřní jakosti především intenzitou dynamického zpevnění a abrazivního opotřebení. Proto bylo testování tohoto materiálu zaměřeno na vyhodnocení abrazivních úbytků a dislokačního zpevnění ve stejných intervalech zatěžování. Zatěžující parametry ověřily možnosti simulace uvedeného rozhodujícího vlivu složek zatížení, a to změnou poměrů kontaktního tlaku a relativního skluzu v rámci třetí a čtvrté testovací série. Experimentálně byly získány údaje o časovém intervalu nejintenzivnějšího zpevnění, o změnách v dosahu plastického přetvoření v závislosti na abrazivním opotřebení.

U vybraných vzorků, prezentujících konkrétní parametry zatěžování, byl přímo vyvolán tzv. „samočistící efekt“, kdy jsou degradované mikroskopické vrstvy v kontaktu průběžně odstraňovány abrazí. Pro přímé vyjádření odpovídajících složek zatěžování, v propočtu na reálnou geometrií kontaktu, si tyto výsledky vyžadují další experiment, orientovaný na již zjištěný rozsah kontaktního tlaku vs. relativního skluzu. Větším rozsahem vzorků je potřeba z hledané závislosti vyloučit pozorovaný vliv rozptylu velikosti austenitického zrna. Podle výsledků pozorování je tento vliv významný především v iniciačním stadiu degradace. Toto zjištění je v souladu s obecnými principy únavového procesu. U daného režimu zatěžování, za spolupůsobení skluzové složky, je tento vliv podepřen rozdíly v schopnosti rozvoje smykové deformace podle výchozí krystalografické orientace zrn. Výsledky hodnocení strukturních změn identifikují několik rozdílů mechanismu poškozování u perlitické i austenitické struktury. U obou materiálových variant bylo po experimentálním zatěžování evidováno plastické přetvoření, změny pevnosti povrchových vrstev, i iniciace povrchových mikrotrhlin, odpovídající prvním stadiím provozního poškozování.

Souhrnně lze konstatovat, že experimentálně byl u obou strukturních variant materiálů srdcovek vyvolán degradační mechanismus, resp. jeho varianty, odpovídající výsledkům analýz provozního poškození. Plastický shakedown a ratcheting jsou dvě materiálové odezvy, způsobující iniciaci únavových trhlin. Oba mechanismy poškozování – nízkocyklová únava i ratcheting tvoří stabilní příspěvky únavového porušení. V případě zvýšeného rázového zatížení, tj. v kritických částech srdcovek, je situace komplikována specifickými změnami struktury, jako je destrukce lamelární stavby perlitu, a následně omezením rozvoje plasticity do objemu materiálu. Únavová životnost do iniciace trhlin pod uvedenými vlivy je tedy z hlediska standardně sledovaných materiálových parametrů řízená především mezí kluzu a celkovou schopností kumulace plastické deformace. Tvrdost povrchových vrstev je v daném procesu pouze ukazatelem míry jejich provozního zpevnění.

9. PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE

Z hlediska praktické aplikace je výzkum provozní odolnosti materiálů železničních křížení atraktivní především pro zvýšení životnosti, kdy principielně je reálné ovlivnění iniciačního stadia únavového procesu. Možnosti zvýšení bezpečnosti provozu jsou z hlediska materiálového výzkumu otázkou studia dalšího rozvoje poškození a vlivů na lomového chování oceli.

V rámci práce byly studovány obě tyto otázky u dvou typů materiálů pro železniční výhybkové konstrukce – u perlitické a austenitické oceli. Provedeno bylo vyhodnocení provozního chování a analýzy typických vad, které limitují životnost těchto materiálů. Experimentálně byly zjištěny parametry iniciace a rozvoje degradace pro definované podmínky zatěžování.

Jako konkrétní vědecký přínos možno vyjmout nové poznatky v oblasti výzkumu mechanismu poškozování. U perlitických variant testovaných ocelí se jedná především o informace o strukturních vlivech rozvoje povrchově iniciovaného poškození. U austenitické oceli byly identifkovány rozdílné mechanismy poškození v závislosti na poměru kontaktního tlaku a relativního skluzu. Z výsledků vyplývá rozsah těchto parametrů, který v daných podmínkách vyvolává průběžné odstraňování poškozených vrstev materiálu.

Ověřena byla metodika pro testování kontaktně-únavové odolnosti materiálů při evidenci podélného skluzu. Metodika byla rozšířena o hodnocení abrazivních úbytků; výsledky svědčí o dobré korelaci hodnocení zpevnění vs. opotřebení. Z hlediska výzkumu je podstatná možnost hodnocení časové závislosti těchto parametrů.

Pro praktické uplatnění možno vyjmout výsledky srovnávacích experimentálních analýz perlitických ocelí v různém stavu tepelného zpracování. Potvrzen a kvantifikován byl pozitivní vliv perlitizace těchto materiálů; nalezeny byly nejvýznamnější vlivy výchozích parametrů oceli.

Vyhodnocení provozních údajů opotřebení výhybkových konstrukcí v různých kombinacích materiálů, zatížení i geometrií kontaktu je příspěvkem pro přesnější definici degradace celé železniční tratě a s tím i možnost zefektivnění návrhů a údržby. Byly vyhotoveny podklady pro zefektivnění sledování nákladů během životního cyklu.

LITERATURA

[1] PUDA, B.; SMOLKA, M.; ZBOŘIL, J. *Projektovaní železničních výhybek podle podmínek užití*, březen 2009, sborník z konference "5. Forum kolajovej dopravy", Bratislava, ISBN 978-80-8897-350-8

[2] KOLEKTIV AUTORŮ *Výhybky a výhybkové konstrukce ČSD* – Ústí nad Labem, 1988, 60/769/88

[3] ŠKACH, A. A KOL. *Technická příručka traťového hospodářství ČSD* – Praha, 1971, OD-31-022-70-05-92

[4] PLÁŠEK, O. A SPOL. *Železniční stavby,* Brno, 2004, ISBN 80-214-2621-7

[5] JELÍNEK, V.; DEKASTELLO, J. Kapitola 8. - Konstrukce koleje a výhybek, Technické kvalitativní podmínky staveb ČD, 3. vydání, Praha, 2000

[6] KOUTNÍK, G. *Současnost a výhled defektoskopické kontroly kolejnic na koridorových tratích*, Vědeckotechnický sborník ČD č. 7/1999, ISSN 1214-9047

[7] KUMAR, S. *Reliability analysis and cost modeling of degrading systems*, Lulea University of Technology, 2008

[8] KOTRBA, A. *Minimalizace opotřebení jízdních obrysů kol dvojkolí železničních kolejových vozidel v provozních podmínkách depa kolejových vozidel*, disertační práce, D14804, Univerzita Pardubice, 2005

[9] Předpis ČD S 67 – Vady a lomy kolejnic, 1997

[10] Předpis Manoir Industries - Doporučení k provozování a manuál údržby Mn srdcovek

[11] Předpis DT 183/06 - Manuál k provozování a údržbě pro srdcovky z odlévané oceli s vysokým obsahem manganu

[12] HEYDER, R. *D4.5.5 - Guidelines for management of rail grinding*, TIP5-CT-2006-031415, project Innotrack, 2006

[13] KUMAR, S. *Impact of increase in axle loads on track and bridges on indian railways*,The institution of Permanent way engineers-Volume I., 2007 http://www.ipweindia.com/design/html/VOLUME%20-%20I%20-%20FINAL.pdf (accessed 22.1.2011)

[14] Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995, 2004

[15] The new UIC Cataluque of rail defects, Eisenbahningenieur, vol. 52, n. 9/2001, ISSN 0013-2810

[16] Předpis SŽDC S3 - Železniční svršek, 2008

[17] ČÁP, J.; FREIBAUER, L.; HLAVŇA, V. *Teorie vozidel*, ALFA Bratislava, 1985, 63-828-84

[18] ČSN EN 13232 - 1. *Železniční aplikace – Kolej – Výhybky a výhybkové konstrukce – Část 1 : Definice*, Praha: Český normalizační institut, 2004

[19] Předpis SŽDC (ČD) S 3/4 - Nedestruktivní zkoušení kolejnic, 1997

[20] *D4.5.3 – Fields of improvement in grinding practices as input for LCC evaluations*, projekt INNOTRACK, TIP5-CT-2006-031415, 2006

[21] HŘEBAČKA, M. *Organizace pro spoluráci železnic – OSŽD*, Vědeckotechnický sborník ČD č. 30/2010, ISSN 1214-9047

[22] TÁBORSKÝ, M. *Opatření snižující ojíždění kolejnic*, Železniční dopravní cesta 2010, Pardubice, 2010 http://www.szdc.cz/soubory/konference-a-seminare/zdc-2010/09sb.pdf (accessed 2.2.2011)

[23] ZBOŘIL, J. *Překování jazykových kolejnic 60E1A1 v kvalitě 350*HT, výzkumná zpráva, DT Prostějov, 2010

[24] SCHMIDOVÁ, E. *Provozní vlastnosti nově vyvinuté bainitické oceli pro lité součásti kolejového svršku*, habilitační práce, Pardubice, DFJP UPCE, 2004

[25] HOLZMANN, M.; DLOUHÝ, I.; ZBOŘIL, J. *Mechanické vlastnosti a lomové chování bainitické oceli na odlitky a její využití v srdcovkách výhybek*, Vědeckotechnický sborník ČD č. 16/2003, ISSN 1214-9047

[26] Technologický předpis pro perlitizaci výhybkových dílů, DT, Prostějov, 2005

[27] Technologický předpis pro perlitizaci pro DB, DT, Prostějov, 2005

[28] FREMUNT, P.; PODRÁBSKÝ, T. *Konstrukční oceli*, CERM Brno, 1996, ISBN 80-85867-95-8

[29] HALAMA, R. *Řešení elastoplastické napjatosti v bodovém styku dvou zakřivených těles pomocí MKP*, disertační práce, Ostrava, VŠB-TU, 2005

[30] HALAMA, R. *Experimentální poznatky a fenomenologické modelování cyklické plasticity kovů*, habilitační práce, Ostrava, VŠB-TU Fakulta strojní, 2009

[31] POKLUDA, J.; ŠANDERA, J. *Micromechanism of fracture and fatigue*, Brno, 2010, ISBN 978-1-84996-266-7

[32] ZBOŘIL, J. *Nové součásti tramvajových výhybek*, TechMat 2008, Svitavy, 2008, ISBN 978-80-7395-136-8

[33] NOVÁK, E.; SKALA, J. *Přínos železničních zkušebních okruhů k železničnímu výzkumu*, Vědeckotechnický sborník ČD č. 9/2000, ISSN 1214-9047

[34] ZBOŘIL, J.; KLEMENT, M.; HAVLÍČEK, P. *Využití skeneru HandyScan 3D EXAscan pro součásti železniční infrastruktury*, TechMat 09, Svitavy, 2009, ISBN 978-80-7395-046-0

[35] Předpis ČD Op 16 – Předpis o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci, 2005

[36] 60 684/94-O13 - Zásady pro ověřování nových konstrukcí a technologií v oblasti železničního svršku, ČD GŘ DDC O13, 1994

[37] 60 690/94-O13 - Zásady pro zpracování a vydávání technické dokumentace v oblasti železničního svršku, ČD GŘ DDC O13, 1994

[38] 54 432/96-DDC - Systém schvalování výrobků, materiálů a zařízení určených pro stavbu a udržování železničního svršku a spodku tratí Českých drah, ČD GŘ DDC O13, 1996

[39] GIRSH, G. *LCC Considerations for railway tracks: rails in focus*, Feroforum, Vídeň, 2008

[40] ESVELD, C. *Modern railway track*, TU Delft, 2001, ISBN 90-8004-324-3-3

[41] http://portal.railresearch.org.uk/RRUK/Shared%20Documents/workshop2008/a6.pdf (accessed 22.9.2010)

[42] FABÍK, R.; KLIBER, J.; KUREK, V. *Teoretické a technologické aspekty válcování kolejnic,* Konference METAL, Ostrava, 2000, ISBN 80-855988-48-8

[43] KASSA, E.; NIELSEN, J. *Dynamic train-turnout interaction in an extended frequency range using a detailed model of track dynamics*, Journal of sound and vibration 320 (2009) 893-914

[44] ZBOŘIL, J. *Zpružněné upevnění*, výzkumná zpráva, DT Prostějov, 2010

[45] http://www.voestalpine.com/nortrak/en/eng.ContentPar.37471.File.tmp/ /Turnout_Optimization.html (accessed 15.10.2010)

[46] PLÁŠEK, O.; HRUZÍKOVÁ, M.; SVOBODA, R. *Návrh zkušebního úseku s výhybkou na betonových pražcích s pružnou ložnou plochou*, Nová železniční technika, roč. 16, č. 5, 2008, ISSN 1210-3942

[47] MARKINE, V.L.; STEENBARGEN, M.J.M.M.; SHEVTSOV, I.Y. *Combatting RFC on switch points by tuning elastic track properties*, 8th International Conference on contact Mechamics and Wear of Rail/Weel Systém, Florencie, 2009, ISBN 978-88-904370-0-7

[48] PLETZ, M A SPOL. *dynamical wheel set – crossing model regarding impact, sliding and deformation*, 8th International Conference on contact Mechamics and Wear of Rail/Weel Systém, Florencie, 2009, ISBN 978-88-904370-0-7

[49] STEFFENS, D.; MURRAY, M. *Establishing meaningful results from models of railway track dynamic behaviour*, Proceedings 8th International Heavy Haul Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2005, ISBN 0-646-33463-8

[50] ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN, L.; REED-HILL, R.E. *Physical metallurgy principles*, Stampford, 2010, ISBN 978-0-495-43851-9

[51] PUŠKÁR, A. *Mikroplastickosť a porušenie kovových materiálov*, Bratislava, 1986, 71-030-86

[52] ŠKAPA, P. *Železniční doprava,* Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1521-3

[53] JARMILLO, J. A SPOL. *Effect of lubrication on wear and traction coefficient in a simulated rail/wheel contact*, 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Firenze, Italy, 2009, ISBN 978-88-904370-0-7

[54] Standard ARTC, Rail grinding – Turnouts, LPM 03, 2008

[55] Standard ARTC, Rail grinding standard for plain track, ETM-01-02, 2008

[56] PATRA, A. *Maintenance Decision Support Models for Railway Infrastructure using RAMS & LCC Analyses*, doctoral thesis, University of technology Lulea, 2009, 978-91-7439-023-0

[57] MACURA, P.; FIALA, A.; HALAMA, R. *Experimental analysis of contact stresses and contact fatigue*. In Sborník konference Inženýrská mechanika 2003. Svratka, AV ČR, Praha, 2003. ISBN 80-86246-18-3

[58] D4.3.1-F3 - Testing matrix definition, Initial definition of conditions for testing matrix, projekt INNOTRACK, TIP5-CT-2006-031415, 2006

[59] D4.4.2-Operational evaluation of an inspection demonstrator, projekt INNOTRACK, TIP5-CT-2006-031415, 2006

[60] BOSSO, N. A SPOL. *Methodology for determination of wheel-roller friction coefficient on 1/5 scaled test rig*, 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Firenze, Italy, 2009, ISBN 978-88-904370-0-7

[61] HORST, J.; HIENSCH, E. *Experimental evaluation of friction modifiers for integral network wheel/rail interface friction management*, 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Firenze, Italy, 2009, ISBN 978-88-904370-0-7

[62] KIRCHNER, I. *Standard pro monitoring výhybek v trati*, předpis DT, Prostějov, 2009

[63] RINGSBERG, J. *Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation*, International Journal of Fatigue 23, 2001

[64] WIEST, M. A SPOL. *Assessment of methods for calculating contact pressure in wheel-rail/switch contact*, Wear 265, 2008, ISSN 0043-1648

[65] XIE, G., IWNICKI, S. *Calculation of wear on a corrugated rail using a three-dimensional contact model*, Wear 265, 2008, ISSN 0043-1648

[66] SHEVTSOV, I., MARKINE, V., ESVELD, C. *Design of railway wheel profile taking into account rolling contact fatigue and wear*, Wear 265, 2008, ISSN 0043-1648

[67] TAKIKAWA, M., IRIYA, Y. *Laboratory simulations with twin-disc machine on head check*, Wear 265, 2008, ISSN 0043-1648

[68] POINTNER, P. *High strength rail steels - The importance of material properties in contact mechanics problems*, Wear 265, 2008, ISSN 0043-1648

[69] VUONG, T. A SPOL. *Investigation of a transitional wear model for wear prediction and control in rolling contact*, 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Firenze, Italy, 2009, ISBN 978-88-904370-0-7

[70] WANG, W.J. A SPOL. *Study on the adhesion behaviour of wheel/rail under dry and water conditions*, 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Firenze, Italy, 2009, ISBN 978-88-904370-0-7

[71] JOHANSSON, G.; EKH, M.; RUNESSON, K. *Computational modeling of inelastic large ratcheting strains*, International Journal of Plasticity 21, 2005, ISSN 0749-6419

[72] ČÁP, J. *Teoretický rozbor tečných a interaktivních sil ve styku kolo-kolejnice*, Scientific papers of the University Pardubice, Series B - The Jan Perner Transport Faculty 5, 1999, ISSN 1211- 6610

[73] ZHAO, X. A SPOL. *The Dynamic Stress State of the Wheel-Rail Contact*, Proceedings of the 2nd IASME / WSEAS International Conference on Continuum Mechanics (CM'07), Portoroz, Slovenia, 2007

[74] VIDAUD, M.; ZWANENBURG, W. *Current situation on rolling contact fatique – a rail wear phenomenon*, Conference paper of 9th Swiss Transport Research Conference, Monte Verita/Ascona, 2009

[75] SU, X.; CLAYTON, P. *Surface-initiated rolling contact fatique of pearlitic and low carbon bainitic steels*, Wear 197, 1996, ISSN 0043-1648

[76] ZWANENBURG W. *Modelling degradation processes of switches & crossings for maintenance & renewal planning on the swiss railway network*, thése n. 4176, École polytechnique fédérale de Lausanne, 2009

[77] KUMAR. S. *Reliability analysis and cost modeling of degrading systems*, doctoral thesis, University of technology Lulea,2008, ISSN 1402-1544

[78] Protokol č. Z – 115.1/11 – Měření tvrdosti dle Vickerse pod nízkým zatížením, VÚHŽ Dobrá, 2011

[79] TÁBORSKÝ, M. *Opatření snižující ojíždění kolejnic*, Železniční dopravní cesta 2010, Pardubice, 2010

[80] SCHOECH, W. *Rail maintance – at the core of vehicle rail interaction*, Conference on railway engineering, Perth, 2008,

[81] D4.1.4 – Rail degradation algorithms, projekt INNOTRACK, TIP5-CT-2006-031415, 2006

[82] GIRSH, G.; HAYDER, R.; KUMPFMULLER, N.; BELZ, R. *Porovnání životních nákladů normálních kolejnic a kolejnic s tvrzenou hlavou*, Railway Gazette International, 2006, ISSN 0373-5346

[83] D4.1.2 – Interim rail degradation algorithms, projekt INNOTRACK, TIP5-CT-2006-031415, 2006

[84] REDDY, V. *Development of an integrated model for assessment of operational risks in rail track*, Queensland University of Technology, doctoral thesis, 2007

[85] HEYDER, R.; GROHMANN, H. *Schleifversuch Wurzburg – Erarbeitung von spezifikationen zur Vermeidung von Head Checks*, Glasers Annalen 132, 2008

[86] D4.1.5 - Definitive guidelines on the use of different rail grades, projekt INNOTRACK, TIP5-CT-2006-031415, 2006

[87] ANDRADE, A. *Renewal decisions from a Life-cycle Cost (LCC) perspective in railway infrastructure: An integrative approach using separate LCC models for rail and ballast components*, Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa, Lisabon, 2008

[88] OSSBERGER, H.; BISHOP, G. *Life cycle cost-driven innovations for heavy haul turnouts*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 224, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, ISSN 0954-4097

[89] REDDY, V. A SPOL. *Modelling and analysis of rail maintence cost*, Int. J. Production Economics 105, 2007

[90] MUSTER, H. A SPOL. *Rail rolling contact fatigue. The performance of naturally hard and head-hardened rail in track*, Wear 191, 1996, ISSN 0043-1648

[91] LI, Z. *Squats on railway rails*, Wheel-rail interface handbook, JSME, 2009

[92] JAHED, H. A SPOL. *A numerical optimization technique for design of wheel profiles*, Wear 264, 2008, ISSN 0043-1648

[93] LATA, M. *Konstrukce kolejových vozidel II*, Univerzita Pardubice, 2004, ISBN 80-7194-696-6

[94] IZER, J. *Kolejové vozy* – dodatek, ALFA Bratislava, 1988, 063-742-88

[95] SCHMIDOVÁ, E. A SPOL. *Výzkum v oblasti vývoje nových materiálů kol se zvýšenou odolností proti zjištěným degradačním procesům* - zpráva pro "Výzkumné centrum kolejových vozidel", 2010, Pardubice, A12-01/2010-Upa

[96] SCHMIDOVÁ, E. A SPOL. *Problematika styku kolo-kolejnice se zaměřením na materiál kol* - zpráva pro "Výzkumné centrum kolejových vozidel", 2007, Pardubice, zpráva č. A5-U1a-01/2007

Seznam obrázků

Obr. 1 Odhad významnosti výrobců železničních výhybek v roce 2010
Obr. 2 Model degradace železniční trati [7]
Obr. 3 Železniční výhybka
Obr. 4 Kontaktně únavové vady železničního svršku [12]
Obr. 5 Princip tzv. samočistícího efektu
Obr. 6 Specifikace broušení kolejnic u DB v oblouku od 500 do 5 000m [20]
Obr. 7 Vliv struktury perlitu na pevnost materiálu [40]
Obr. 8 Perlitizovaná kolejnice 60E1 [39]
Obr. 9 Perlitizační linka (kalící stroj HPS-01)
Obr. 10 Diagram IRA austenitické manganové oceli [28]
Obr. 11 Mikrostruktura – vznik tzv.dlouhých jehlic a jemného perlitu [28]
Obr. 12 Schéma skluzového pásu
Obr. 13 Stadium iniciace a šíření únavové trhliny
Obr. 14 Shakedown mapa s vyznačením RS (rolling/sliding) [30]
Obr. 15 Schéma hysterezního chování cyklického změkčení mat. před a po začátku ratchetingu [31]
Obr.16 Měření ocel. Pravítkem a klínkem
Obr. 17 Prezentace z vyhodnocení 3D skenování
Obr. 18 Porovnání řezů – elektronický srdcovkový profiloměr a Skener HandyScan 3D EXAscan
Obr. 19 Zatížení výhybky ze simulace průjezdu modelem výhybky na CHARMEC
Obr. 20 Jednoosé cyklické namáhání z modelu (a) a porovnání mezi analýzou a experimentálními daty(b).[71]
Obr. 21 Napěťově deformační hysterezí průběh během 50ti cyklů v ose Z (a), v ose X (b) a určení souřadného systému modelu hrotu srdcovky (c) [71]
Obr. 22 Součásti železniční výhybky z nichž byly odebrány vzorky
Obr. 23 Měření závislosti hloubky poškození a orientace trhlin
Obr. 24 Charakteristické větvení únavového poškození mimo dosah plastické zóny (zv.1000x)
Obr. 25 Měření deformačních stupňů trhliny
Obr. 26 Iniciace trhlin v souvislosti s výskytem inkluzí (zv.1000x)
Obr. 27 Rozsáhlé staženiny v hlavě srdcovky
0br. 28 Řediny austenitické mangan. oceli propojené trhlinami vlivem zatížení
Obr. 29 Analyzovaný řez srdcovky z austenitické manganové oceli (poškození povrchu)
Obr. 30 Postup deformace v závislosti na různých krystalografických orientací zrna

Obr. 31 Rozdíl struktury povrchové vrstvy – tvorba šupin vs. plynulý rozvoj deformace do profilu (zv. 250x)
Obr. 32 Rozdělení srdcovek základního souboru dle řádu zatížení a geometrie výhybky
Obr. 33 Průběh míry ojetí (degradace) u srdcovek se zatížením větším než 60 mil. hrt.
Obr. 34 Míry ojetí (degradace) u srdcovek při odhadovaném zatížení 60 mil. hrt
Obr. 35 Průběh míry ojetí (degradace) u srdcovek s lineárním a logaritmickým předpokladem
Obr. 36 Průběh degradace (svislé ojetí) u prototypové srdcovky na VNIŽ
Obr. 37 Degradace (svislé ojetí) srdcovek tratí dle požadavků na údržbu ARTC
Obr. 38 Změna poloměru při odvalování pro různé úhly úklonu kolejnice [92]
Obr. 39 Napětí v kontaktu kolo kolejnice pro vybrané parametry
Obr. 40 Stand DFJP (experimentální zařízení simulace podmínek kolo-kolejnice)
Obr. 41 Způsob umístění a vyjímání vzorků z nosiče vzorků
Obr. 42 Součásti železniční výhybky z nichž byly získány vzorky
Obr. 43 Zkoušené vzorky materiálů
Obr. 44 Princip měření průběhu tvrdosti na hlavě kolejnice
Obr. 45 Průběh tvrdosti na hlavách profilů kolejnic
Obr. 46 Časový průběh povrchového zpevnění testovaných materiálů - sada I
Obr. 47 Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada I
Obr. 48 Časový průběh povrchového zpevnění testovaných materiálů - sada II
Obr. 49 Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada II
Obr. 50 Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada II [100]
Obr. 51 Mikrostruktura vzorku „I-6“ (R260 – zv. 5000x)
Obr. 52 Mikrostruktura vzorku „I-5“ - R260 perlitizováno
Obr. 53 Vzorek „II-1“ (350HT – zv. 3000x)
Obr. 54 Poškození iniciované deformačně usměrněným proeutektoidním feritem Vzorek „II-5“ (R260 perlitizováno – zv. 1500x)
Obr. 55 Vzorek „II-5“ (R260 perlitizováno – zv. 10 000x) - vydrolení materiálu v místě výskytu proeutektoidního feritu u zatěžovaného povrchu
Obr. 56 Vzorek „II-5“ (R260 perlitizováno – zv. 10 000x) - postup mikrotrhliny proeutektoidním feritem
Obr. 57 Vzorek „II-5“ (identifikace inkluzí, působících při iniciaci mikrotrhlin – zv. 250x)
Obr. 58 Vzorek „II-6“ (Měření dosahu deformační zóny – zv. 2000x)
Obr. 59 Časový průběh povrchového zpevnění testovaných materiálů - sada III

Obr. 60 Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada III
Obr. 61 Rozvoj kontaktní plochy při experimentálním zatěžování austenitické oceli
Obr. 62 Hmotnostní úbytky sady III
Obr. 63 Časový průběh povrchového zpevnění testovaných materiálů - sada IV
Obr. 64 Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada IV
Obr. 65 Zkušební vzorky sady IV po vyjmutí z nosiče
Obr. 66 Hmotnostní úbytky sady IV
Obr. 67 Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem - sada III a IV
Obr. 68 Průběh tvrdosti testovaných materiálů v závislosti na hloubce pod povrchem – vzorky Mn z trati a sady II.
Obr. 69 Vzorek „III-1“(13-Mn-B – rozvoj trhlin)
Obr. 70 Vzorek III-8 (13-Mn-B – rozvoj trhlin – zv. 100x a 500x)
Obr. 71 Vzorek IV-1 (13-Mn-B – postupný rozvoj trhlin – zv. 32x a 100x)
Obr. 72 Vzorek IV-8 (13-Mn-B – postupný rozvoj trhlin)
Obr. 73 Charakteristický způsob degradace kolejnice
Obr. 74 Logaritmická míra 45° bočního ojetí kolejnice z R260 a 350HT [83]
Obr. 75 Hloubka trhlin z RCF v závislosti na poloměru oblouku trati pro vybrané perlitické materiály [68]
Obr. 76 Závislost počtu cyklů do iniciace trhliny u perlitických materiálů z experinetů na Test rig VAS [86]
Obr. 77 Šíření trhlin v kolejnicových perlitických materiálech
Obr. 78 Průběh míry ojetí (degradace) u srdcovek se zatížením větším než 60 mil. hrt
Obr. 79 Výpočet LCC pro 100km železniční trati [87]
Obr. 80 Kolejové pole délky 25m a výhybka J60-1:12-500
Obr. 81 Způsoby definování železniční výhybky
Obr. 82 Faktory ovlivňujících degradaci výhybky

Seznam tabulek

Tab. 1 Odhad rozšířenosti typizace soustav železničního svršku dle délky železniční trati

Tab. 2 Konstrukce železniční trati s kolejovým ložem

Tab. 3 Konstrukce železniční trati bez kolejového lože

Tab. 4 Charakteristické typy kolejových vozidel zatěžujících železniční výhybku dle typu trati

Tab. 5 Typy nejvyskytovanějších vad u DB

Tab. 6 Nejvýznamnější zkušební železniční okruhy

Tab. 7 Experimentální zařízení simulující kontakt kolo-kolejnice

Tab. 8 Rozdělení srdcovek základního souboru dle geometrie

Tab. 9 Rozdělení srdcovek základního souboru dle řádu zatížení koleje

Tab. 10 Rozdělení srdcovek výběrového souboru dle geometrie

Tab. 11 Rozdělení srdcovek výběrového souboru dle řádu zatížení koleje

Tab. 12 Rozdělení srdcovek výběrového souboru dle typu konstrukce srdcovky dle dodavatele

Tab. 13 Rozdělení srdcovek výběrového souboru dle materiálu srdcovky

Tab. 14 Porovnání lineárního a logaritmického průběhu ojíždění

Tab. 15 Zkušenosti z USA k životnosti kolejnic dle jejich poloměru oblouku [76]

Tab. 16 Velikost kontaktní plochy a Hertzova tlaku mezi kolem a částmi železniční výhybky

Tab. 17 Srovnání parametrů v kontaktu kolo-kolejnice a kolo-nosič vzorků

Tab. 18 Charakteristiky kolejnic pro odběr zkušebních vzorků

Tab. 19 Charakteristika zkoušených vzorků materiálů

Tab. 20 Velikost kontaktní plochy a Hertzova tlaku mezi kolem a nosičem vzorků

Tab. 21 Průběh zatěžování při zjišťování povrchové tvrdosti sady I

Tab. 22 Průběh zatěžování při zjišťování povrchové tvrdosti sady II

Tab. 23 Průběh zatěžování při zjišťování povrchové tvrdosti sady III

Tab. 24 Hmotnostní úbytky sady III

Tab. 25 Průběh zatěžování při zjišťování povrchové tvrdosti sady IV

Tab. 26 Hmotnostní úbytky sady IV

Tab. 27 Příklad výpočtu LCC železniční výhybky

Seznam příloh

Příloha A Výrobci železničních výhybek
Příloha B Železniční tratě v EU a ve světě
Příloha C Rozdělení železničních tratí
Příloha D Kolejová vozidla
Příloha E Výhybky a výhybkové konstrukce
Příloha F Vady součástí železniční výhybky
Příloha G Experimentální zařízení simulující kontakt kolo/kolejnice
Příloha H Materiály pojížděných součástí železničního svršku
Příloha I Atesty zkoušených materiálů
Příloha J Mikroskopické hodnocení perlitické oceli z trati
Příloha K Mikroskopické hodnocení austenitické oceli z trati
Příloha L Železniční profily kolejnic
Příloha M Výrobní výkresová dokumentace
Příloha N Povrchové tvrdosti vzorků sady I, II, III a IV
Příloha O Mikrostruktura zkoušených materiálů – neleptané vzorky
Příloha P Mikrostruktura zkoušených materiálů – leptané vzorky
Příloha Q Mikrostruktura - 13-Mn-B
Příloha R Makroskopické hodnocení perlitické oceli z experimentu
Příloha S Makroskopické hodnocení austenitické oceli z experimentu
Příloha T Charakteristiky jednoduchých železničních výhybek
Příloha U Označování železničních výhybek
Příloha V Faktory ovlivňující degradaci železniční výhybky
Příloha W Hmotnostní skupiny kolejnic
Příloha X Typy železničních srdcovek

SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

[1] SCHMIDOVÁ, E.; ŠVANDA, P.; ZBOŘIL, J. *Jakost svaru vysokopecní oceli při spojení s konstrukční ocelí mechanickým zámkem*., konference „Opotřebení, spolehlivost, diagnostika 07“, Univerzita Obrany Brno, říjen 2007, ISBN 978-80-7231-294-8

[2] SCHMIDOVÁ, E.; ZBOŘIL, J.; ŠVANDA, P. *Influence of bainitic steel inner inperfections on resistivity against fretting fatigue study*, Polytechnical University Publishing House, Saint-Peterburg, listopad 2007, ISBN 978-57-4221-784-8

[3] SCHMIDOVÁ, E.; ZBOŘIL, J. *Non-metallic inclusions influence on the durability and reliability of bainitic steels under fatigue loading*, konference „Reliability, Safety and Diagnostics of Transport Structures and Means 2008“, Pardubice - Lazne Bohdanec, září 2008, ISBN 978-80-7395-096-5

[4] ZBOŘIL, J. *Nové součásti tramvajových výhybek*, konference „TechMat 08“, Svitavy, listopad 2008, ISBN 978-80-7395-136-8

[5] ZBOŘIL, J. *Optimalizace nových tramvajových a železničních jazyků, konference „Inovativne technologie vo zvárani a NDT*“, Kálnica, prosinec 2008, ISBN 978-80-8929-602-6

[6] PUDA, B.; SMOLKA, M.; ZBOŘIL, J. *Projektovaní železničních výhybek podle podmínek užití*, konference „5. Forum kolajovej dopravy“, Bratislava, březen 2009, ISBN 978-80-8897-350-8

[7] SCHMIDOVÁ, E.; ZBORIL, J. *Classification methodology of welded joints quality of high-strenght steel*, Production engineering, Novosibirsk, červen 2009, ISBN 978-5-7782-1165-0

[8] ZBOŘIL, J.; KLEMENT, M.; HAVLÍČEK, P. *Využití skeneru HandyScan 3D EXAscan pro součásti železniční infrastruktury*, TechMat 09, Svitavy, listopad 2009, ISBN 978-80-7395-046-0

[9] ZBOŘIL, J. *Možnosti experimentálního výzkumu degradace železniční výhybky*, konference „TechMat 10“, Svitavy, listopad 2010, ISBN 978-80-7395-324-9

[10] HAVLÍČEK, P.; ZBOŘIL, J. *Nové odlevané prvky v oblasti železniční infrastruktury a proces jejich návrhu*, konference „TechMat 10“, Svitavy, listopad 2010, ISBN 978-80-7395-324-9

[11] SCHMIDOVÁ, E.; ŠVANDA, P.; ZBOŘIL, J.; KONEČNÝ, M.; KYNCL, Z.; TOMANOVIČ, J.; HYLSKÝ, J. *Výzkum v oblasti vývoje nových materiálů kol se zvýšenou odolností proti zjištěným degradačním procesům* - zpráva pro "Výzkumné centrum kolejových vozidel", prosinec 2010, projekt MŠMT 1M0519, Pardubice, zpráva č. A12-01/2010-Upa