

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**METODIKA HODNOCENÍ STAVU
PRUŽNÝCH SVĚREK SKL14
V PROVOZOVANÝCH TRATÍCH**

Ing. Marek Pětioký

Dizertační práce

2020

Doktorand

Ing. Marek Pětioký

Studijní program

P3710 Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor

3706V005 Dopravní prostředky a infrastruktura

Školitel

doc. Ing. Bohumil Culek, Ph.D.

Školitel specialista

-

Školící pracoviště

Katedra dopravního stavitelství

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.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 22. srpna 2020

Marek Pětioký

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především svojí rodině, a to za bezmeznou podporu a trpělivost. Dále patří mé poděkování školiteli, doc. Culkovi, za jeho čas a příkladné vedení. Bez jeho pomoci a odborných rad by tato práce nevznikla. V neposlední řadě bych rád poděkoval odborníkům, kteří se podíleli na vzniku jednotlivých dílčích částí, jmenovitě doc. Tomkovi, prof. Schmidové, prof. Kalendové, Ing. Hanusovi, Ing. Kohlovi, Ing. Vnenkovi, p. Gazárkovi, Ing. Hartmannovi a Ing. Dubskému.

Marek Pětioký

Anotace

Práce analyzuje problémy týkající se pružných svěrek Skl14, především korozní úbytky materiálu pružných svěrek na železničních přejezdech, případně v tunelech a jejich vliv na velikost svěrné síly a dále analyzuje praskání pružných svěrek Skl14 v obloucích malého poloměru. Cílem práce je nalezení metodiky, která by vedla k jasnému rozhodování o výměně, případně ponechání pružných svěrek v koleji a k analyzování příčin problémů.

Klíčová slova

pružná svěrka Skl14, Vossloh, koroze, tenzometr, fraktografie, metalografie, železniční přejezd, metoda konečných prvků, zrychlení, lom

Title

Methodology for assessing the condition of tension clamps Skl14 in operated lines

Annotation

The thesis analyzes problems related to tension clamps Skl14, especially corrosive losses of tension clamps material at railway crossings or in tunnels and their influence on the clamping force. The aim of this work is to find a methodology that would lead to a clear decision about replacement, eventually leaving flexible clamps in the track and analyzing the causes of problems.

Keywords

Tension clamp Skl14, Vossloh, corrosion, strain gauge, fractography, metallography, level crossing, finite element method, acceleration, crack

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
1 Úvod	11
1.1 Problematické úseky na železniční síti ČR.....	13
1.1.1 Železniční přejezd Dobříň.....	16
1.1.2 Železniční přejezd v žst. Kolín.....	18
2 Cíle dizertační práce	21
2.1 Cíle práce.....	21
3 Současný stav poznání	22
3.1 Měření železničního svršku.....	22
3.2 Korozní upevnění	23
3.2.1 Svěrky Skl bez speciální povrchové úpravy	23
3.2.2 Povrchová úprava svěrek Skl - KTL	24
3.2.3 Povrchová úprava svěrek Skl - Sherard	24
3.2.4 Povrchová úprava svěrek Skl - Vossloh Protect.....	25
3.3 Modelování sestavy upevnění W14	25
3.4 Legislativa vztahující se k pružným svěrkám Vossloh.....	28
3.4.1 Technické podmínky dodací č. 1/SŽDC/07 [3]	28
3.4.2 Obecné technické podmínky pro pružné svěrky a spony [4]	28
3.4.3 Evropské normy EN 13481	29
3.4.4 Evropské normy EN 13146	30
3.4.5 Evropská norma EN ISO 9227 [10]	31
3.4.6 Shrnutí legislativy.....	32
3.5 Železniční přejezdy jako součást železničního svršku	32
3.5.1 Přejezdová konstrukce.....	32
3.5.2 Systém upevnění využívající svěrky Skl14	35
3.5.3 Materiálové charakteristiky	36
3.5.4 Chování systému upevnění W14 v provozu	36
3.5.5 Pružné svěrky Skl14.....	37
4 Ověření vlastností svěrek Skl14	40
4.1 Tahová zkouška.....	40
4.1.1 Příprava vzorků.....	40
4.1.2 Postup měření.....	40
4.1.3 Výsledky	42
4.2 Testy na únavu pružné svěrky Skl14.....	43
4.2.1 Příprava vzorků.....	44
4.2.2 Postup měření.....	44

4.2.3	Výsledné cykly do porušení.....	46
4.2.4	Konstrukce únavové křivky.....	46
4.2.5	Transformace únavové křivky	47
4.3	Metalografie pružné svěrky Skl14	50
4.3.1	Charakteristiky a zkoušky pružných svěrek Skl14.....	50
4.3.2	Příprava vzorku.....	51
4.3.3	Zkoumání světelným mikroskopem	51
4.3.4	Zkoumání elektronovým mikroskopem.....	52
4.3.5	Zkouška tvrdosti dle Vickerse	54
4.3.6	Vyhodnocení metalografie pružné svěrky	55
4.4	Simulace koroze na vzorcích v laboratoři.....	55
4.4.1	Zkouška neutrální solnou mlhou dle ČSN EN ISO 9227	55
4.4.2	Ponorová zkouška v roztoku elektrolytu.....	57
4.4.3	Vyhodnocení koroze na vzorcích	59
4.5	Svěrná síla svěrky Skl14	60
4.5.1	Měření přípravkem Vossloh.....	61
4.5.2	Měření dle normy ČSN EN 13146-7	63
4.5.3	Závislost svěrné síly na průměru tloušťky drátu svěrek a hmotnosti pružných svěrek	65
5	MKP analýza napětí pružné svěrky SKL14	68
5.1.1	Model MKP – geometrie.....	68
5.1.2	Model pružné svěrky.....	69
5.1.3	Kontakty	69
5.1.4	Uchycení	70
5.1.5	Síť	71
5.1.6	Stanovení statického předpětí svěrky Skl 14 (Von Mises) při utahování	72
5.1.7	Stanovení dynamického napětí od provozu u svěrky Skl14 (Von Mises)	78
6	Metodika hodnocení stavu pružných svěrek SKL14 v provozovaných tratích.....	81
6.1	Návrh metodiky.....	81
6.1.1	Hodnocení odezvy na statické předpětí.....	83
6.1.2	Hodnocení lomu svěrky	85
6.1.3	Hodnocení koroze.....	85
6.1.4	Hodnocení odezvy na dynamické zatížení	85
6.1.5	Hodnocení zrychlení.....	89
7	Ověření metodiky	91
7.1	Volba hodnoceného úseku	91
7.2	Fraktografická analýza	91
7.3	Hodnocení odezvy na statické předpětí	97
7.3.1	Hodnocení zdvihu.....	97
7.3.2	Hodnocení napětí.....	99

7.3.3	Hodnocení svěrné síly.....	104
7.4	Hodnocení odezvy na dynamické zatížení	111
7.4.1	Identifikace povrchového napětí na svěrci od provozu	111
7.4.2	Identifikace svislých kolových a příčných vodících sil.....	119
7.4.3	Identifikace svislých a příčných posunů	125
7.4.4	Hodnocení únavového poškození.....	132
7.5	Hodnocení zrychlení.....	136
7.6	Shrnutí výsledků ověření metodiky.....	144
8	Závěr	145
8.1	Ověření vlastností svěrek Skl14	145
8.2	MKP analýza napětí pružné svěrky Skl14	145
8.3	Metodika hodnocení stavu pružných svěrek Skl14 v provozovaných tratích.....	146
8.4	Ověření metodiky	148
	Summary	150
	Literatura	152
	Vlastní publikace.....	156
8.5	Publikační činnost doktoranda související s tématem dizertační práce.....	156
8.6	Publikační činnost doktoranda související nepřímo s tématem dizertační práce.....	157
	Seznam příloh.....	158

Seznam symbolů a zkratk

1.1.1.1 Latinská písmena

a_{ef}	[m.s ⁻²]	efektivní hodnota zrychlení kmitání
$a(t)$	[m.s ⁻²]	okamžitá hodnota zrychlení kmitání
A	[%]	tažnost
C	[-]	konstanta únavové křivky
E	[Pa]	modul pružnosti v tahu
f_y, σ_y	[Pa]	mez kluzu
f_u, σ_b, R_m	[Pa]	mez pevnosti
F	[N]	síla
f	[Hz]	frekvence
m	[-]	sklon únavové křivky
N_f	[-]	počet cyklů do poruchy
N	[-]	počet
$R_{p0,2}$	[Pa]	smluvní mez pružnosti
s	[m]	vlnová délka vady
S_0	[mm ²]	plocha
t	[s]	čas
T	[-]	perioda
v	[km.h ⁻¹]	rychlost
Z	[%]	kontrakce

1.1.1.2 Řecká písmena

σ	[Pa]	napětí
σ_I, σ_{II}	[Pa]	hlavní napětí
σ_{red}	[Pa]	redukované napětí, von Mises napětí
σ_a	[Pa]	rozkmit na dané stř. hodnotě
σ_m	[Pa]	stř. hodnota rozkmitu
σ_e	[Pa]	mez únavy
σ_w	[Pa]	smluvní mez únavy při nulové stř. hodnotě

1.1.1.3 Zkratky

DFJP	Dopravní fakulta Jana Pernera
FFT	Rychlá Fourierova transformace
GPK	Geometrické parametry koleje
KTL	Antikorozní povrchová úprava pružných svěrek. Katodové metoda antikorozní ochrany kovových součástí máčením v lázni

MKP	Metoda konečných prvků
OTP	Obecné technické podmínky
Q	Svislá kolová síla
RMS	Root Mean Square – efektivní střední hodnota
SW	Software
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty, státní organizace (Správa železnic, státní organizace) nově
TPD	Technické podmínky dodací
USP	Podpražcové podložky
Y	Příčná vodící síla
Žst.	Železniční stanice

1 Úvod

Železniční doprava má z dopravního pohledu velmi důležitou úlohu. Slouží k přepravě zboží a materiálu na velké vzdálenosti a v posledních letech také velmi narostl význam příměstské osobní dopravy. Z pohledu nákladní dopravy je snaha o převedení přepravy zboží ze silnic na ekologičtější způsoby přepravy, tedy také na železnici. Vzhledem k rostoucím intenzitám železniční dopravy je třeba mít železnici bezpečnou a spolehlivou, pokud možno s co nejmenším počtem výluk. Celková spolehlivost a bezpečnost železniční trati je dána spolehlivostí a bezpečností jednotlivých objektů (mostní objekty, propustky, zhlaví, širá trať, atp.). Každý z objektů je tvořen jednotlivými konstrukčními částmi, které bezprostředně ovlivňují spolehlivost a bezpečnost daného objektu. Jedním z parametrů určování spolehlivosti železniční svršku jako součásti železniční trati je tzv. geometrická poloha koleje. Ta závisí mimo jiné na vlastním upevnění kolejnice k pražcům. Jedná se o konstrukci, která je extrémně dynamicky namáhána. V práci je věnována pozornost pružnému upevnění typu Vossloh s užitím svěrek SKL14. Užití tohoto typu svěrek je v současné době nejvíce rozšířeno v rámci koridorů v ČR. Vzhledem k poruchám tohoto typu svěrek byly ve spolupráci se SŽDC identifikovány problematické úseky na železniční síti ČR. Mezi identifikované problematické úseky (úseky, které vykazují poruchy upevnění Vossloh s užitím svěrek SKL14), byly zařazeny železniční přejezdy s celopryžovými konstrukcemi, úseky s oblouky malých poloměrů ($R < 400$ m) a vybrané železniční tunely.

Železniční přejezdy jsou nedílnou součástí dopravní infrastruktury. Vzhledem k faktu, že na železničním přejezdu dochází k přímému styku pozemní komunikace s železniční tratí, je obecnou snahou v rámci modernizací železničních tratí v České republice, minimalizovat toto úrovněvé křížení náhradou za křížení mimoúrovňové (nadjezdy/podjezdy). Vzhledem k vysokým nákladům spojeným s budováním mimoúrovňových křížení byly tyto změny realizovány převážně na hlavních koridorech v ČR. V ostatních případech bylo ponecháno stávající úrovněvé křížení (byť modernizované). Celkový počet přejezdů k 31. 12. 2018 činil 7 858. Na našich tratích proto najdeme velmi mnoho původních železničních přejezdů, resp. nových železničních přejezdů, na kterých byly při prováděných modernizacích, rekonstrukcích či novostavbách změněny jejich přejezdové konstrukce. Slabým místem těchto úrovněových přejezdů je koroze jednotlivých komponentů (zejména pružných svěrek upevňovacího systému), které jsou osazeny v železničním přejezdu. Mezi příčiny tohoto problému můžeme zařadit posyp pozemních komunikací chemickými prostředky a zvýšenou vlhkost, která je způsobena zakrytím součástí železničního upevnění konstrukcí železničního přejezdu, a to zejména u celopryžových přejezdových konstrukcí. Dalším důležitým faktorem, který přispívá ke zvýšenému koroznímu napadení svěrek, je jejich dynamické namáhání, při kterém dochází k narušování ochranných vrstev (pokovení, ochrana barvou, ochrana pryskyřicí, atp.) a následnému pronikání koroze do hloubky materiálu.

Ke zvýšenému koroznímu napadení prvků železničního svršku dochází také v železničních tunelech, kde jsou vhodné podmínky pro vznik koroze. Největším aktivátorem koroze

v železničních tunelech je vlhkost a případně také pronikání roztoků s látkami, které korozi urychlují (např. sůl).

Dalším nezanedbatelným problémem týkajícím se pružných svěrek jsou únavové lomy jejich ramen. Na železniční síti ČR je možné definovat úseky, kde dochází k tomuto jevu ve zvýšené míře. Důsledkem je zhoršení geometrických parametrů koleje, zejména rozchodu. Jedná se především o úseky s oblouky malých poloměrů ($R < 400$ m), které jsou zatíženy vysokou měrou kombinované dopravy (osobní a nákladní).

Dizertační práce se zabývá svěrkami Skl14, které jsou součástí nejčastěji používaného systému upevnění na koridorových tratích v ČR. Řešena je problematika pružných svěrek Skl14 vystavených různým provozním podmínkám.

Zimní údržba pozemních komunikací

Je zřejmé, že nejvýznamnějším faktorem, který ovlivňuje korozi materiálu železničního svršku v prostoru železničních přejezdů, je chemický posyp pozemních komunikací. Posyp pozemních komunikací chemickými prostředky je v prostoru železničního přejezdu s kolejovými obvody zakázáno [1], ale sůl se na kolech automobilů přesto na železniční přejezd dostane. Vzhledem k faktu, že v prostoru železničního přejezdu nedochází k následnému oplachu soli deštěm (chráněno rohoží), zároveň se zde udržuje vlhkost v podobě vodních par, jsou klimatické podmínky velmi agresivní. Technologie zimní údržby jsou popsány v [2]. K chemickému posypu pozemních komunikací je využíván chlorid sodný (NaCl) nebo chlorid vápenatý (CaCl_2). NaCl se používá při teplotách kolem -5 °C, CaCl_2 pak při teplotách kolem -15 °C. Mezi těmito teplotami se používá směs obou chloridů. Při odstranění sněhové pokrývky je maximální dávka $20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Posyp je možno opakovat dávkou $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Při odstraňování náledí nebo ujetých sněhových vrstev nemá pak dávka posypového materiálu překročit $60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ při jednom zásahovém dni. K chemickému ošetření pozemních komunikací se mohou také použít roztoky rozmrazovacích prostředků, a to v případě, že se nepředpokládá pokles teploty pod -3 °C. Používají se roztoky posypových solí (solanky) o koncentraci 18 – 21 %. Je tedy patrné, že při zimní údržbě jsou koncentrace agresivních materiálů vysoké.

1.1 Problematické úseky na železniční síti ČR

V rámci železniční sítě ČR je možné definovat traťové úseky, kde se vyskytuje vyšší míra poškození pružných svěrek, případně poškození ostatními součástmi železničního svršku. Jedná se především o zatížené tratě s oblouky malých poloměrů ($R < 400\text{m}$) vyznačující se lomy ramen pružných svěrek, železniční přejezdy s celopryžovými konstrukcemi (koroze) a železniční tunely (koroze).

V případě úseků s oblouky malých poloměrů dochází k situacím, kdy se vlivem provozu vyskytnou skluzové vlny, opotřebují se úhlové vodící vložky a podložky pod patu kolejnice a následně dochází k poškozením jednotlivých součástí upevnění, tj. svěrek, spon, vrtulí, případně dokonce i kolejnic – viz Obr. 1-1 a Obr. 1-2. Důležitým hlediskem je vysoká provozní zátěž provozované dopravy. Příkladem takovýchto úseků jsou oblouky v úseku Brno – Adamov, oblouk u žst. Kolín ve směru na Velký osek, oblouky v úseku Havlíčkův Brod – Okrouhlice, nebo úsek Česká Třebová os. n. – odb. Parník. SŽDC se snaží ve spolupráci s výrobcem upevnění zjištěné problémy řešit, jsou vkládány nové sestavy upevnění, které se v těchto problematických úsecích zkouší.

V případě traťových úseků, na kterých se vyskytují úroňová křížení s celopryžovými přejezdovými konstrukcemi, dochází ke korozi součástí železničního svršku (svěrky, vrtule, kolejnice) vlivem zimní údržby pozemních komunikací, zvýšené vlhkosti (uzavřený prostor) a případně spadu nečistot ze silničních vozidel (např. písek). K těmto faktorům se přidává dynamické namáhání součástí upevnění vlivem silničního provozu, kdy dochází ke kontaktu panelů přejezdové konstrukce s úhlovými vodícími vložkami. Na Obr. 1-3, Obr. 1-4 a Obr. 1-5. V Obr. 1-6 a Obr. 1-7 jsou zobrazeny svěrky z prostoru železničního přejezdu s celopryžovou konstrukcí a svěrky mimo železniční přejezd, kde je vidět patrný rozdíl. Umístění svěrky v přejezdu má rozhodující vliv na korozní úbytky jejího materiálu.



Obr. 1-1: Poškozená svěrka v železničním přejezdu
(celopryžová konstrukce) – žst. Kolín



Obr. 1-2: Lom kolejnice – žst. Kolín



Obr. 1-3: Otisk úhlové vodicí vložky do paty kolejnice –
žst. Kolín



Obr. 1-4: Otlačení svěrky do panelu přejezdové
konstrukce – žst. Kolín



Obr. 1-5: Otisk panelu na vnějším rameni svěrky – žst. Kolín



Obr. 1-6: Korozně napadená svěrka – celopryžový přejezd u Dobříně



Obr. 1-7: Svěrka mimo přejezd u Dobříně

Korozně agresivní prostředí se vyskytuje rovněž v železničních tunelech. Vlivem zvýšené vlhkosti v tunelech, případně ještě s přidavkem průsaků slaných roztoků posypových solí dochází ke koroznímu poškození součástí železničního svršku (kolejnice, vrtule, svěrky). Zvýšená míra poškození byla shledána zejména v železničních tunelech úseku Brno – Adamov a úseku Praha hl. n. – výhybna Vyšehrad – viz Obr. 1-8 až Obr. 1-11. Z Obr. je také patrné, že se pružné svěrky otlačují do paty kolejnice, pohyb vnějších ramen svěrek bude v tom případě kopírovat pohyb paty kolejnice na pražci.



Obr. 1-8: Korozně napadená svěrka, patrná přítomnost vlhkosti - tunel v úseku Praha hl. n. – výhybna Vyšehrad



Obr. 1-9: Korozně napadená kolejnice – tunel v úseku Praha hl. n. – výhybna Vyšehrad



Obr. 1-10: Poškozená svěrka - tunel v úseku Praha hl. n. – výhybna Vyšehrad



Obr. 1-11: Poškozená kolejnice – patrný otisk svěrek v patě kolejnice - tunel v úseku Praha hl. n. – výhybna Vyšehrad

1.1.1 Železniční přejezd Dobříň

Prvním úsekem, ze kterého byly vyjmuty vzorky svěrek, je železniční přejezd u obce Dobříň, který se nachází u Roudnice nad Labem, TÚ 090. Přejezd je dvoukolejný, umístěn je v přímé koleji v km 474,629 – Obr. 1-12.



Obr. 1-12: Železniční přejezd Dobříň

Rychlost na železničním přejezdu je 160 km/h. Železniční svršek je tvořen pražci B91S/1, upevnění W14 bez antikorozi úpravy, kolejnice UIC60. Vložení železničního svršku bylo provedeno v květnu 1997. K rekonstrukci bylo přistoupeno vzhledem k nevyhovujícímu stavu, především velkému koroznímu úbytku pružných svěrek – Obr. 1-13. Pro porovnání je na Obr. 1-14

fotografie svěrky, která byla vložena do koleje ve stejnou dobu, ale umístěna byla cca 20 m od přejezdu. Rekonstrukce byla provedena v září 2012.



Obr. 1-13: Pružná svěrka Skl14 bez povrchové úpravy z přejezdu Dobříň



Obr. 1-14: Pružná svěrka Skl14 bez povrchové úpravy ve vzdálenosti cca 20 m od přejezdu Dobříň

Konstrukce železničního přejezdu nebyla typu STRAIL, jednalo se o atypickou celopryžovou konstrukci. Z Obr. 1-15 je ale zřejmé, že se daná konstrukce železničního přejezdu od konstrukce STRAIL příliš neodlišuje. U obou konstrukcí jsou použity celopryžové panely s vybráním pro upevnění. U této atypické konstrukce nejsou použity nad systémem upevnění kolejové opěrky ve tvaru „U“, ale celá konstrukce tvoří jeden celek. Stejně tak zatížení je do koleje vnášeno obdobným způsobem, obě konstrukce tedy přenášejí zatížení od automobilové dopravy především na pražce, částečně jsou také opřeny o patu kolejnice a zatěžují i tu.



Obr. 1-15: Pohled na původní přejezdovou konstrukci přejezdu Dobříň

1.1.2 Železniční přejezd v žst. Kolín

Dalšími vzorky, které byly vyjmuty z provozované koleje, jsou vzorky z žst. Kolín, z železničního přejezdu v ulici Starokolínská, který je umístěn v km 298,654, TÚ 231 - Obr. 1-16. Přejezd leží v oblouku o poloměru 190 m, převýšení koleje je 56 mm a rychlost na železničním přejezdu je 50 km/h. Konstrukce železničního přejezdu je typu STRAIL, kolejnice jsou tvaru 60E2, pražce jsou betonové B91S/1 s upevněním W14. Svěrky Skl14 byly s povrchovou úpravou KTL. Přejezd byl v provozu od listopadu 2010.



Obr. 1-16: Konstrukce železničního přejezdu v žst Kolín

V průběhu roku 2013 bylo na tomto přejezdu zjištěno nevyhovující GPK, konkrétně rozchod koleje. Proto bylo rozhodnuto, že bude železniční přejezd otevřen a prověřen stav železničního svršku. Při této prohlídce byl zjištěn stav nevyhovující, který bylo nutno řešit. Bylo tedy

rozhodnuto o výměně prvků systému upevnění, která byla provedena v prosinci 2013. Bylo zjištěno, že svěrky Skl14 byly prasklé i přes to, že nevykazovaly výrazný korozní úbytek – Obr. 1-17 a Obr. 1-18. Dále bylo zjištěno, že se svěrky otláčují do panelů konstrukce železničního přejezdu. Jak na panelech přejezdové konstrukce, tak na pružných svěrkách byly patrné dotykové plochy – Obr. 1-19 a Obr. 1-20. K tomuto dotyku však docházet nemá, dochází k namáhání svěrek zatížením, na které nejsou dimenzovány a se kterým se u nich nepočítá. Železniční přejezd je pojížděn silničními nákladními automobily, které dopravně obsluhují přilehlou pískovnu a kovošrot. Tato velmi zatížená vozidla by mohla být přispívajícím faktorem výše popsaného problému. Dále bylo zjištěno otláčení úhlové vodící a paty kolejnice – Obr. 1-21 a Obr. 1-22.



Obr. 1-17: Prasklá svěrka Skl14 vyjmutá z přejezdu v žst. Kolín



Obr. 1-18: Prasklá svěrka Skl14 vyjmutá z přejezdu v žst. Kolín



Obr. 1-19: Otláčení svěrky do panelu přejezdové konstrukce



Obr. 1-20: Detail svěrky Skl14 s ulomeným ramenem v přejezdu žst. Kolín, tmavá plochy naznačuje kontakt svěrky s panelem přejezdové konstrukce



Obr. 1-21: Detail otlačení úhlové vodicí vložky



Obr. 1-22: Vzájemné opotřebování úhlové vodicí vložky a paty kolejnice

2 Cíle dizertační práce

Cíle dizertační práce vychází z potřeby jednoznačně identifikovat příčiny a míru poškození pružného upevnění kolejnic s ohledem na provozní podmínky. Pro účely této práce bylo předmětem výzkumu zvoleno upevnění W14 se svěrkami Vossloh SKL14.

2.1 Cíle práce

- Hlavním cílem práce je vytvoření a ověření metodiky hodnocení stavu svěrek Skl14 v provozovaných tratích, metodika definuje různá hodnotící kritéria a určuje způsob jejich ověření.
- Identifikace traťových úseků s vyšší mírou poškození pružných svěrek v provozované železniční síti, analýza příčin.
- Ověření vlastností svěrek Skl14.
- Porovnání korozní odolnosti svěrek Skl14 bez antikorozní povrchové úpravy a s antikorozní povrchovou úpravou KTL.
- MKP analýza napětí svěrky Skl14.

3 Současný stav poznání

3.1 Měření železničního svršku

Experimentální analýza vybraných systémů kolejnicových upevnění [29]

Dizertační práce je zaměřena na měření a analýzu dynamických účinků (vibrace, hluk). Těžištěm práce je studium přenosu dynamických akustických účinků zatížení kolejovou dopravou do konstrukcí železničního svršku, zejména se zaměřením na upevnění kolejnic. Cílem práce je především návrh jednotné metodiky pro vývoj a analýzu železničních konstrukcí, která má sloužit pro porovnání jednotlivých systémů upevnění kolejnic, má odhalit jejich případné nedostatky a předikovat vliv na provozovanou kolej z dlouhodobého hlediska. Metodika je sestavena ze třech částí – měření pohybů, vibrodiagnostiky a měření hluku. Měřeny byly různé systémy upevnění kolejnic – FC I, W14, W14NT, W21NT, E14, W28NT, Vossloh 300, S15 a KS, a to jak v laboratoři, tak na různých místech provozovaných tratí. Pro vybuzení soustavy autor používá mechanické rázy vyvolané rázovým kladivem a pro srovnání v laboratoři vybuzení také elektrodynamickým budičem. In situ bylo sledováno chování pod projíždějícími vozidly.

Měřeny byly příčné, podélné a svislé posuny pražce, podélné posuny kolejnice, příčné, podélné a svislé zrychlení na pražci a na kolejnici a akustický tlak. Výsledky byly hodnoceny jak v časové, frekvenční, tak i časově-frekvenční oblasti.

Samostatnou kapitolou práce je volba vhodného úseku měření a referenčního úseku měření a návrh podmínek pro zřizování zkušebních úseků a měření na nich.

Práce v závěru konfrontuje předpokládané oblasti využití pro sestavy upevnění dle předpisu S3 se zjištěními a navrhuje případná omezení. Pro sestavu W14 nebylo zjištěno žádné omezení vůči oblasti vymezené předpisem SŽDC S3. Tato práce je velmi dobře zpracována, předkládá ucelený přehled vhodnosti použití jednotlivých sestav. Předkládaná dizertační práce na tuto práci nepřímo navazuje, především v části zabývající se měřením v koleji využívá ve vyhodnocení poznatky zjištěné autorem. Předkládaná práce se však věnuje svérkům, v kombinaci s prací Ing. Tomanla by mohla tedy tvořit velmi užitečný nástroj pro rozhodování správce infrastruktury o vhodnosti použití systémů upevnění v určitých podmínkách.

Namáhání železničního svršku při $V = 200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ [37]

Neveřejná závěrečná zpráva z měření. Měření namáhání železničního svršku při zkušebních jízdách rychlostí $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ bylo realizováno na úseku I. koridoru Břeclav – Vranovice. Měření bylo realizováno na železničním svršku s upevněním W14, kolejnicemi UIC60 a pražci B91S/1 v oblouku o poloměru 2 250 m s převýšením 73 mm. Měřeny byly 2 pražce. Na prvním pražci byly osazeny snímače posunutí, druhý pražec byl osazen snímači zrychlení. Byly měřeny svislé posuny pražce vůči podloží, svislé posuny kolejnice vůči pražci, horizontální posuvy kolejnice vůči pražci, snímání boční síly na kolejnici, snímání vertikální síly na kolejnici, zrychlení pražce, zrychlení na

hlavě a patě kolejnice a dále realizováno měření na výhybkách. Pomocí tenzometrů byly také měřeny hodnoty svislé a příčné kolové síly.

Skluzové vlny a vliv podpražcových podložek

Dalším faktorem, který je možné v problematických úsecích identifikovat, je vlnkovitost kolejnic (skluzové vlny). Touto problematikou se zabývá především Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb, uvést lze např. [31]. Stejný ústav se také zabývá problematikou podpražcových podložek (USP) a jejich vlivem na parametry železničního svršku (GPK, vlnkovitost, atd.). Uvedl bych především dizertační práci [39]. Práce je zaměřena na monitoring a vyhodnocení zkušebních úseků s USP. Sledovanými úseky byla žst. Planá nad Lužnicí (USP ve výhybce) a Havlíčkův Brod – Okrouhlice (oblouk malého poloměru $R=288$ m, USP navrženy s cílem zpomalit rozvoj skluzových vln). V žst. Planá nad Lužnicí se projevil vliv USP pozitivně (nižší sedání výhybek a úseků mezi výhybkami, menší zborcení koleje, menší odchylky parametrů GPK). V úseku Havlíčkův Brod – Okrouhlice se pak pozitivní vliv USP neprojevil.

Na internetu je možné nalézt i další práce z řad studentů tohoto ústavu zabývající se touto problematikou. Shrnutí výzkumů vlnkovitosti řešených v rámci dvou projektů UIC a jednoho projektu TAČR bylo prezentováno v [36], kde byl m. j. uveden i pozitivní vliv USP na nižší nároky na údržbu tratí (např. prodloužení dobami mezi podbíjenými) a potlačení vzniku skluzových vln při vhodné kombinaci USP a kolejnice s kalenou hlavou. Pozitivní vliv USP na redukci poklesu pražců, útlumu hluku a vibrací a opotřebení kolejnicových pásů (např. vlnkovitosti a skluzových vln) byl zjištěn dlouhodobými měřeními železničních správ (DB, ÖBB, SNCF) a byl popsán v [32].

3.2 Koroze upevnění

Korozí upevnění se zabývají především výrobci, kteří hledají účinné metody ochrany. Jsou to např. Vossloh, Schwihag (povrchová úprava svěrek NiroTec©). Stejně tak výrobce pružných svěrek, společnost Vossloh, má zpracovanou MKP a analýzu a realizuje také zkoušení svěrek. Správa železniční dopravní cesty zadává expertní posudky na problémové úseky tratí (např. problémy s korozi součástí železničního svršku v tunelu mezi Praha hl. n. – Praha Vyšehrad). Tyto výzkumy však nejsou veřejné.

3.2.1 Svěrky Skl bez speciální povrchové úpravy

Svěrky Skl bez povrchové úpravy se používají na železničních tratích mimo místa železničních přejezdů a tunelů a svěrky s antikorozi povrchovou úpravou se používají v místech železničních přejezdů a v tunelech.

První variantou je varianta bez speciální povrchové úpravy, která by zajišťovala antikorozi ochranu. Svěrky jsou pouze opatřeny ochranným lakem pro transport, což je bitumenový nebo vodou ředitelný lak [19].

3.2.2 Povrchová úprava svěrek Skl - KTL

KTL je katodická metoda antikorozi ochrany kovových součástí máčením v lázni. Očištěné kovové součásti jsou nejprve fosfátovány a následně jsou opatřeny vrstvou KTL. Při této metodě jsou používány molekuly pryskyřice, které jsou upraveny tak, aby byly v potřebném rozsahu rozpustné ve vodě [3]. Výsledkem tohoto procesu je povrchová úprava, která by měla být velmi odolná vůči korozi. Takto upravené svěrky se používají na železničních přejezdech a v tunelech. Na tratích v ČR dochází ke korozi i takto upravených pružných svěrek, proto se od tohoto způsobu ochrany upouští. Na Obr. 3-1 jsou po porovnání svěrky bez povrchové úpravy a s povrchovou úpravou KTL připravené k osazení kolejnice.



Obr. 3-1: Osazené pružné svěrky Skl14 vlevo bez povrchové úpravy, vpravo s povrchovou úpravou KTL na pražcích B91S/1 připravené k vložení kolejnice

3.2.3 Povrchová úprava svěrek Skl - Sherard

Další povrchovou úpravou, která byla k dispozici a již se o ní dále neuvažuje, byla dvojitá ochrana pozinkování – sherardování + práškové lakování. Tato povrchová úprava byla vyvinuta pro extrémně nepříznivé podmínky, konkrétně pro tratě, kde se nakládá sůl. Proces povrchové úpravy je následující – ocelové díly, které jsou určeny k pozinkování, jsou vloženy do směsi ze zinkového prachu a křemenného písku a poté zahřáty v rotační peci. Při odpovídající teplotě se vytvoří zinková vrstva, která se slévá se základním materiálem – železem. [19] Tento typ povrchové úpravy se na tratích v ČR nepoužívá, nyní se od něj upouští i mimo ČR.

3.2.4 Povrchová úprava svěrek Skl - Vossloh Protect

Dizertační práce byla řešena v období od roku 2011, proto došlo také k vývoji antikoročních úprav. Výrobce se snaží reagovat na problémy s korozí svěrek na železničních přejezdech a v železničních tunelech. V současné době se jako perspektivní jeví tzv. Vossloh Protect, což by měla být prémiová ochrana pro extrémní podmínky (např. přímořské oblasti, prostředí s chemikáliemi). Jedná se o prémiový zinkový povlak, dvojitou ochranu díky přídavné katodické korozi ochraně. Proces nanášení a přesné složení vrstev je tajné, v rámci procesu nanášení však musí být zajištěno, aby nebyly ovlivněny vlastnosti samotných svěrek.

3.3 Modelování sestavy upevnění W14

Výpočtové modelové chování pružné spony upevnění kolejnice [40]

Tato bakalářská práce se zabývá především vytvořením modelu upevnění W14 v programu Ansys Workbench, svěrky byly modelovány v Autodesk Inventor Professional 2012, a simulací 4 zatěžovacích stavů. Prvním je nezatížená kolej simulující pouze utažení svěrek předepsaným utahovacím momentem – modelováno kvádrem a definováním posunů v osách x (5 mm), y (7 mm), z (10 mm). Druhým zatěžovacím stavem byla nepřevýšená kolej v přímé, třetím stavem převýšená kolej ve směrovém oblouku $R = 300$ m s převýšením 116 mm a posledním stavem převýšená kolej ve směrovém oblouku pojížděném s přebytkem převýšení $E = 81$ mm simulující pomalou jízdu, případně zastavení ve směrovém oblouku. Výsledky jsou prezentovány pomocí ekvivalentního napětí von Mises. Při všech zatěžovacích stavech je na svěrkách dosahováno hodnot ekvivalentních napětí von Mises vyšších než 2200 MPa. Dále jsou v práci uvedeny výsledky ekvivalentních napětí von Mises pro kolejnici, úhlovou vodicí vložku a podložku pod patu kolejnice.

Numerická studie chování pružného upevnění kolejnice k pražci [41]

Tato diplomová práce navazuje na [40], ze které byla převzata velká část geometrického modelu a zabývá se vytvořením výpočtového modelu pro dynamickou analýzu upevnění kolejnice W14 při průjezdu vlaku. Zatížení bylo simulováno průjezdem železničního kola s kolovou silou o velikosti 200 kN a vodicí silou 63 kN. Příprava modelu pro řešič byla realizována v programu LS-PrePost, úloha byla vyřešena v programu LS-DYNA, což je pokročilý simulační softwarový balík. Utažení svěrek bylo simulováno pomocí kvádrů, který měl předepsané posunutí, lineárně rostlo na hodnotu 4 mm ve směru vektoru. Hodnoty ekvivalentních napětí von Mises byly zjištěny maximálně 597,1 MPa. Hodnoty jsou tedy cca 3,5x menší než v bakalářské práci. Dále byla zjištěna přítlačná síla svěrky na kolejnici 4,55 kN, což je hodnota nižší než připouští [4] – min. 8 kN.

Problémem obou výše zmíněných prací je nedostatečná verifikace vstupních parametrů modelů a konfrontování výsledků s reálným stavem. Vstupní a výstupní hodnoty se v bakalářské a diplomové práci liší, v diplomové práci byly použity hodnoty posunutí středního nosu svěrky při utažení přibližně poloviční oproti hodnotám použitým v bakalářské práci. Výsledky jsou vlivem těchto vstupních hodnot odlišné.

Assessment of fracture reliability analysis of crack growth in spring clip type Vossloh SKL14 [42]

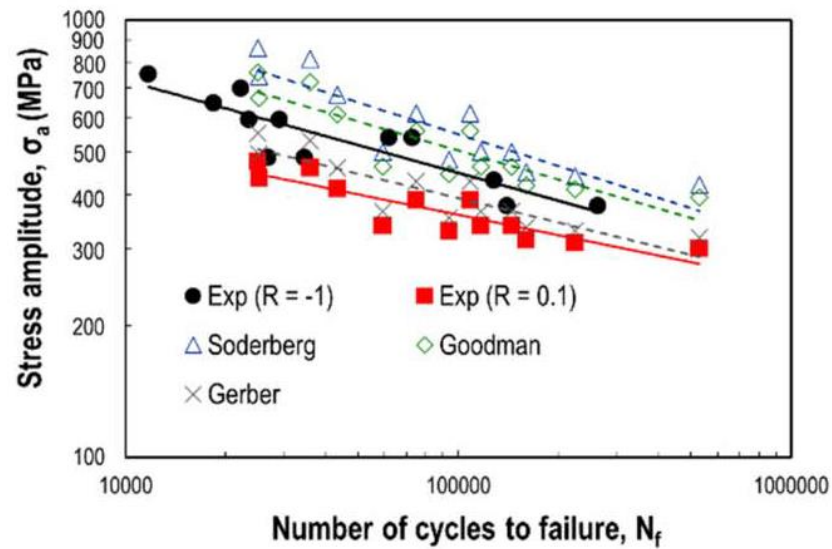
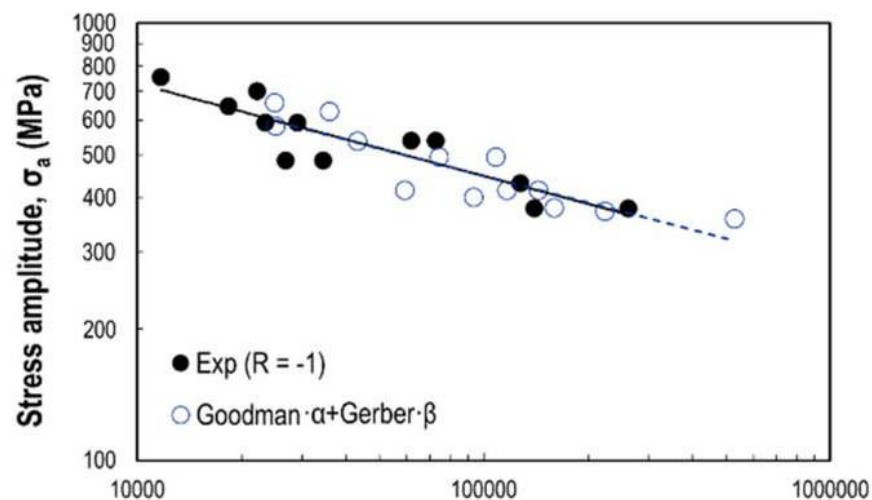
V příspěvku je řešeno únavové poškození pružných svěrek vlivem zatížení od dopravy. Příspěvek se snaží vyvinout metodu pro spolehlivostní analýzu pružných svěrek Skl14 založenou na lomové mechanice využívající analýzu lomové spolehlivosti, a to pro posouzení rozvoje trhliny na svěrce založené na Parisově zákoně. Dále je využita metoda konečných prvků. V úvodu článku je podrobná rešeršní činnost v dané oblasti. Byla modelována svěrka používaná u íránských železnic (naskenována 3D skenerem). Pomocí metody konečných prvků simulován stav při utažení a při průjezdu železničního vozidla. Oba stavy založené na posunech částí svěrky v čase. Dle experimentu je posun při zatížení okolo 10,5 mm na nose svěrky pod zatížením od vrtule. Při zatížením vlakem se ukázalo, že iniciace trhliny je při ΔK_I blízké maximální hodnotě 1250 MPa, tudíž je pro růst únavové trhliny dominantní mechanismus Mode I. Závěrem je konstatováno, že bylo zjištěno, že jakmile je iniciována trhlina, velikost spolehlivostního indexu významně klesne. Pokud je tedy zpozorována trhlina, svěrka by měla být vyměněna.

Posun při zatížení je v příspěvku odlišný od měření, která byla realizována autorem práce a byla použita jako vstup do MKP výpočtu.

Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system [43]

Příspěvek kombinuje experimentální přístup a metodu konečných prvků. Předmětem je posouzení strukturální integrity pružných svěrek Skl-1. Na úvod je uvedena rešeršní činnost týkající se poškození svěrek. Závěr většiny autorů je, že k poškození svěrek dochází vlivem únavy.

Byly připraveny vzorky z oceli 38Si7 a zkoušení podrobeny vzorky tepelně neupravené a tepelně upravené obdobně jako jsou vyráběny svěrky. Dále byly zkoušeny přímo svěrky. Byla realizována následující měření. Tvrdost na svěrce a vzorcích – vycházelo cca 400 – 450 HV. Tahová zkouška na vzorcích tepelně neupravených a tepelně upravených – mez pevnosti 1291 MPa, mez kluzu 1077 MPa. Únavový test – při $\sigma_m = 0$ bylo zjištěno $\sigma_e = 301$ MPa, při $\sigma_m \neq 0$ bylo zjištěno $\sigma_e = 291$ MPa. N_f pak bylo zjištěno cca 490 000 cyklů. Únavová životnost závisí nejen na amplitudě, ale také střední hodnotě napětí – viz Obr. 3-1. Dle autorů popisuje velmi dobře chování materiálu svěrek 38Si7 lineární kombinace Goodmanovy a Gerberovy korekce – viz Obr. 3-2.

Obr. 3-1: Počet cyklů do poruchy N_f pro různou asymetrii cyklu při zkoušce ($R=-1$ a $R=0,1$) [43]Obr. 3-2: Počet cyklů do poruchy N_f – zobrazení lineární kombinace Goodmanovy a Gerberovy korekce [43]

Experimentální výsledky na svěrkách. Byl proveden kvazistatický test. Do 8 kN reagovala svěrka elasticky, poté nastalo plastické chování. Při posunu cca 15 mm došlo ke kontaktu středního nosu svěrky s kolejnicí. Po odlehčení zůstaly plastické deformace dokazující, že byl překročen limit elasticity. Napětí von Mises při zatížení 25 kN (utažená svěrka, síla vznášena zvedáním vnějších ramen svěrek – simulace nadzvedávání od kolejnice) bylo zjištěno cca 1300 MPa, což přesahuje mez kluzu. Dále byl realizován únavový test ($F_m = 2,5$ kN, amplituda $F_a = (F_{\max} - F_{\min})/2$, mezi 2 a 1,2 kN, 3 mil. cyklů, 12 vzorků). Únavový limit F_e byl zjištěn 1200 MPa (závislý na střední hodnotě zatížení, v tomto případě 2500 N). Dále byly reprodukovány podmínky zatížení jako v provozované koleji (3 mil. cyklů, frekvence 5 Hz, minimální zatížení 5 kN a maximální zatížení

70 kN, simulace oblouku). Bylo testováno 12 vzorků, všechny vydržely po 3 mil. cyklů bez poruchy. Výsledky z numerické analýzy ukazují, že maximální upravená amplituda svěrky dosahuje $\sigma_{a(\sigma_m=0)} = 134$ MPa, zatímco mez únavy dosahuje $\sigma_e = 301$ MPa.

Dle autorů je poškození vlivem únavy velmi nepravděpodobná událost, což je ale uváděno jako příčina poškození jinými autory a také autorem této práce.

3.4 Legislativa vztahující se k pružným svěrkám Vossloh

3.4.1 Technické podmínky dodací č. 1/SŽDC/07 [3]

Požadavky na nové svěrky Vossloh jsou uvedeny v Technických podmínkách dodacích č. 1/SŽDC/07 pro pružné svěrky Vossloh [3] (dále jen TPD). Tyto TPD vydal VOSSLOH Fastening Systems GmbH a byly dne 26.06.2008 schváleny SŽDC. V těchto TPD jsou popsány základní charakteristiky, které musí pružné svěrky splňovat z hlediska rozměrů, jakosti a vlastností materiálu, kvality provedení a vzhledu výrobku a životnosti. Dále jsou zde předepsány zkoušky, které musí být prováděny během výroby (vstupní kontrola válcovaného drátu, kontrola rozměrů, kontrola výroby – zkouška lámavosti s vizuálním posouzením, kontrola tvrdosti po prudkém ochlazení, vizuální posouzení povrchové plochy, kontrola funkčních rozměrů, tvrdost po popouštění, zatěžovací zkouška, kontrola trhlin na povrchových plochách prostřednictvím metody Magna-Flux, metalografická kontrola povrchové plochy a struktury). Jednotlivé zkoušky jsou blíže popsány v příloze těchto TPD. Dále je požadována výstupní kontrola, ve které jsou ověřovány některé z výše popsaných zkoušek, které byly ověřovány již během výroby. Je popsána ochrana výrobku standardně ochranným lakem pro transport, případně antikorozi ochrana výrobku KTL. Poslední důležitou částí jsou požadavky na montáž do systému upevnění. Korozní zkoušení, případně korozní odolnost, nejsou v těchto TPD řešeny. V TPD jsou uvedeny jako související normy a předpisy normy EN 13146 a 13481. Blíže budou tyto sady norem popsány v dalším textu.

3.4.2 Obecné technické podmínky pro pružné svěrky a spony [4]

Dalším dokumentem, který se týká pružných svěrek Vossloh jsou Obecné technické podmínky pro pružné svěrky a spony, č. j. 60 788 / 99 – 013 [4] (dále jen OTP). Tyto OTP vydaly České dráhy, s. o., divize dopravní cesty, o. z. V těchto OTP jsou popsány požadavky na vlastnosti pružných svěrek a spon (přítlačná síla, odpor proti podélnému posunu kolejnice v upevnění, rozptyl v hodnotách velikosti přítlačné síly pružných svěrek a spon po montáži, ztráta přítlačné síly, životnost svěrek a spon a provozní ověřování). Pro měření velikosti přítlačné síly je uveden odkaz na [35], pro měření odporu proti podélnému posunu kolejnice v upevnění je uveden odkaz na EN 13146-1, provozní ověřování je pak odkázáno na [8]. V další části OTP jsou popsány zásady výroby a dodávání pružných svěrek a spon (značení, přípustnost použití v kolejích, technická dokumentace, prokazování kvality výrobků – odkaz na výše popsaná TPD, způsob objednávání a dodávání součástí upevnění, záruky a reklamace). V OTP není definováno zkoušení míry

korozního úbytku stávajících svěrek užitých v provozovaných úsecích. V OTP nejsou definovány testy korozní odolnosti pružných svěrek.

3.4.3 Evropské normy EN 13481

Dalšími normami, které jsou odkazovány ve výše zmíněných TPD a OTP a týkají se systémů upevnění, jsou normy EN 13481. Tyto evropské normy jsou podporovány zkušebními metodami uvedenými v souboru EN 13146.

ČSN EN 13481-1: Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 1: Definice.

ČSN EN 13481-2: Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 2: Systémy upevnění pro betonové pražce. [5]

Norma platí pro systémy upevnění A-E (rozdělení do kategorií dle max. návrhového zatížení na nápravu a minimálního poloměru oblouku koleje), použité na betonových pražcích v koleji se štěrkovým ložem.

V normě jsou stanoveny požadavky na odpor proti podélnému posunutí kolejnice (EN 13146-1), odpor proti pootočení (EN 13146-2), útlum rázového zatížení (EN 13146-3), tuhost podložky a sestavy upevnění (EN 13146-9), účinek opakovaného zatěžování (EN 13146-4), elektrický odpor systému upevnění a pražce (EN 13146-5), vliv nepříznivých vnějších podmínek (EN 13146-6), rozměry, vliv tolerancí systému upevnění na rozchod koleje, svěrnou sílu (EN 13146-7), zabudované a vlepené součásti upevnění, provozní ověřování (EN 13146-8) a útlum hluku a vibrací.

V normě jsou uvedeny požadavky, které je nutné splnit, a ke každému požadavku jsou uvedeny normy, ve kterých jsou popsány zkušební metody. Korozní účinky jsou řešeny v části vliv nepříznivých vnějších podmínek. Požadavek je, aby po provedení zkoušky solnou mlhou dle [7], bylo možné sestavu upevnění rozebrat bez porušení kterékoliv součásti a opětovně smontovat při použití k tomu určeného ručního nářadí.

Pro vyhodnocení účinků opakovaného zatížení se provede měření v souladu s [6]. Změří se odpor proti podélnému posunutí kolejnice, svislá statická tuhost a svěrná síla, a to před a po opakovaném zatížení a změna vlastností se nesmí překročit v normě uvedené hodnoty (max. 20 %, 25 % a 20 %).

ČSN EN 13481-3: Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 3: Systémy upevnění pro dřevěné pražce.

ČSN EN 13481-4: Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 4: Systémy upevnění pro ocelové pražce.

ČSN EN 13481-5: Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 5: Systémy upevnění pro pevnou jízdní dráhu s kolejnicí na jejím povrchu nebo zapuštěnou ve žlábků.

ČSN EN 13481-6: Neexistuje.

ČSN EN 13481-7: Železniční aplikace - Kolej - Požadavky na vlastnosti systémů upevnění - Část 7: Speciální systémy upevnění pro výhybky a výhybkové konstrukce a přídržné kolejnice.

ČSN EN 13481-8: Neexistuje.

3.4.4 Evropské normy EN 13146

TPD i OTP mají odkazy na normy EN 13146. Normy EN 13146 se věnují metodám zkoušení systémů upevnění. Tento soubor norem podporuje požadavky EN 13481.

ČSN EN 13146-1: Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 1: Stanovení odporu proti podélnému posunutí kolejnice.

ČSN EN 13146-2: Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 2: Stanovení odporu proti pootočení.

ČSN EN 13146-3: Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 3: Stanovení útlumu rázového zatížení.

ČSN EN 13146-4: Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 4: Účinek opakovaného zatěžování. [6]

Norma určuje postup laboratorní zkoušky opakovaným cyklickým pohybem představujícím pohyby způsobované provozem po železniční koleji. Používá se pro stanovení dlouhodobého chování systémů upevnění.

Dle normovaného postupu se upraví kolejnice. Kolejnice se upne do systému upevnění. Poté se působí definovanou silou (dle kategorie) pod definovaným úhlem (dle nízkofrekvenční dynamické tuhosti sestavy upevnění). Kompletní postup zkoušení na účinky opakovaného zatížení systému upevnění dle [6] by měl být následující: zkouška svěrné síly, odpor proti podélnému posunutí kolejnice, svislá statická tuhost sestavy upevnění, cyklické zatěžování a opět svislá statická tuhost sestavy upevnění, odpor proti podélnému posunutí kolejnice a zkouška svěrné síly.

Nikdy během zkoušek nesmí být žádná součást sestavy upevnění upravována, dotahována nebo měněna.

ČSN EN 13146-5: Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 5: Stanovení elektrického odporu.

ČSN EN 13146-6: Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 6: Vliv nepříznivých vnějších podmínek. [7]

Určuje postup laboratorní zkoušky pro zjištění účinku nepříznivých podmínek okolního prostředí na systémy upevnění, používá se pro kompletní sestavu upevnění. Kompletní sestava upevnění se vystaví účinku solného postřiku a zaznamenává se vliv na snadnost demontáže a opětovné montáže a stav jednotlivých součástí.

Zařízení pro postřik dle [10] pro zkoušku neutrální solnou mlhou.

Postup zkoušky je následující: vizuální kontrola sestavy upevnění, upevnění stejně jako v koleji. Následuje vystavení účinku neutrální solné mlhy dle [10] po dobu 300 h. Poté se rozmontuje sestava upevnění, všechny prvky se vizuálně prohlédnou a zaznamená se jejich stav. Sestava se znovu smontuje, zaznamenají se jakékoli problémy při montáži nebo demontáži.

ČSN EN 13146-7: Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 7: Stanovení svěrné síly.

Postup zkoušky dle této normy je podrobně uveden v Kapitole 4.5.2.

ČSN EN 13146-8: Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 8: Provozní ověřování. [8]

Norma stanovuje postup porovnávacího zkoušení systémů upevnění v koleji. Zkouška platí pro úplnou sestavu upevnění a může být použita pouze pro porovnávací zkoušení systémů upevnění, které byly namontovány ve stejné době na tom typu podpory, pro kterou jsou určeny.

Chování systému upevnění musí být porovnáváno s referenčním systémem upevnění. Každý ze zkoušených a referenčních systémů upevnění musí být namontován v jedné koleji na délku obsahující nejméně 500 pražců. Doba zkoušení musí být delší než rok a je uvedena minimální hodnota projeté zátěže. Při prohlídkách se má mimo jiné kontrolovat také stav jednotlivých součástí upevnění.

ČSN EN 13146-9 + A1: Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 9: Stanovení tuhosti. [9]

ČSN EN 13146-10 Železniční aplikace – Kolej – Metody zkoušení systémů upevnění – Část 10: Zkouška odporu proti vytažení zkušebními zatíženími

3.4.5 Evropská norma EN ISO 9227 [10]

V [7], v části, která je věnována metodám zkoušení systému upevnění, je uvedeno, že se systém upevnění vystaví účinkům neutrální solné mlhy dle [10]: Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou. Metoda popsána v této normě umožňuje kontrolu dodržení srovnatelné úrovně kvality kovových materiálů. Jedná se o laboratorní zkoušku. Tato zkouška slouží k simulování prostředí se zvýšeným obsahem chloridů, tedy např. přímořské oblasti nebo solené silnice (příklad této práce). Zkouška využívá k urychlení koroze působení NaCl, zvýšené vlhkosti a zvýšené teploty. Průběh zkoušky je podrobněji popsán v kapitole Zkouška neutrální solnou mlhou dle [10]. V normě jsou stanoveny požadavky na zkušební roztoky, zařízení, způsob

vyhodnocování korozní agresivity ve zkušební komoře, zkušební vzorky, uspořádání zkušebních vzorků při zkoušce, zkušební podmínky při zkoušce, dobu trvání zkoušky, zpracování vzorků po zkoušce a vyhodnocení výsledků. Posledním bodem je vzhled protokolu o zkoušce.

3.4.6 Shrnutí legislativy

Z přehledu legislativy vztahující se k pružným svěrkám Vossloh je zřejmé, že existují normované postupy na zkoušení pružných svěrek. Normové postupy jsou postupy laboratorními, nestanovují např., při jaké hodnotě korozního úbytku lze pružné svěrky ještě považovat za vyhovující, a při jaké již nikoli. Správce infrastruktury v ČR řeší problematiku korozního úbytku pružných svěrek empiricky, vychází tedy ze zkušenosti pracovníků odboru traťového hospodářství a správců tratí, kteří rozhodují, zda dojde k výměně upevnění. Provozní ověřování, které je popsáno v [8] navrhuje pouze porovnání různých upevnění téhož druhu za srovnatelných podmínek. Koroze na železničních přejezdech a v tunelech způsobuje korozní úbytek pružných svěrek a je tedy třeba stanovit, při jak velkém korozním úbytku je ještě vhodné svěrky v koleji ponechat (např. z hlediska svěrné síly) a kdy je již nutná jejich výměna.

V [6] je stanoven postup pro stanovení účinků opakovaného zatížení, pracuje ale se standardními podmínkami. Dizertační práce je zaměřena na specifické problémové úseky, problematika není řešena laboratorně, ale především pomocí měření in situ v kombinaci s MKP výpočtem.

3.5 Železniční přejezdy jako součást železničního svršku

Železniční přejezdy významně ovlivňují poškození svěrek provozem, je to dáno přídavným namáháním od přejezdu těžkých nákladních automobilových souprav, silně agresivním prostředím v zimním období (použití solí) a částečným zakrytím svěrek vlastní konstrukcí přejezdu.

3.5.1 Přejezdová konstrukce

Nejčastějším typem konstrukce železničního přejezdu na koridorových tratích v ČR je přejezdová konstrukce STRAIL. Jedná se o celopryžovou konstrukci. Panely přejezdové konstrukce jsou vloženy mezi kolejnice a zatížení od automobilové dopravy je přenášeno přímo na pražce. Částečně je zatížení přenášeno také na patu kolejnice, a to pomocí kolejnicové opěrky ve tvaru obráceného „U“, který je umístěn nad systémem upevnění – Obr. 3-2, Obr. 3-3 a Obr. 3-4. Na vnější straně koleje je přejezdový panel položen na závěrné zdi a horní ploše pražce.



Obr. 3-2: Celopryžová konstrukce STRAIL [11]



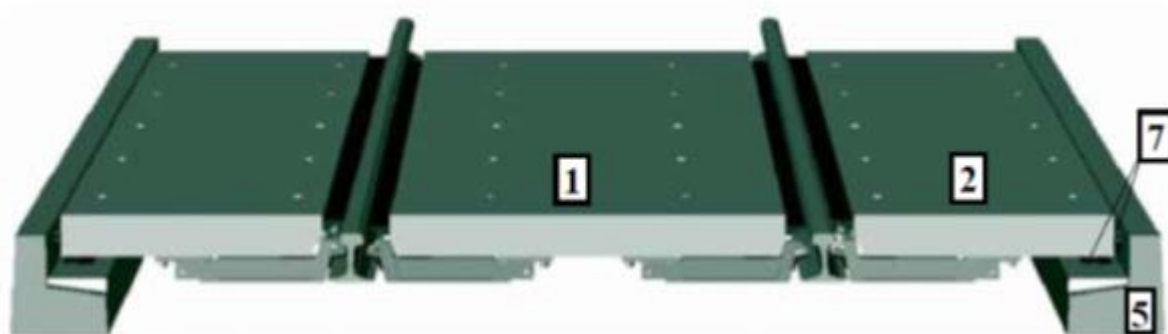
Obr. 3-3: Detail přejezdové konstrukce STRAIL



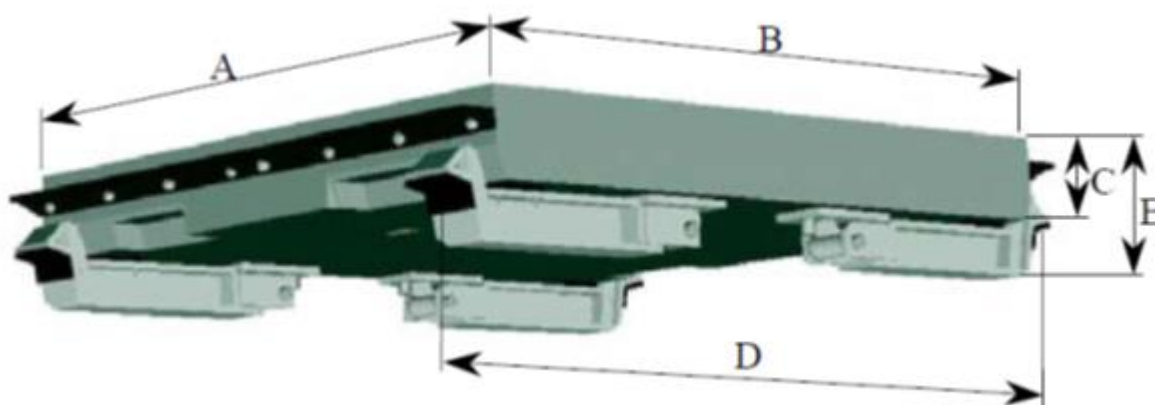
Obr. 3-4: Přejezdová konstrukce STRAIL

Výrobce na svých webových stránkách [11] upozorňuje, že je konstrukce náchylná na korozi upevňovadel vlivem přítomné vlhkosti a nepřístupu vzduchu k uzavřenému prostoru, proto je nutno upevňovadla antikorozně upravit. SŽDC tento požadavek reflektuje v předpisu SŽDC S3, dílu VII, kapitole IV, bodě 27 [12], kde je uvedeno, že pod přejezdovými konstrukcemi, v tunelech a portálových oblastech tunelu se použijí spojovací a upevňovací součásti železničního svršku se schválenou antikorozní úpravou dle příslušných TPD. U stávajících konstrukcí se provede výměna při nejbližší demontáži přejezdu, či rekonstrukci trati v tunelu [12].

Z železobetonových přejezdových konstrukcí budou blíže popsány BRENS a UNIS. Obě konstrukce jsou tvořeny železobetonovými deskami, které jsou uloženy na patách kolejnic, a to prostřednictvím speciálních nosičů. [13], [14] Jelikož jsou panely uloženy na patách kolejnic, zatížení od silniční dopravy by mělo být vnášeno do koleje stejně jako od železniční dopravy. Na vnější straně leží panely na závěrných zídkách. Na Obr. 3-5 a Obr. 3-6 je vidět příklad železobetonové přejezdové konstrukce UNIS. Proti přejezdové konstrukci STRAIL je patrný prostor mezi konstrukcí a kolejnicí, tedy prostor nad upevněním, který umožňuje odvětrávání prvků upevnění kolejnic. Tudíž nedochází k tak velké kondenzaci vody jako u přejezdové konstrukce STRAIL. Důsledkem je méně nepříznivé korozní prostředí pro prvky upevnění.

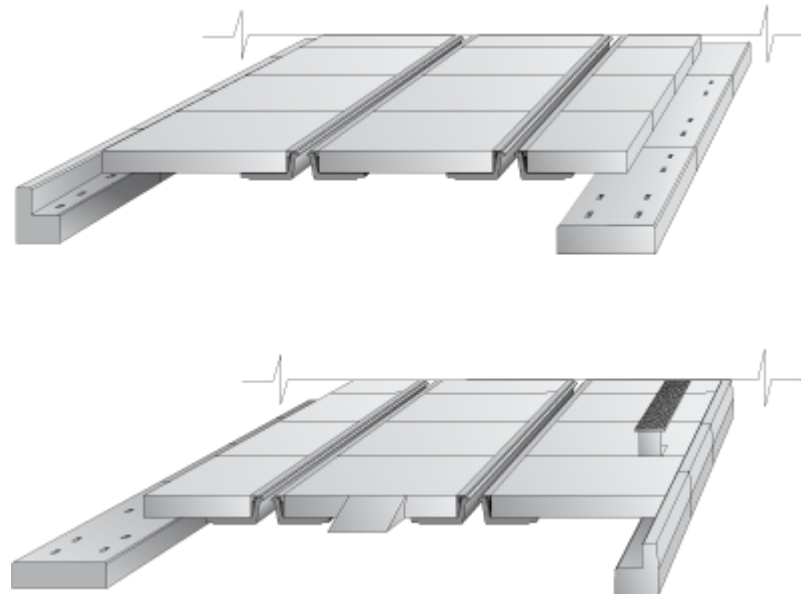


Obr. 3-5: Železobetonová přejezdová konstrukce UNIS [13]



Obr. 3-6: Detail konstrukce UNIS [13]

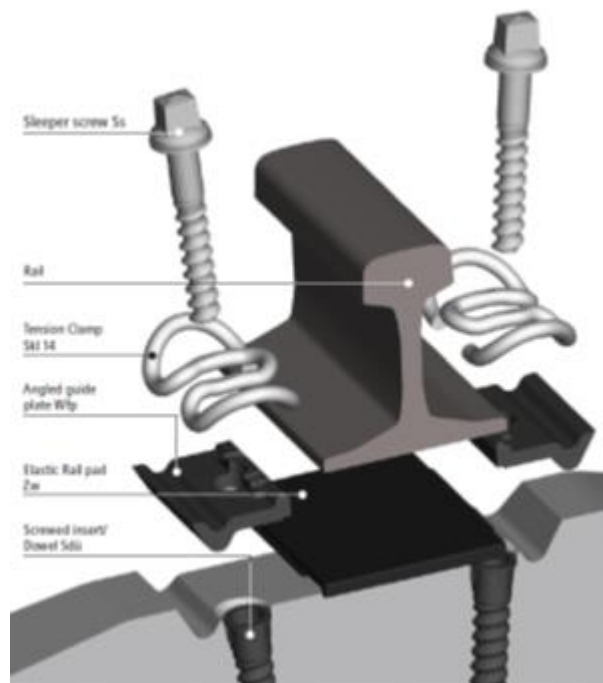
Dalším typem železobetonové přejezdové konstrukce je přejezdová konstrukce typu BRENS – viz Obr. 3-7 Zatížení silničních vozidel je zcela přenášeno pomocí nosičů do kolejnic, a to ve shodném směru se směrem působení zatížení drážních vozidel a, nebo do podélné podpory. Přejezdový panel nespolutpůsobí s příčnou podporou koleje (pražcem) nebo se štěrkovým ložem a ani se jich žádnou svojí nosnou částí nedotýká. Vnější panel může být pro zachování pružného upevnění kolejnice, resp. neztužení upevnění kolejnice v příčném směru, opatřen pryžovým profilem volně přiléhajícím k hlavě kolejnice. [15]



Obr. 3-7: Železobetonová přejezdová konstrukce BRENS [16]

3.5.2 Systém upevnění využívající svěrky Skl14

Železniční svršek na koridorových tratích v ČR se převážně skládá z kolejnic 60 E1, případně 60E2 (dříve označované UIC60), předem předepjatých monoblokových betonových příčných prahců B91S/1 a bezpodkladnicového pružného upevnění W14 – viz Obr. 3-8. V této části bude tento systém upevnění rozebrán blíže. W 14 je pružný systém upevnění německého výrobce Vossloh.



Obr. 3-8: Systém upevnění W14 [17]

Pro ČR je schválena tato sestava W14 [12]:

- Pružná svěrka Skl14.
- Úhlová vodicí vložka Wfp 14 K.
- Podložka Uls 7.
- Vrtule R1.
- Pružná podložka WU 7.
- Hmoždinka PA 744.

3.5.3 Materiálové charakteristiky

Materiálové vlastnosti jednotlivých komponent systému upevnění W14 byly uvažovány dle [40] a [41]. Konkrétní použité hodnoty jsou shrnuty v Tab. 3-1.

Tab. 3-1: Materiálové charakteristiky

Součást	Materiál	Typ modelu	Youngův modul pružnosti	Poissonovo číslo	Hustota
			[GPa]	[-]	[kg.m ³]
Pružná svěrka	ocel	Lineární elastický izotropní	205	0,29	7 858
Kolejnice	ocel	Lineární elastický izotropní	205	0,29	7 858
Úhlová vodicí vložka	PA6	Lineární elastický izotropní	2,62	0,34	1 120
Podložka pod patu kolejnice	Pryž	Lineární elastický izotropní	0,05	0,45	2 000

3.5.4 Chování systému upevnění W14 v provozu

Systém upevnění kolejnic W 14 se používá pro betonové pražce (v ČR pražce od výrobce ŽPSV B91S/1, B 91S/2, B 03). Upevnění jedné kolejnice na jednom pražci se skládá ze dvou úhlových vodicích vložek, dvou pružných svěrek Skl14, pružné podložky pod patu kolejnice a dvou vrtulí s podložkami – Obr. 3-8. Systém drží kolejnici na betonovém pražci - Obr. 3-9 a Obr. 3-10. Všechny komponenty systému upevnění kolejnic jsou namontovány na betonový pražec ve výrobě. Při samotné realizaci je kolejnice položena na pražec, pružné svěrky jsou posunuty z předmontážní polohy do montážní polohy na patu kolejnice a utaženy. Dle předpisu SŽDC S3, dílu VI je pro tratě v ČR utahovací moment stanoven na 180 – 220 Nm (doporučený utahovací moment výrobce). [12]

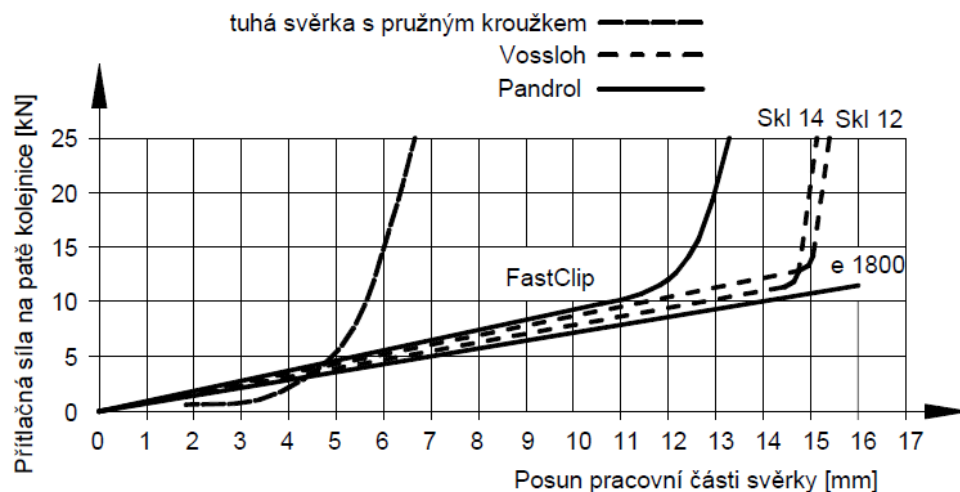
Po montáži leží pracovní ramena pružné svěrky na patě kolejnice. Mezi středním ramenem pružné svěrky a patou kolejnice je mezera, která zmizí v případě klopení kolejnice (tzv. druhotná tuhost). Klopení kolejnice může být způsobeno v případě podbíjení koleje nebo při průjezdu obloukem malého poloměru. [17]. Při dotažení svěrky předepsaným momentem (180 -220 Nm) dojde ke stlačení/zdvihu svěrky. Dle [3] a [27] činí tento zdvih, při velikosti svěrné síly 10 kN, 13 mm – viz Obr. 3-11.



Obr. 3-9: Namontovaná svěrka Skl14 (pohled shora)



Obr. 3-10: Namontovaná svěrka Skl14 (boční pohled)



Obr. 3-11: Pracovní diagram svěrek a spon dle [27]

3.5.5 Pružné svěrky Skl14

Systém upevnění je stejný pro železniční svršek jak na železničních přejezdech, tak mimo přejezdové konstrukce. Rozdílná je však povrchová úprava pružných svěrek Skl14. Pro konstrukce mimo železniční přejezdy se používají pružné svěrky Skl14 bez povrchové úpravy (v minulosti používány také na svršek na železničních přejezdech), zatímco pro železniční svršek na

železničních přejezdech a v tunelech se používají svěrky s antikorozní povrchovou úpravou (viz [12], díl VII, kapitola IV, bod 27). Bližší popis antikorozních úprav je uveden v kap. 3.2.

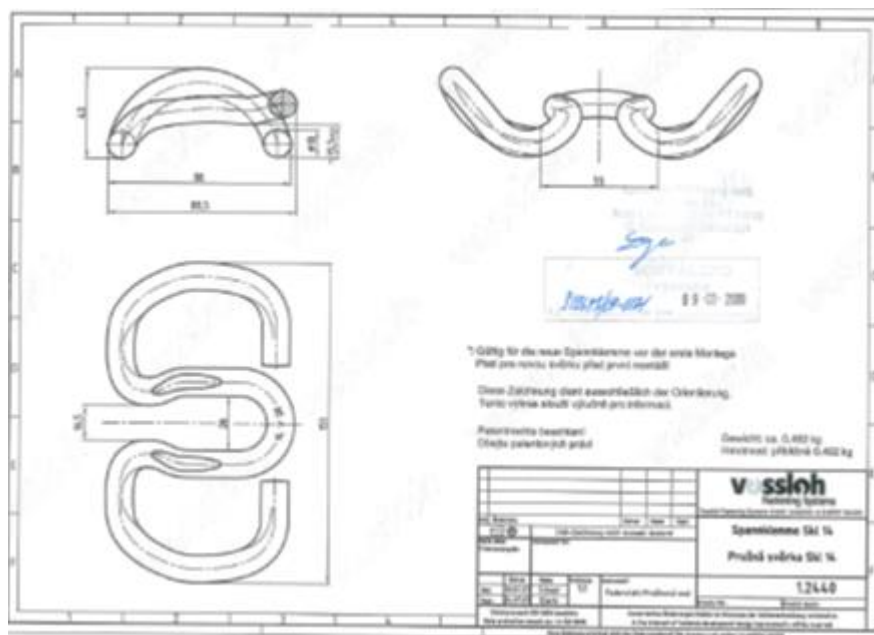
3.5.5.1 Postup výroby

Výchozí surovinou je drát požadovaného průměru dle typu svěrky – ten se krátí na požadovanou délku dle typu svěrky. Svěrka je za studena ohýbaná (materiál 38Si7). Během ohýbání dojde i k označení svěrky. Potom následuje zahřátí na teplotu 950 °C (cca 1 h), prudké ochlazení směsí voda + olej. Výsledkem je pevná, ale křehká svěrka. Následuje zahřátí na 440 – 450 °C (cca 1 h) a pak pomalé ochlazení na pokojovou teplotu.

Pokud je potřeba antikorozní úprava, její aplikace je předmětem know-how výrobce. Obecně ale dochází při tomto procesu k zahřátí svěrky tak, aby se antikorozní ochrana dostala do povrchu materiálu. Volí se taková teplota, aby nedošlo k ovlivnění vlastností svěrky.

3.5.5.2 Rozměry

Rozměry pružných svěrek jsou uvedeny na Obr. 3-12. Nejdůležitějším rozměrem z hlediska korozního úbytku je tloušťka drátu, která činí 13 mm.



Obr. 3-12: Rozměry pružných svěrek Skl14 [3]

3.5.5.3 Chemické složení

Výchozím materiálem pro pružné svěrky je 38Si7 (dle EN10089) se stupněm čistoty rovným nebo lepším K 3≤30 podle DIN 50 602. [3] Chemické složení je uvedeno v Tab. 3-2.

Tab. 3-2: Chemické složení výchozího materiálu pružných svěrek [3]

	% C	% Si	% Mn	% S	% P
min.	0,35	1,5	0,5	-	-
max.	0,42	1,8	0,8	0,025	0,025

3.5.5.4 Mechanické vlastnosti

Svěrka je vyrobena z oceli 38Si7. Materiálové charakteristiky jsou stanoveny v [18] a uvedeny v Tab. 3-3.

Tab. 3-3: Materiálové charakteristiky svěrek [18]

Označení oceli		Teplota kalení °C	Prostředí ochlazení	Teplota popouštění °C	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A %	Z %	Nárazová práce při 20 °C KU J
Značka	Číselné označení	± 10 °C		±10 °C	min.		min.	min.	min.
38Si7	1.5023	880	voda	450	1150	1300 až 1600	8	35	18

4 Ověření vlastností svěrek Skl14

Ověření mechanických (mez pevnosti, mez kluzu), strukturálních vlastností (metalografie a fraktografie) a ověření chemické odolnosti (simulace korozivního působení) je nezbytným předpokladem pro následné stanovení vlastní Metodiky hodnocení stavu pružných svěrek SKL14 v provozovaných tratích. Ověření uvedených vlastností jsem realizoval zejména na pracovištích Výukového a výzkumného centra v dopravě (VVCD), Sekce materiálového inženýrství pod vedením prof. Schmidové, Sekce dynamického a zkušebního stavu pod vedením doc. Culka a na pracovišti Ústavu chemie a technologie makromolekulárních látek, Oddělením nátěrových hmot a organických povlaků pod vedením prof. Kalendové.

4.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla užita pro ověření mechanických vlastností (mez kluzu, mez pevnosti).

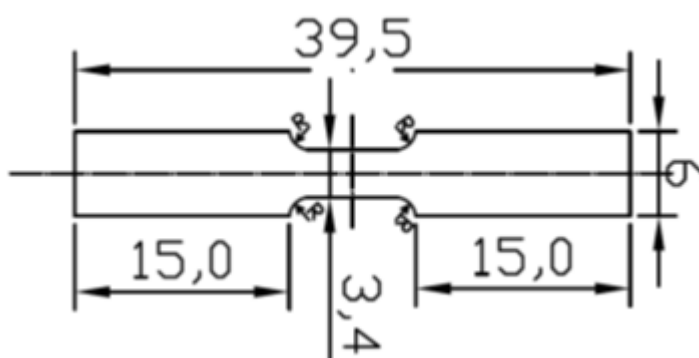
4.1.1 Příprava vzorků

Ze svěrek byly vyrobeny zkušební vzorky – viz Obr. 4-1.



Obr. 4-1: Vzorek pro tahovou zkoušku

Rozměry vzorků v mm jsou patrné z Obr. 4-2. Poloměry zaoblení v místech zúžení byly $R = 2$ mm.



Obr. 4-2: Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku

4.1.2 Postup měření

Měřicím zařízením byl Zwick Z030 – viz Obr. 4-3 a Obr. 4-4. Do čelistí byl upnut zkušební vzorek a byl spouštěn zatěžovací cyklus s krokem $0,002 \text{ s}^{-1}$, který byl řízen a zaznamenáván pomocí PC,

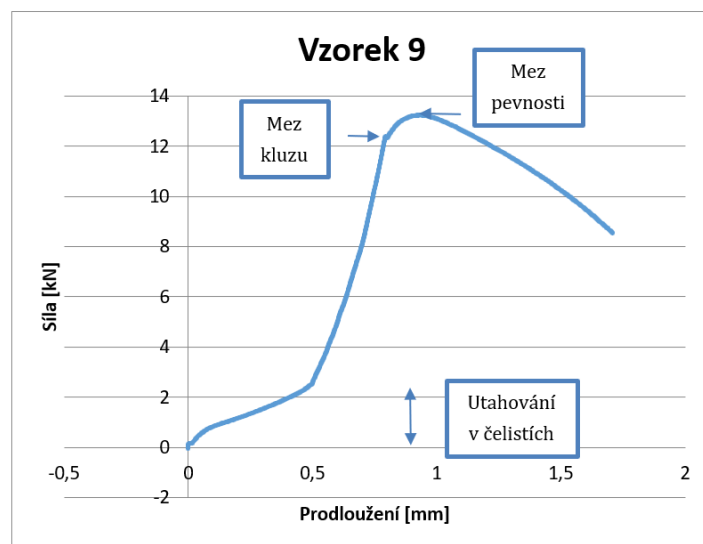
konkrétně programem Zwick testXpert Master. Poškozený vzorek po zkoušce je zobrazený na Obr. 4-6. Fotografie všech poškozených vzorků jsou na Obr. 4-7. Je patrné, že poškození všech vzorků jsou obdobná. Výsledky byly exportovány ve formátu prodloužení v mm a síla v kN a následně vyhodnoceny v programu Microsoft Excel – Obr. 4-5. Vzhledem k faktu, že nebylo možné dodržet počáteční měřenou délku dle [46], která činí 20 mm, není možné stanovit deformaci. Grafické výstupy jsou proto uvedeny v jiné závislosti.



Obr. 4-3: Zkušební zařízení Zwick Z030



Obr. 4-4: Vzorek upnutý do čelistí pro tahovou zkoušku



Obr. 4-5: Graf průběhu zatěžování



Obr. 4-6: Vzorek po zkoušce



Obr. 4-7: Poškozené vzorky po tahové zkoušce

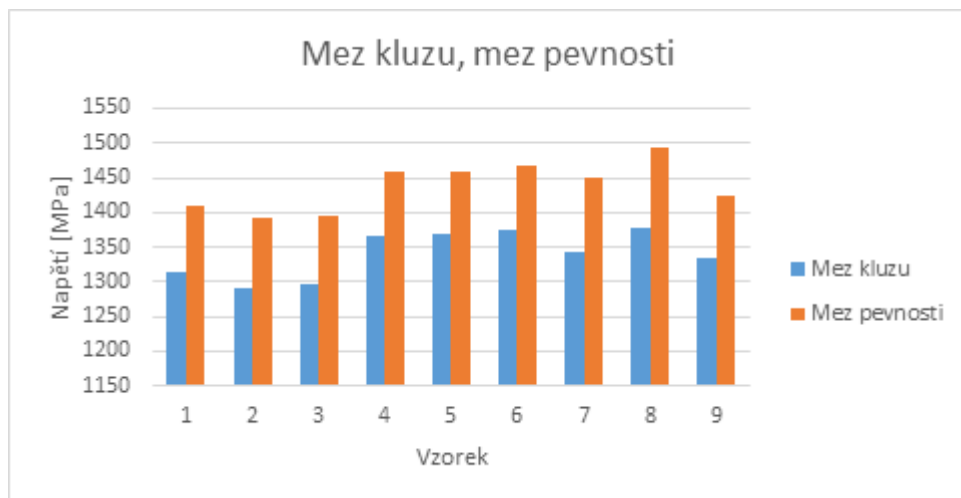
4.1.3 Výsledky

Výsledky meze kluzu a meze pevnosti jsou zobrazeny v Tab. 4-1 a Obr. 4-8. Grafické výstupy tahové zkoušky jsou uvedeny v příloze A. Hodnoty meze kluzu byly zjištěny v rozmezí 1289 až 1376 MPa, hodnoty meze pevnosti pak v rozmezí 1392 až 1492 MPa. Hodnoty mezí byly vypočítány ze vztahu $\sigma = \frac{F}{S_0}$.

Tab. 4-1: Vyhodnocení tahových zkoušek

Vzorek	f_y	f_u
	MPa	MPa
1	1312,986	1409,959
2	1289,484	1392,535
3	1297,179	1396,418
4	1365,768	1458,539
5	1370,156	1459,127

6	1374,15	1466,686
7	1344,041	1449,013
8	1376,519	1492,328
9	1334,212	1424,498
Max	1376,519	1492,328
Min	1289,484	1392,535
Kvantil 10 %	1295,64	1395,641
Kvantil 75 %	1370,156	1459,127



Obr. 4-8: Výsledky tahových zkoušek

Grafické znázornění výsledků je uvedeno v Příloze A. U některých grafů je dobře patrná mez kluzu, u jiných příliš výrazná není.

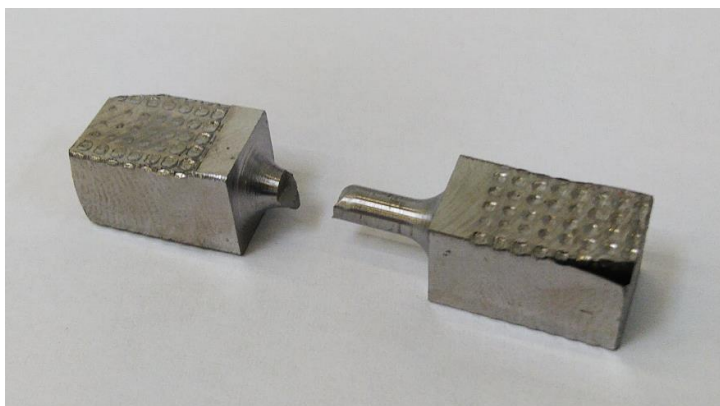
Porovná-li se zjištěné hodnoty s hodnotami dle [18], které jsou uváděny pro ocel, ze které je svěrka vyrobena (38Si7), tedy mez kluzu o hodnotě 1150 MPa a mez pevnosti mezi 1300 až 1600 MPa, je patrné, že hodnoty meze kluzu se pohybují nad hodnotami uváděnými v [18], hodnoty meze pevnosti jsou pak v mezích, které udává [18].

4.2 Testy na únavu pružné svěrky Skl14

Pružné svěrky jsou vystaveny vysokému dynamickému namáhání, proto je zkoumání jejich únavových charakteristik vždy prioritou. Ve své disertační práci tuto problematiku diskutuji v rámci řešeršní činnosti (kap. 3.3). Vzhledem k faktu, že únavové testy byly v mé práci realizovány na materiálových vzorcích vyňatých ze svěrky a nikoli realizovány jako testy únavy na konstrukčních celcích, jsou z pohledu mé práce důležitější informace z článku [42]. V rámci pozdějšího hodnocení životnosti jsem dospěl k podobným hodnotám napětí při vzniku únavového porušení (v článku jsou prezentovány hodnoty 1250 MPa). K obdobným závěrům došli kolegové i při realizaci únavových testů celého systému upevnění [43], kdy byl únavový limit F_e zjištěn 1200 MPa.

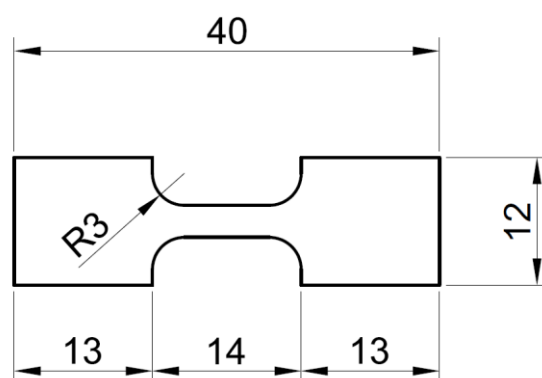
4.2.1 Příprava vzorků

Ze svěrek byly vyrobeny zkušební vzorky – viz Obr. 4-9.



Obr. 4-9: Vzorek zničený únavovou zkouškou

Tvar vzorku byl po předchozích negativních zkušenostech se vzorky kruhovými (podobného tvaru jako u tahových zkoušek) a vzorky plochými volen čtvercový s plynulými přechody do kruhového průřezu (vzorek je osově symetrický). Rozměry vzorků v mm jsou patrné z Obr. 4-10. Poloměry zaoblení v místech zúžení byly $R = 3$ mm.



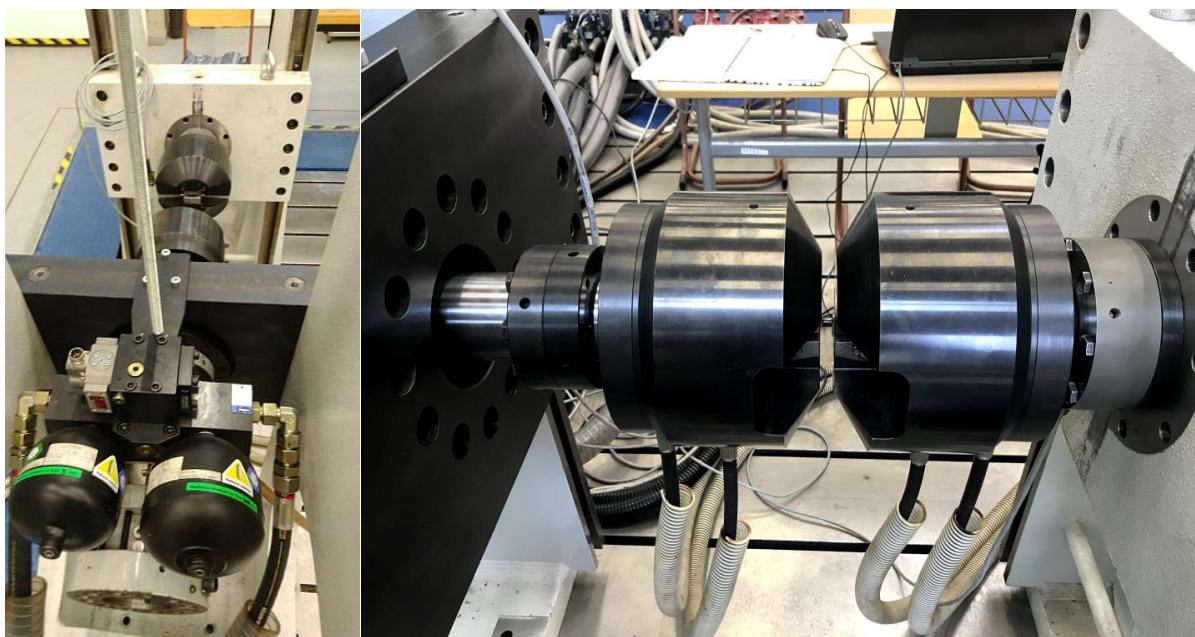
Obr. 4-10: Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku

4.2.2 Postup měření

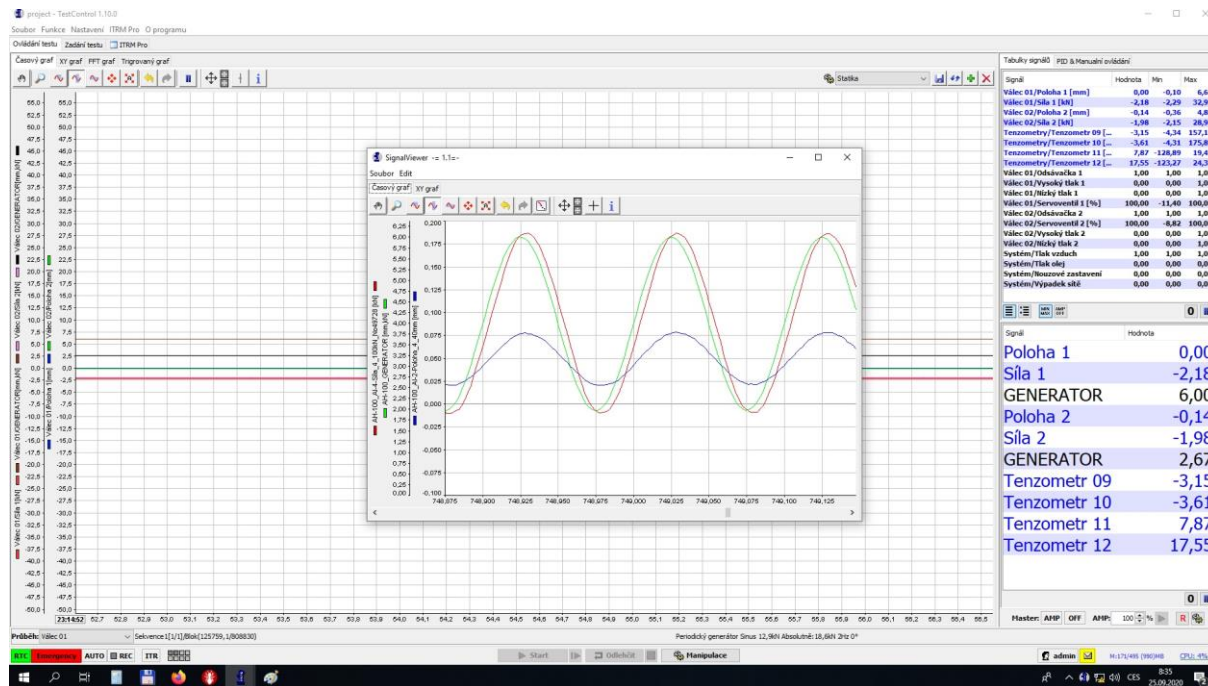
Měřicím zařízením byl elektrohydraulický systém INOVA s využitím válce AH100-40 – viz Obr. 4-11 a Obr. 4-12. Do čelistí byl upnut zkušební vzorek a bylo spouštěno harmonického zatěžování. Střední hodnota rozkmitu byla vzhledem ke stabilitě systému volena 4 kN – viz Obr. 4-13. Frekvence zatěžování byla 10 Hz.



Obr. 4-11: Elektrohydraulický systém INOVA



Obr. 4-12: Sestava zatěžovacího válce INOVA AH 100-40



Obr. 4-13: Prostředí systému INOVA

4.2.3 Výsledné cykly do porušení

Výsledné hodnoty počtů cyklu do lomu jsou zobrazeny v Tab. 4-2. V tabulce jsou zobrazeny pouze relevantní hodnoty (vzorky porušené z jiných důvodů, např. selhání systému, nebo naopak vzorky neporušené nejsou uvedeny).

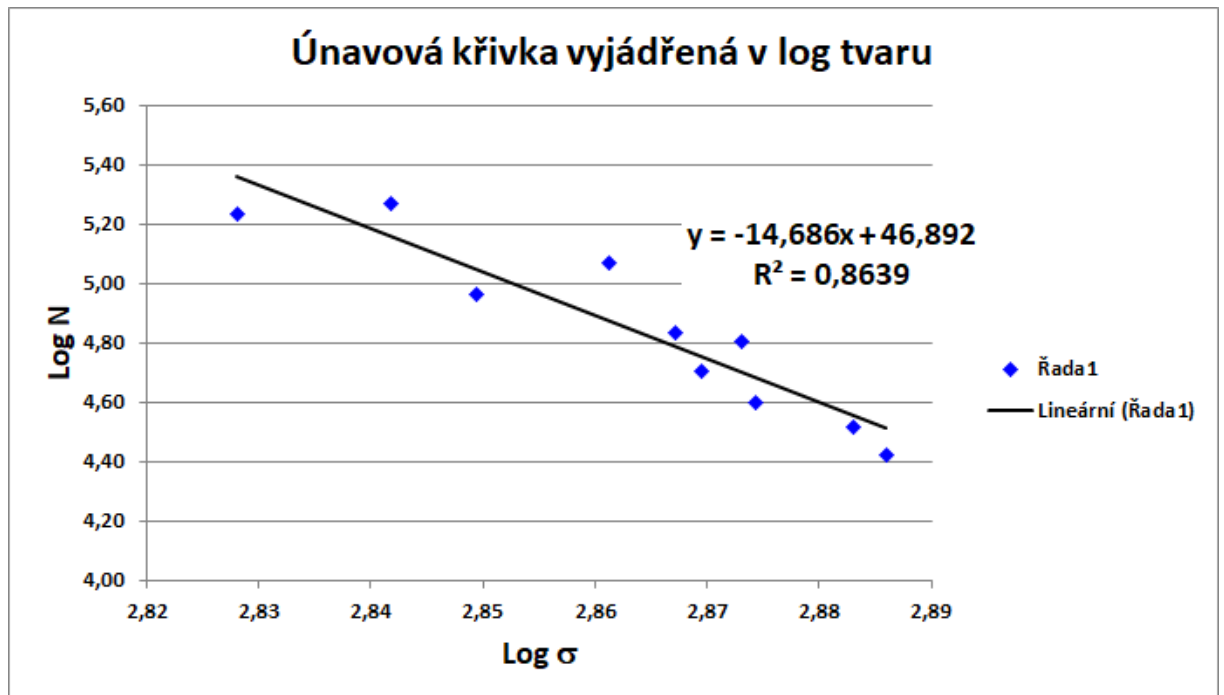
Tab. 4-2: Vyhodnocení tahových zkoušek

č. vzorku	jméno vzorku	průměr [mm]	Off set [kN]	Ampl. [kN]	plocha [mm ²]	napětí max. [MPa]	napětí rozkmit [MPa]	počet cyklů [-]
1	08H	2,99	4,00	2,70	7,02	954	769	26 265
2	09H	3,03	4,00	2,70	7,21	929	749	39 805
3	10H	2,99	4,00	2,60	7,02	940	741	50 401
4	11H	3,00	4,00	2,70	7,07	948	764	32 625
5	13H	2,96	4,00	2,50	6,88	945	727	117 000
6	14H	2,94	4,00	2,50	6,79	957	737	68 388
7	15H	2,92	4,00	2,50	6,70	971	747	63 347
8	17H	2,94	4,00	2,40	6,79	943	707	92 007
9	18H	2,95	4,00	2,30	6,83	922	673	171 691
10	19H	2,84	4,00	2,20	6,33	979	695	186 307

4.2.4 Konstrukce únavové křivky

Vzhledem k faktu, že únavová křivka se zpravidla vyjadřuje jako závislost počtu cyklů na napětí, např. v [54] bylo pro získání charakteristických hodnot (sklon a konstanta únavové křivky) uvažováno v uvedené formě i grafické zobrazení - Obr. 4-14.

Rovnice únavové křivky v logaritmickém tvaru: $\log N = \log a - m * \log \Delta \sigma_R$ (10)



Obr. 4-14: Grafická identifikace charakteristik únavové křivky

Získané charakteristické hodnoty únavové křivky:

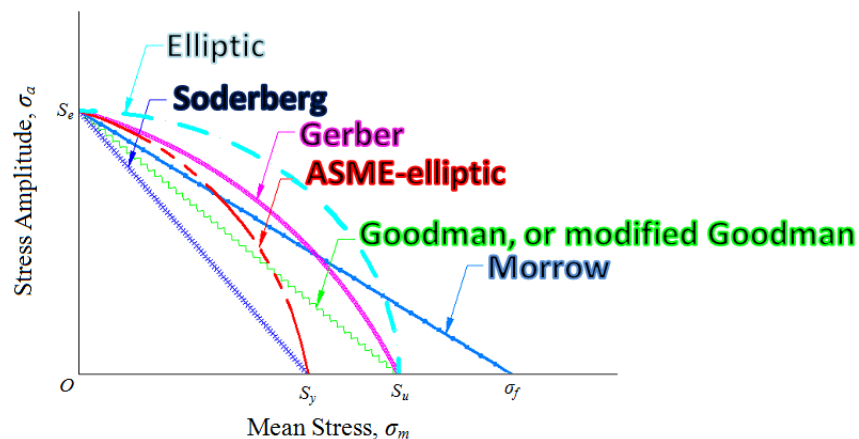
$$m = 14,686$$

$$\log C = 46,892$$

jsou však poplatné statickému předpětí při zatěžování, které činilo 4 kN. Aby bylo možné únavovou křivku použít pro vyhodnocování napětí, bylo nezbytné křivku transformovat pro nulovou střední hodnotu tak, aby odpovídala střídavému zatěžování.

4.2.5 Transformace únavové křivky

Transformace únavové křivky lze realizovat několika způsoby, např. dle Soderberga, Gerbera, Goodmana, ASME, Morrowa. Transformační rozdíly jsou prezentovány na Obr. 4-15.



Obr. 4-15: Transformační křivky dle různých teorií [55]

Vzhledem k charakteru vysokopevnostní, avšak houževnaté oceli, jsem pro transformaci volil vztahy dle Goodmana [56]:

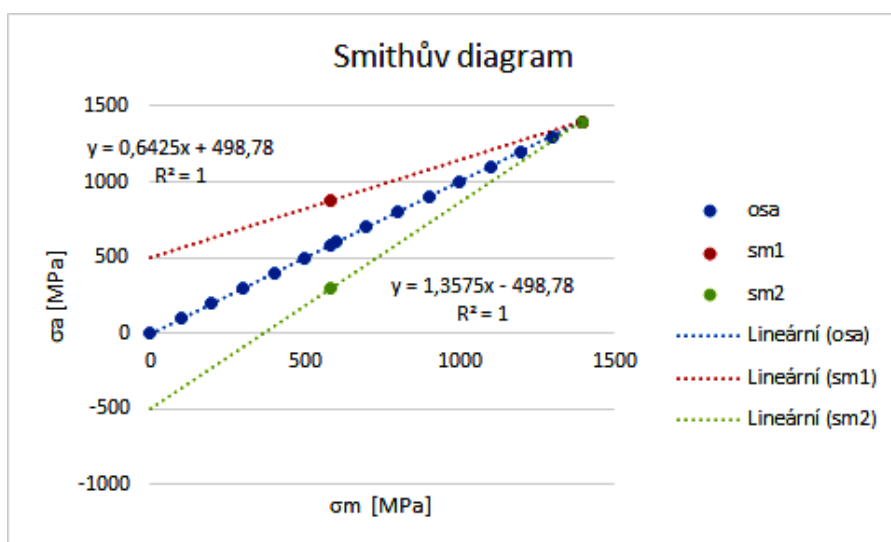
$$\frac{\sigma_m}{\sigma_b} + \frac{\sigma_a}{\sigma_w} = \frac{1}{n} \quad (10)$$

kde	$n = \sigma_a / \sigma_y$	(součinitel bezpečnosti) ($n=1$) (měl by být dán poměrem meze kluzu a pracovního napětí)
	σ_w	smluvní mez únavy při nulové stř. hodnotě
	σ_b	mez pevnosti
	σ_a	rozkmit na dané stř. hodnotě
	σ_m	stř. hodnota rozkmitu

Nutné hodnoty pro transformaci:

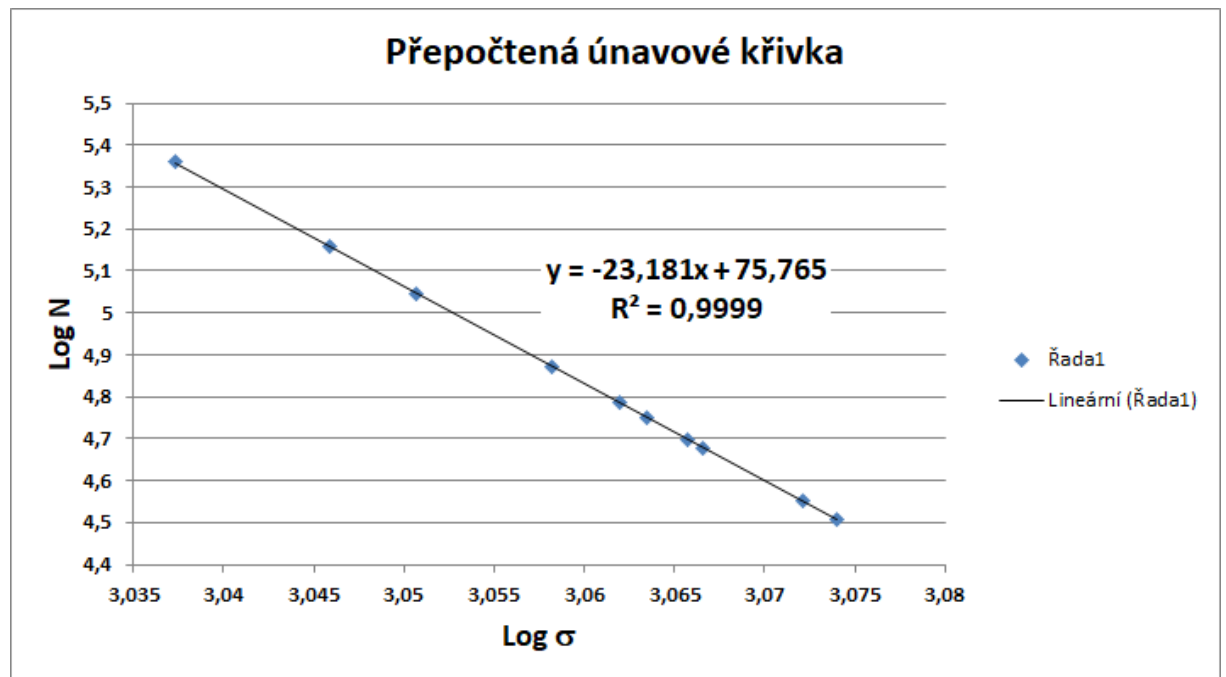
$\sigma_b = 1395 \text{ MPa}$	dle tahové zkoušky, viz. Kap. 4.1
$\sigma_y = 1295 \text{ MPa}$	dle tahové zkoušky, viz. Kap. 4.1
$\sigma_m = 583 \text{ MPa}$	zjištěno na základě stanovení průměrné průřezové plochy vzorků a statického předpětí 4 kN
$\sigma_w = 997,56 \text{ MPa}$	zjištěno na základě Smithova diagramu (2x498,78 MPa)

Konstrukce Smithova diagramu pro stanovení smluvní meze únavy při nulové stř. hodnotě je prezentována na Obr. 4-16.



Obr. 4-16: Konstrukce Smithova diagramu

Transformací dle Goodmana byla následně určena únavová křivka pro nulovou střední hodnotu zatěžování (střídavé zatěžování), její vyjádření v logaritmických souřadnicích je uvedeno na Obr. 4-17.



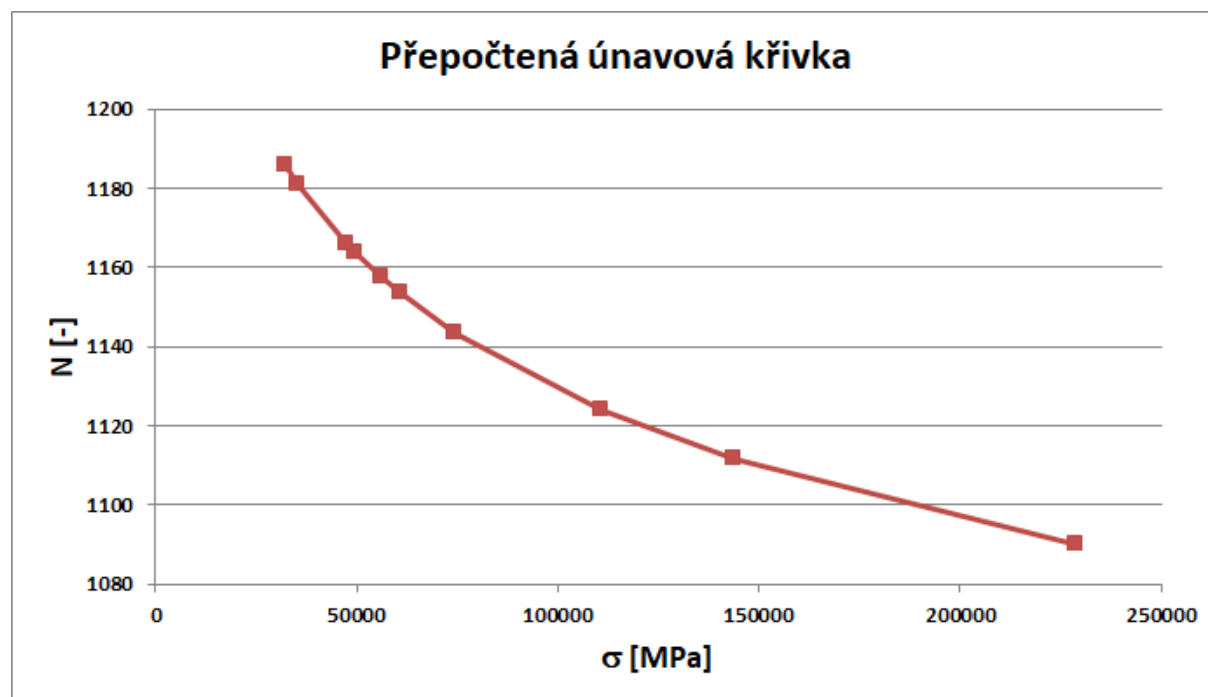
Obr. 4-17: Grafická identifikace charakteristik přepočítané únavové křivky

Získané charakteristické hodnoty únavové křivky:

$$m = 23,181$$

$$\log C = 75,765$$

Přepočtená křivka je v přirozeném tvaru zobrazena na Obr. 4-18.



Obr. 4-18: Přepočtená únavová křivka v přirozeném tvaru

4.3 Metalografie pružné svěrky Skl14

Metalografické charakteristiky pružných svěrek definované v [3] byly ověřeny metalografickým rozбором. Při tomto rozboru byl použit světelný mikroskop, elektronový mikroskop a dále byla ověřena tvrdost pružných svěrek metodou dle Vickerse.

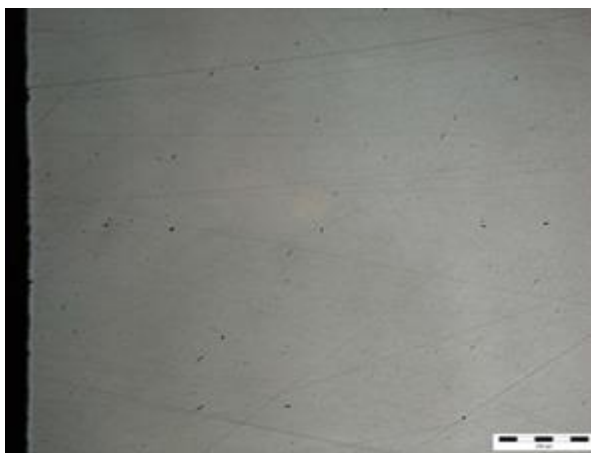
4.3.1 Charakteristiky a zkoušky pružných svěrek Skl14

Požadavky jsou definovány v [3], konkrétně:

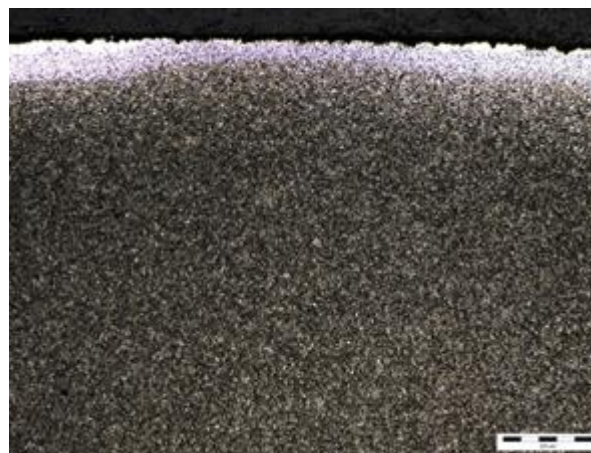
- Odst. 2.4: Hloubka oduhličení u hotového výrobku může být max. 0,2 mm. Tato hodnota je v souladu s [18].
- Odst. 3.1.2: V hotovém výrobku se nesmí vyskytovat makroskopické vměstky.
- Odst. 3.1.4: Uvedeny požadavky, které musí být zkušeny v průběhu výroby a na hotovém výrobku. Vzorky se hodnotí vizuální kontrolou po kalení (požadována jemnozrnná struktura), následuje tvrdost po prudkém ochlazení (min. 560 HV), vizuální kontrola povrchu, kontrola rozměrů a tvrdosti podle Vickerse hotového výrobku. Poté následuje Magna-Flux (kontrola trhlin magnetickou metodou, svěrky bez trhlin) a metalografie povrchové vrstvy pro vyhodnocení struktury. Povrch musí vykazovat martenzitickou strukturu a nesmí vykazovat žádné závady ovlivňující funkčnost povrchové plochy.
- Četnosti a rozsahy zkoušek jsou předmětem interních dokumentů.

4.3.2 Příprava vzorku

K metalografické analýze byla použita nová svěrka Skl14 bez antikorozi povrchové úpravy. Ze svěrky byla odříznuta část ramene (pilou MTH MIKRON 110), a to včetně zploštělého místa. Toto místo bylo vybráno záměrně z důvodu ověření, zda zploštělé místo ovlivňuje strukturu vzorku, což se nepotvrdilo. Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorku, byl vzorek při řezání chlazen. Po odříznutí byl vzorek zalisován do bauxitu (lis BUEHLER SimpliMet 3000), následně došlo k broušení vzorku na brusných papírech různých drsnosti a leštění vzorku diamantovou pastou. Kvůli zvýraznění struktury vzorku došlo k naleptání povrchu 3% Nitalem (roztok kyseliny dusičné v etylalkoholu). Postup přípravy vzorku je standardní, popsán je např. v [20].



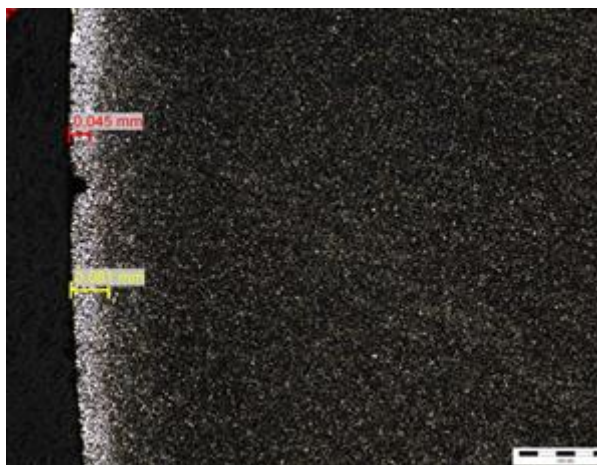
Obr. 4-19: Foto ze světelného mikroskopu před naleptáním vzorku



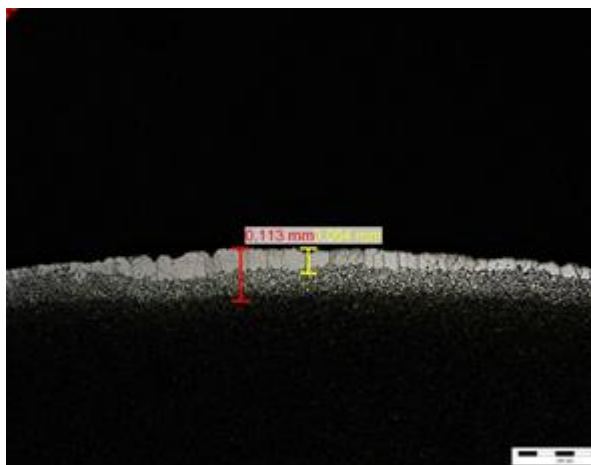
Obr. 4-20: Foto ze světelného mikroskopu po naleptání vzorku.

4.3.3 Zkoumání světelným mikroskopem

Ke zkoumání byl použit světelný mikroskop NEOPHOT 32. Nejprve byl zkoumán vzorek v nenaleptaném stavu – viz Obr. 4-19. V nenaleptaném stavu při zvětšení podle souvisejících norem byl kontrolován případný zvýšený výskyt nečistot v povrchové vrstvě, popř. výskyt povrchových mikroskopických vad. V obou případech nebyly zjištěny žádné podstatné indikace v možné souvislosti s únosností svěrky. Následně došlo k naleptání vzorku 3% Nitalem – viz Obr. 4-20. Po naleptání vzorku bylo zjištěno nerovnoměrné oduhličení na povrchu vzorku - Obr. 4-21 a Obr. 4-22. Dle [18] nesmí u hotových výrobků oduhličená vrstva překročit tloušťku 0,2 mm, což bylo u daného vzorku dodrženo. Dále byla zjištěna heterogenita v jádře vzorku - Obr. 4-23, která indikuje, že vzorek nebyl prokalen v celém průřezu. Tomu odpovídají i výsledky tahové zkoušky, kdy byly vzorky vyrobeny z jádra pružné svěrky. Při zkoumání povrchu vzorku byla také zjištěna počínající koroze.



Obr. 4-21: Oduhličení na povrchu vzorku při zkoumání světelným mikroskopem



Obr. 4-22: Oduhličení na povrchu vzorku při zkoumání světelným mikroskopem

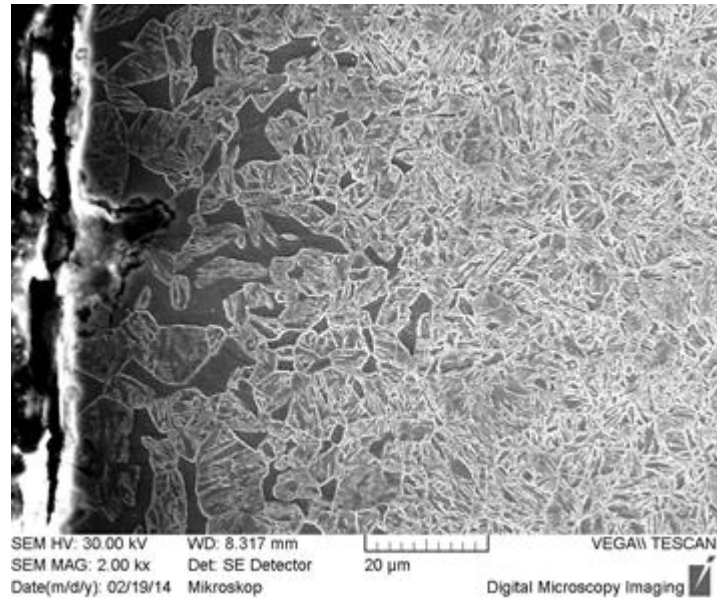


Obr. 4-23: Heterogenita v jádře vzorku.

4.3.4 Zkoumání elektronovým mikroskopem

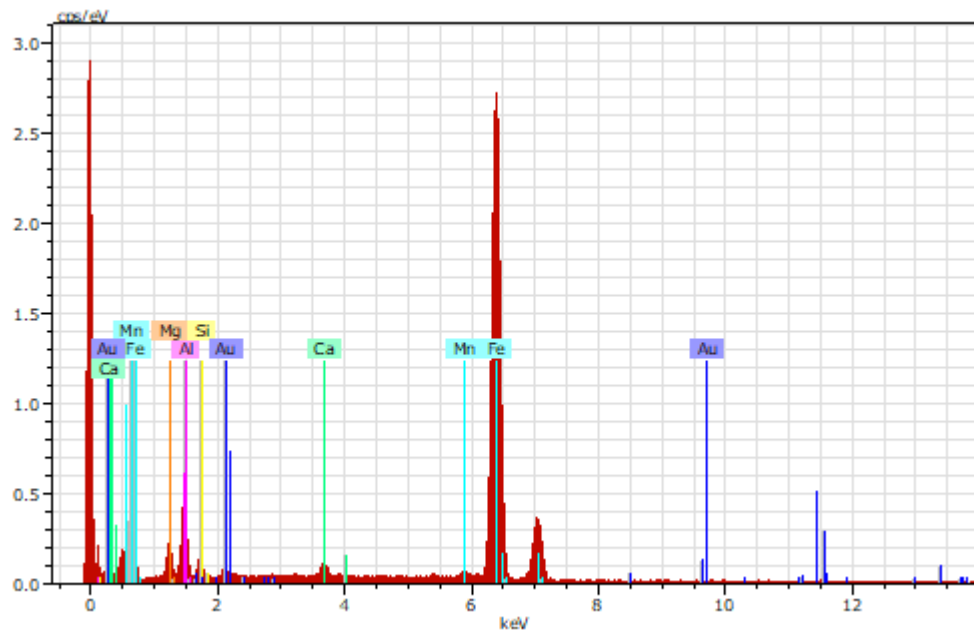
Před vložení vzorku do elektronového mikroskopu byl vzorek pozlacen. Důvodem je zabezpečení vodivosti, aby nedošlo při ataku jeho povrchu elektrony k jeho nabití. Byl použit elektronový mikroskop TESCAN 5130SB a SW Analysis.

Při zkoumání bylo potvrzeno zjištění ze světelného mikroskopu, tedy oduhličení povrchu vzorku, a to na ferit. Oduhličení na ferit má za následek snížení korozní odolnosti, což se také potvrdilo a byla zjištěna koroze této oduhličené zóny - Obr. 4-24. Oduhličení povrchové vrstvy má rovněž negativní vliv na únavovou odolnost.



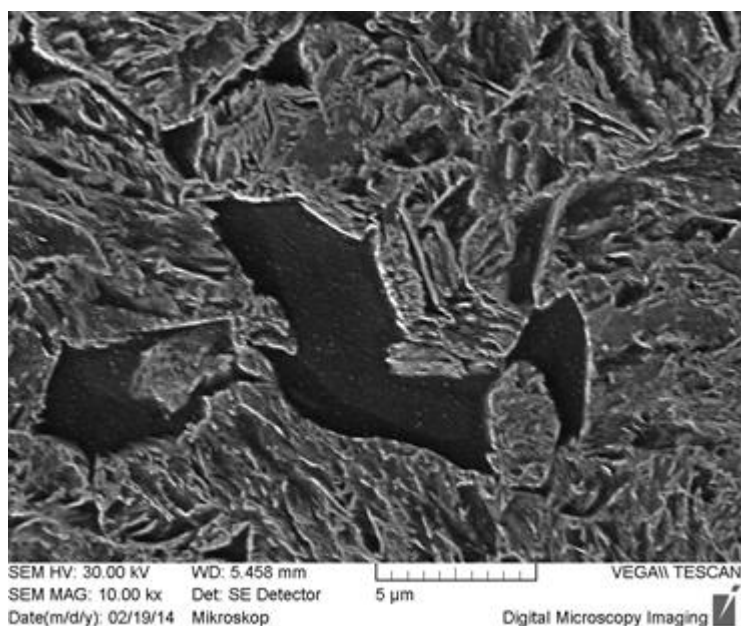
Obr. 4-24: Mikrostruktura povrchu vzorku

Dále byla zjištěna přítomnost mikroskopických vměstků. Po analýze těchto vměstků bylo zjištěno, že jde převážně o výskyt komplexních oxidů, tedy Al_2O_3 se zastoupením dalších prvků podle afinity ke kyslíku. Složení vměstku je zobrazeno na Obr. 4-25.



Obr. 4-25: Složení vměstku zjištěné analýzou v elektronovém mikroskopu

Dalším zjištěním byl nález malého množství karbidů v povrchu vzorku, což ukazuje na nízko popuštěný materiál - Obr. 4-26.



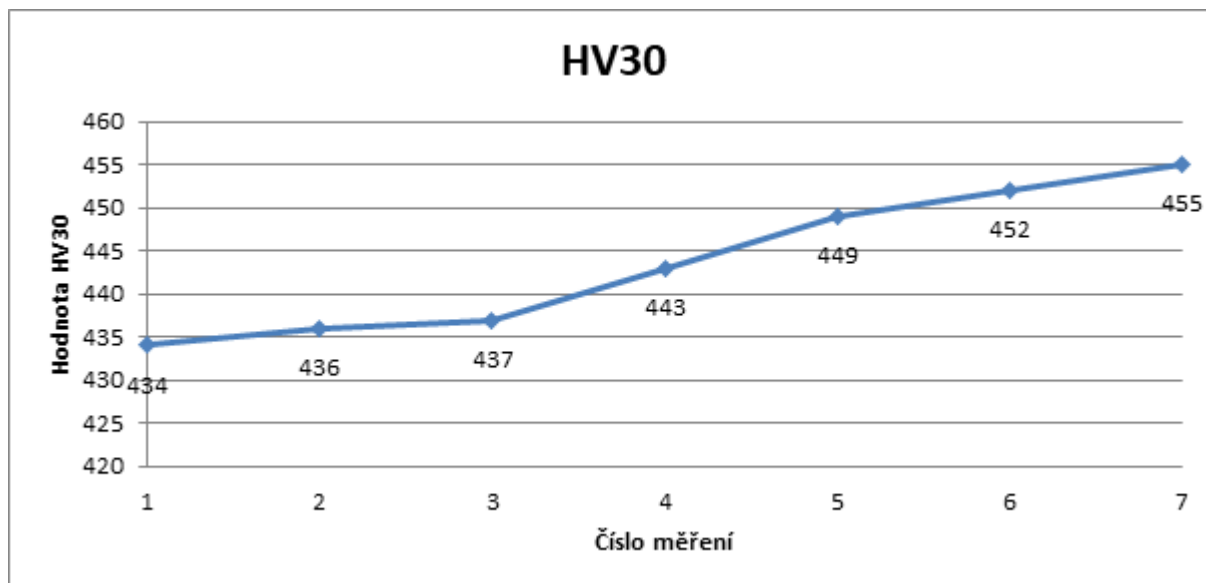
Obr. 4-26: Mikrostruktura jádra vzorku s viditelnými karbidy (světlé tečky v tmavé oblasti)

Struktura povrchu vzorku byla martenzitická. Po vyhodnocení vzorku světelným a elektronovým mikroskopem lze konstatovat, že nebyly nalezeny žádné odchylky vůči hodnotám, které deklaruje výrobce v [3].

4.3.5 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Výrobce deklaruje tvrdost pružných svěrek Skl14 na 400 – 460 HV30 [3], tzn. stanovení tvrdosti měřením dle Vickerse podle ČSN EN ISO 6507-2.

K měření byl použit tvrdoměr Zwick / Roell ZHU 2,5. Pro měření byl připraven nový vzorek. Vzorek byl odříznut a broušen. Měřeno bylo metodou dle Vickerse podle ČSN EN ISO 6507-2. Do materiálu byl zatlačován hrot silou 300 N, poté následovalo odlehčení a změření plochy, kterou vtisk vytvořil. Celý proces byl řízen automaticky počítačem se speciálním SW. Měření bylo provedeno od jádra vzorku (číslo měření 1) k jeho okraji (číslo měření 7) po cca 1 mm. Výsledky jsou shrnuty v Obr. 4-27.



Obr. 4-27: Změřené hodnoty tvrdosti HV30

Z naměřených hodnot je patrné, že hodnoty jsou v rozmezí 434 – 455 HV30. Splňují tedy požadavky [3].

4.3.6 Vyhodnocení metalografie pružné svěrky

Pružná svěrka Skl14, která byla podrobena metalografickému zkoumání, splňuje požadavky [3] – viz Kapitola 4.3.1, a to ve všech zkoumaných parametrech. Byly sice zjištěny efekty snižující korozní a únavovou odolnost, ovšem v dovoleném rozsahu pro daný výrobek.

4.4 Simulace koroze na vzorcích v laboratoři

Korozní odolnost svěrek Skl14 byla zjišťována v simulovaném korozním prostředí v laboratoři. Bylo zjišťováno, zda jsou svěrky s antikorozní úpravou KTL odolnější oproti svěrkám bez antikorozní povrchové úpravy. Za účelem realizovaných simulací byly ze strany VOSSLOH DRÁŽNÍ TECHNIKA s.r.o. poskytnuty důvěrné informace o výrobě a zkoušení pružných svěrek.

Z materiálů, které byly poskytnuty zástupcem Vosslohu pro ČR vyplývá, že jsou pružné svěrky výrobcem korozně zkoušeny. Zkoušky jsou prováděny standardním postupem dle normy [10], zkoušky neutrální solnou mlhou. Výsledkem těchto zkoušek je zjištění, že svěrky s povrchovou úpravou KTL vydrží korozně neporušeny po dobu 240 až 1000 h.

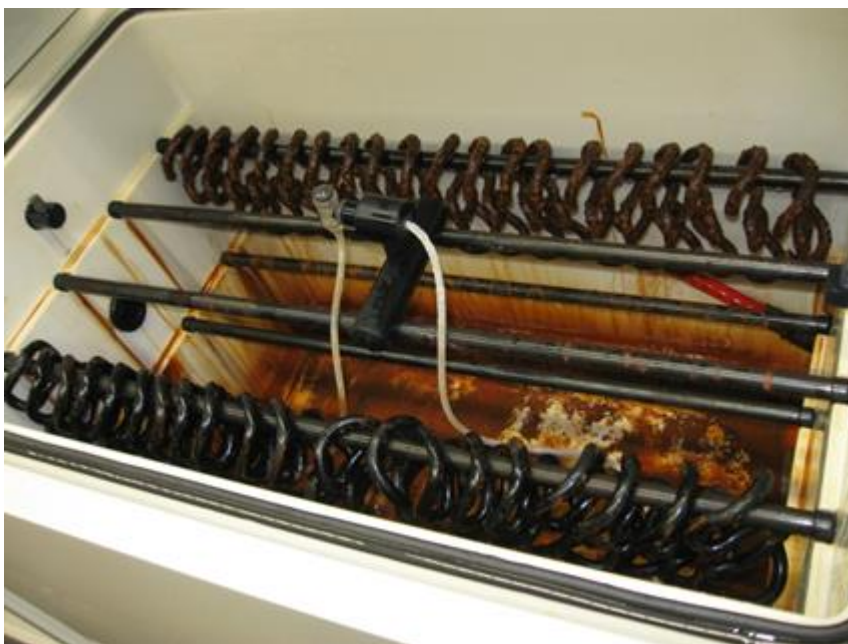
V rámci ověření deklarovaných antikorozních vlastností byly svěrky podrobena testům dle [10] ve shodě s testy prováděnými výrobcem. Následně byly testy doplněny o ponorovou zkouškou v roztoku elektrolytu. Důvodem doplnění byla nízká odezva vzorků na postup dle [10].

4.4.1 Zkouška neutrální solnou mlhou dle ČSN EN ISO 9227

Zkouška neutrální solnou mlhou dle [10] slouží k simulování prostředí se zvýšeným obsahem chloridů, tedy např. přímořské oblasti nebo solené silnice (příklad této práce). Zkouška využívá

k urychlení koroze působení NaCl, zvýšené vlhkosti a zvýšené teploty. Ke zkoušce byla použita korozní komora SKB 400 A-TR výrobce Gebr. Liebish GmgH&Co, Bielefeld, SRN, typové číslo komory je 41066211.

Zkoušce neutrální solnou mlhou bylo vystaveno 40 vzorků, z toho bylo 20 vzorků bez antikorozi povrchové úpravy a 20 vzorků s povrchovou úpravou KTL – Obr. 4-28. Vzorky byly umístěny do korozní komory, kde byly vystaveny působení 5% NaCl za teploty 35 ± 1 °C. Zkouška probíhala ve dvanáctihodinových cyklech. V těchto cyklech docházelo po dobu šesti hodin vystavení vzorků 5% mlze NaCl, následovalo dvouhodinové sušení vzorků při teplotě 28 °C a cyklus byl ukončen čtyřhodinovou kondenzací vlhkosti při teplotě 40 °C.



Obr. 4-28: Vzorky umístěné v korozní komoře. Vzadu vzorky bez antikorozi povrchové úpravy, vpředu vzorky s úpravou KTL (vzorky po cca 920 h zatěžování)

V průběhu zkoušky byly vzorky sledovány a byl průběžně focen vzorek, který dokumentuje, jak docházelo k postupnému nárůstu korozních produktů na povrchu svěrek. Sledování vzorků v průběhu zkoušky je dokumentováno v Příloze B. Zkouška byla zahájena 31. 10. 2012 a ukončena byla 11. 1. 2013. Korozní komora zaznamenávala celkovou dobu zkoušky, která činila 1720 h. Doporučená maximální doba zkoušení dle [10] je 1000 h. Po 1720 h bylo rozhodnuto o ukončení zkoušení v korozní komoře. Při kontrole zkoušených vzorků ve dvou po sobě následujících obdobích již nedocházelo k výraznějšímu nárůstu vrstvy korozních produktů – Obr. 4-29 a Obr. 4-30. Největší příčinou zastavení šíření koroze u vzorků bez antikorozi úpravy bylo vytvoření bariéry z korozních zplodin na povrchu zkoušených vzorků. Tyto korozní zplodiny částečně zabraňovaly pronikání korozního prostředí k materiálu svěrek. V reálném provozu by v důsledku dynamického namáhání svěrek docházelo k odlupování a odpadávání korozních zplodin a koroze by následně pokračovala dále do těla svěrky. U svěrek s povrchovou vrstvou KTL k výrazným projevům koroze nedošlo. Objevily se pouze lokální projevy koroze.



Obr. 4-29: Vzorčky po 1520 h zatěžování v korozní komoře. Nahoře vzorek s povrchovou úpravou KTL, dole vzorek bez antikorozní povrchové úpravy



Obr. 4-30: Vzorčky po 1720 h zatěžování v korozní komoře. Vlevo vzorčky s povrchovou úpravou KTL, vpravo vzorčky bez antikorozní povrchové úpravy

4.4.2 Ponorová zkouška v roztoku elektrolytu

Vzhledem k faktu, že v korozní komoře docházelo pouze k malému nárůstu korozních produktů na zatěžovaných vzorcích, bylo přistoupeno k ponorové zkoušce v roztoku elektrolytu složeného z 5% NaCl a 3,5% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Podkladem pro tuto zkoušku byla metoda „Prohesion“ [47], která byla modifikována. Dle [47] je použit roztok 0,05% NaCl a 0,35% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (Harrisonovův roztok). Tento roztok má v korozní komoře nahradit 5% roztok NaCl. [21] Pro účely zatěžování

pružných svěrek Skl14 byly koncentrace obou složek zvětšeny 100x (NaCl), resp. 10x $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ a výsledný roztok nebyl použit v korozní komoře, ale jako ponorová zkouška v roztoku elektrolytu. Navržený postup zkoušení je v souladu s [9], tzn. je možné provádět cyklové zkoušky, které znamenají kombinaci zrychlených korozních zkoušek, v tomto případě zkouška v korozní komoře, s ponorem do roztoků různých chemických látek (síranů nebo chloridů). V tomto případě byla použita kombinace obou, tedy jak síranu, tak chloridu. Zkouška tedy nebyla provedena podle normy, ale je možné ji kdykoli opakovat.

Ke zkoušce byla použita polovina vzorků, která byla vyjmuta po 1720h zkoušce neutrální solnou mlhou, tzn. 10 vzorků bez antikorozi povrchové úpravy a 10 vzorků s povrchovou úpravou KTL. Pro zkoušku byla použita plastová nádoba, do které byl umístěn speciálně vytvořený plechový profil, na kterém byly zavěšeny zkoušené vzorky – Obr. 4-31 a Obr. 4-32.



Obr. 4-31: Plastová nádoba s držákem na uchycení vzorků při ponorové zkoušce v roztoku elektrolytu



Obr. 4-32: Vzorky umístěné do nádoby pro ponorovou zkoušku v roztoku elektrolytu. Vzorky jsou po 1720 h v korozní komoře a 3 cyklech ponorové zkoušky + omytí mořicím roztokem. Vlevo – vzorky bez antikorozi povrchové úpravy, vpravo – vzorky s povrchem KTL

Vzorky byly ponořeny do roztoku elektrolytu tvořené 5% NaCl a 3,5% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ v destilované vodě. Roztok elektrolytu byl každých 48 h po dobu cca 5 min provzdušněn tlakovým vzduchem. Po cca 30 dnech byly vzorky vyjmuty, ponořeny na cca 5 min. do mořicího roztoku a následně došlo k mechanickému odstranění zbytku korozních produktů a odstranění zbytků mořicího roztoku ze vzorků proudem destilované vody. Mořicí roztok byl připraven rozpuštěním 5 g urotropinu (hexamethylentetraamin) v 1 l 20% HCl. [22, 23] Mořicí roztok byl použit za účelem odstranění korozních zplodin z povrchu pružných svěrek. Postup odstranění korozních zplodin z povrchu vzorků je dále v textu označován jako ošetření mořicím roztokem. Odstraněním korozních zplodin byl odstraněn jejich bariérový efekt a korozní prostředí mohlo efektivněji napadat povrch pružných svěrek. Po ošetření byly vzorky vloženy do nově připraveného roztoku elektrolytu. Starý roztok elektrolytu byl odstraněn, jelikož obsahoval velké množství korozních zplodin - Obr. 4-33.



Obr. 4-33: Vzorky ponořené do roztoku elektrolytu

Ponorová zkouška v roztoku elektrolytu byla zahájena 11. 3. 2013, k výměně roztoku, do kterého byly vzorky ponořeny a jejich ošetření mořicím roztokem došlo 12. 4. a 14. 5. 2013 a ukončení ponorové zkoušky bylo 14. 6. 2013. Celkem byly tedy vzorky podrobeny 3 cyklům ponorové zkoušky po celkovou dobu 96 dní, cca 2300 h. Sledování průběhu zkoušky je uvedeno v Příloze C. Výsledná podoba vzorků po 1720 h v korozní komoře a 3 cyklech ponorové zkoušky v roztoku elektrolytu je zobrazena na Obr. 4-34 a Obr. 4-35.



Obr. 4-34: Vzorek bez antikoroziční úpravy po všech laboratorních korozních zatěžováních a ošetření mořicím roztokem



Obr. 4-35: Vzorek s povrchovou úpravou KTL po všech laboratorních korozních zatěžováních a ošetření mořicím roztokem

4.4.3 Vyhodnocení koroze na vzorcích

V Příloze B a Příloze C je pomocí fotografií dokumentováno, jak koroze na pružných svěrkách postupovala. V laboratoři bylo připraveno celkem 40 vzorků. Vzorky jsou následující:

- 10 ks bez antikoroziční povrchové úpravy po 1720 h v korozní komoře.
- 10 ks s antikoroziční povrchovou úpravou KTL po 1720 h v korozní komoře.

- 10 ks bez antikorozní povrchové úpravy po 1720 h v korozní komoře + 96 dnech ponorové zkoušky v roztoku elektrolytu + oplachování mořicím roztokem.
- 10 ks s antikorozní povrchovou úpravou KTL po 1720 h v korozní komoře + 96 dnech ponorové zkoušky v roztoku elektrolytu + oplachování mořicím roztokem.

Všechny vzorky byly ošetřeny mořicím roztokem a zbaveny tak korozních zplodin. Celkem byly tedy vzorky podrobeny 3 cyklům ponorové zkoušky po celkovou dobu 96 dní, cca 2300 h. Přehledně jsou výsledky zpracovány v Tab. 4-3.

Tab. 4-3: Hmotnostní úbytky svěrek po zatěžování korozním prostředím

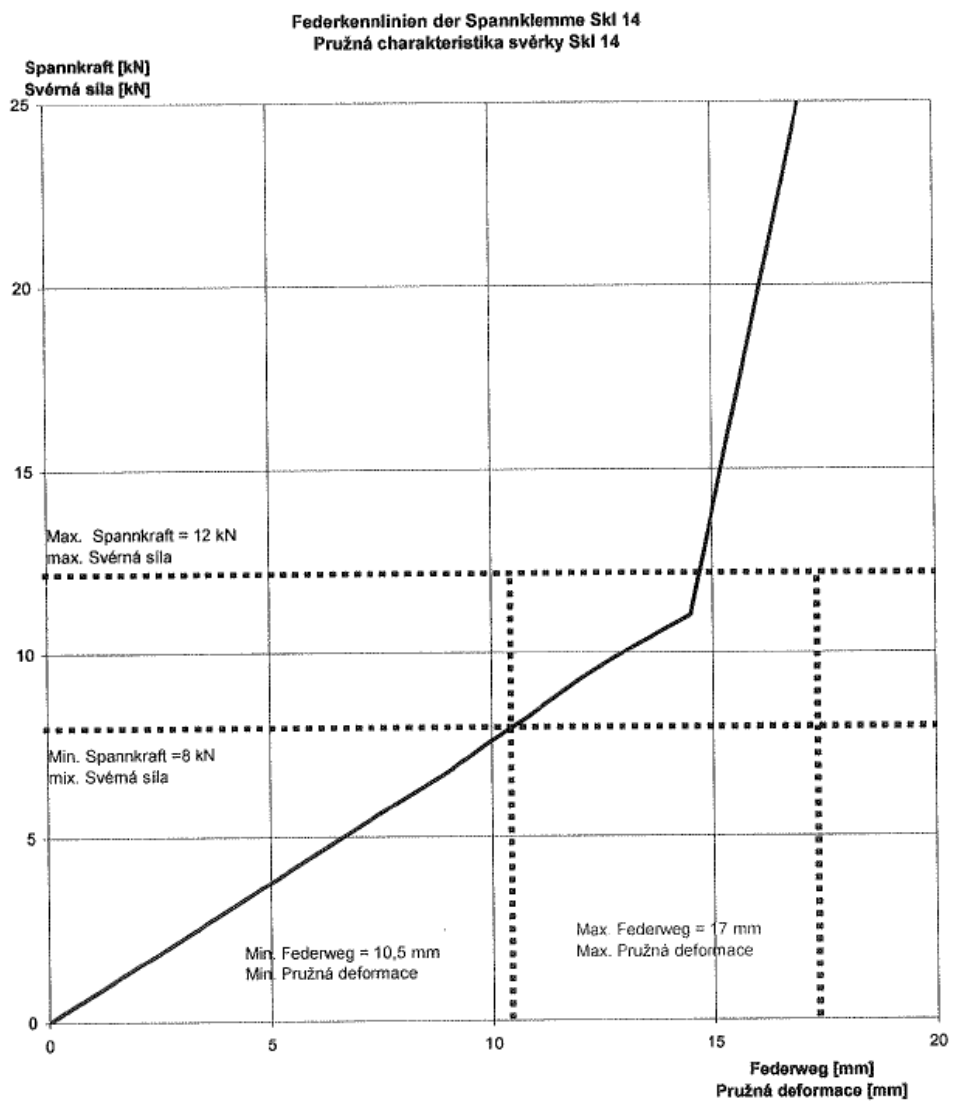
	Hmotnost [g]		
	Nové	Po korozním zatěžování	% úbytek
Svěrka bez ant. úpravy	498,95	459,2	8,66
Svěrky s KTL	498,59	494,71	0,78

Průměrná hmotnost nové svěrky bez antikorozní povrchové úpravy činí 498,95 g, s povrchovou vrstvou KTL pak činí 498,59 g. Hmotnost svěrek po korozním zatěžování byla u svěrek bez antikorozní povrchové úpravy 459,20 g a s povrchovou vrstvou KTL 494,71 g. Vyjádří-li se hmotností úbytek procentuálně, u svěrek s antikorozní povrchovou úpravou KTL činí tento úbytek 0,78 %, zatímco u svěrek bez antikorozní povrchové úpravy činí 8,66 %, tedy cca 11x více.

Korozní úbytek materiálu svěrek výrazně omezuje celkovou životnost svěrky. Přestože postup dle [10] doplněný o ponornou zkoušku v roztoku elektrolytu dostatečně nereflektuje skutečné provozní podmínky, prokazuje výrazně vyšší korozní odolnost svěrek s povrchovou úpravou KTL.

4.5 Svěrná síla svěrky Skl14

Konstrukce/geometrie svěrky je navržena tak, aby pružně působila proti stlačení danému utahovacím momentem. Dle [3] činí nominální svěrná síla 10 kN při zdvihu svěrky 13 mm. Při maximálním zdvihu (při vyklopení kolejnice, při zdvihu kolejového roštu, atp.) dochází ke kontaktu nosu svěrky a paty kolejnice. Při dotlačení nosu svěrky k patě kolejnice se mění tuhost svěrky a svěrná síla následně vzrůstá rychleji, viz Obr. 4-36. Při běžném provozním zatížení ke kontaktu nosu a paty kolejnice nedochází. Dle [4] nesmí být velikost přitlačné síly menší než 8 kN. Pro vyhodnocení účinků opakovaného zatížení se provede měření v souladu s [6]. Změří se odpor proti podélnému posunutí kolejnice, svislá statická tuhost a svěrná síla, a to před a po opakovaném zatížení a změna vlastností nesmí překročit v normě uvedené hodnoty (max. 20 %, 25 % a 20 %). Z pohledu svěrné síly odpovídá požadovaná hodnota 20 % údajům z [3] a [4] – 10 kN, případně 20% pokles znamená snížení svěrné síly na 8 kN, což je min. požadovaná hodnota svěrné síly dle [4]. Není tedy prostor pro případné další snížení svěrné síly způsobené např. úbytkem materiálu pružných svěrek vlivem koroze.



Obr. 4-36: Pružná charakteristika svěrek Skl 14 dle [3]

4.5.1 Měření přípravkem Vossloh

Měřicí přípravek Vossloh je konstrukce umožňující měření svěrné síly. Uspořádání zkušební sestavy je patrné z Obr. 4-37 až Obr. 4-40.



Obr. 4-37: Uspořádání sestavy pro zkoušení svěrné síly



Obr. 4-38: Uspořádání sestavy pro zkoušení svěrné síly
- detail



Obr. 4-39: Uspořádání sestavy pro zkoušení svěrné síly
- pohled z boku



Obr. 4-40: Uspořádání sestavy pro zkoušení svěrné síly
- pohled shora

Měření bylo prováděno na standardní sestavě, tedy pražci B91S, kolejnici 60E1 a upevnění W14.

Postup měření je následující. Na vnější ramena svěrky je osazena čelist, která zajišťuje vytahování těchto ramen směrem vzhůru. Svěrka je utazena předepsaným momentem, pro účely měření bylo aplikováno 200 Nm. Následně se na pražec položí rám, na který se připevní siloměr. Pomocí utahování šroubu se dosahuje zvedání vnějších ramen svěrky a v okamžiku, kdy je možné pod rameno svěrky vložit plochou měрку 0,1 mm, je odečtena hodnota na siloměru. Pro každé vnější rameno je odečtena a zaznamenána hodnota, tedy pro jednu svěrku jsou zaznamenány dvě hodnoty. Následně dojde k zprůměrování hodnot a vynásobení výsledného průměru koeficientem 0,88. Tento koeficient je stanoven výrobcem zkušebního zařízení, slouží k vyrovnání odlišné geometrie zkušebního zařízení (různému rameni páky).

Na základě výše uvedeného postupu byly identifikovány svěrné síly nových svěrek SKL 14 (viz Tab. 4-4).

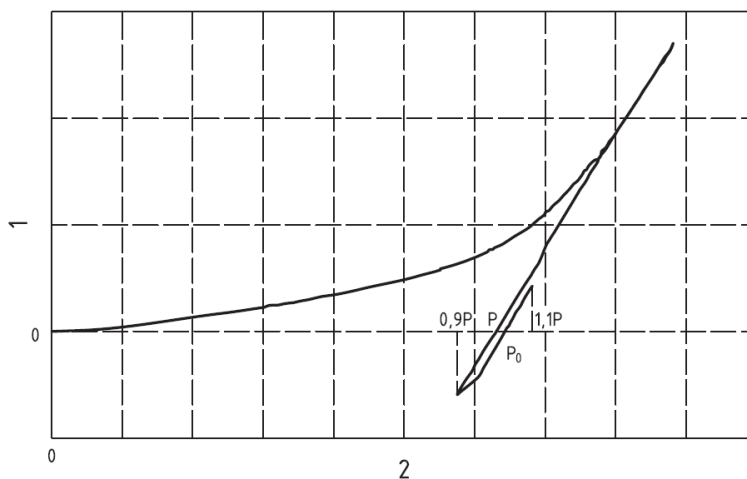
Tab. 4-4: Výsledné hodnoty: nové svěrky

Měření	P	L	$(P+L)/2*0,88$
	kN	kN	kN
1	11,25	11,5	10,01
2	11,5	11,5	10,12
3	12	12,75	10,89
4	11	11	9,68
5	12	12	10,56
6	11,5	12	10,34
7	11,5	12	10,34
8	11,25	12	10,23
9	11,5	11,5	10,12
10	11,5	12	10,34
Max	12	12,75	10,89
Min	11	11	9,68
Kvantil 10 %	11,225	11,45	9,977

Pouze svěrka označena jako měření 4 (9,68 kN) nesplňuje požadavky [3] – cca 10 kN na jednu svěrku, 20 kN pro uzel upevnění. Požadavky [4], min. 8 kN, byly splněny u všech svěrek.

4.5.2 Měření dle normy ČSN EN 13146-7

Postup zkoušky je následující. Na pražec se umístí kolejnice délky 0,5 m, osadí se upevněním shodným s upevněním v koleji. Pražec se fixuje k základu pomocí vhodného prostředku tak, aby se zamezilo jeho pohybu. Kolejnice se obepne vhodným přípravkem tak, aby mohla být vnášena síla na kolejnici kolmo k úložné ploše. Do každého ze čtyř rohů se umístí snímač posunutí. Realizace zkoušky pak dle [35] probíhá: „Na kolejnici se vyvozuje rostoucí tahové zatížení P až do okamžiku, kdy lze pohnout s podložkou, přičemž musí být zajištěno, aby spodní plocha paty kolejnice byla držena rovnoběžně s úložnou plochou pražce bez vyklápění. Podložka se odstraní a zatížení se snižuje až do okamžiku, kdy průměrná hodnota na snímačích posunutí je nulová. Zaznamenaná se zatížení P a poté se zatížení sníží přibližně na 0,9 P. Při stálém zaznamenávání d (průměrná hodnota ze čtyř snímačů) se zvyšuje zatížení P s nárůstem nepřesahujícím 10 kN/min, dokud se nedosáhne zatížení 1,1 P. Z diagramu zatížení – posunutí (viz Obr. 4-41) se odečte hodnota P0 při d = 0, která se považuje za svěrnou sílu. Postup se opakuje třikrát a vypočítá se průměrná svěrná síla.“

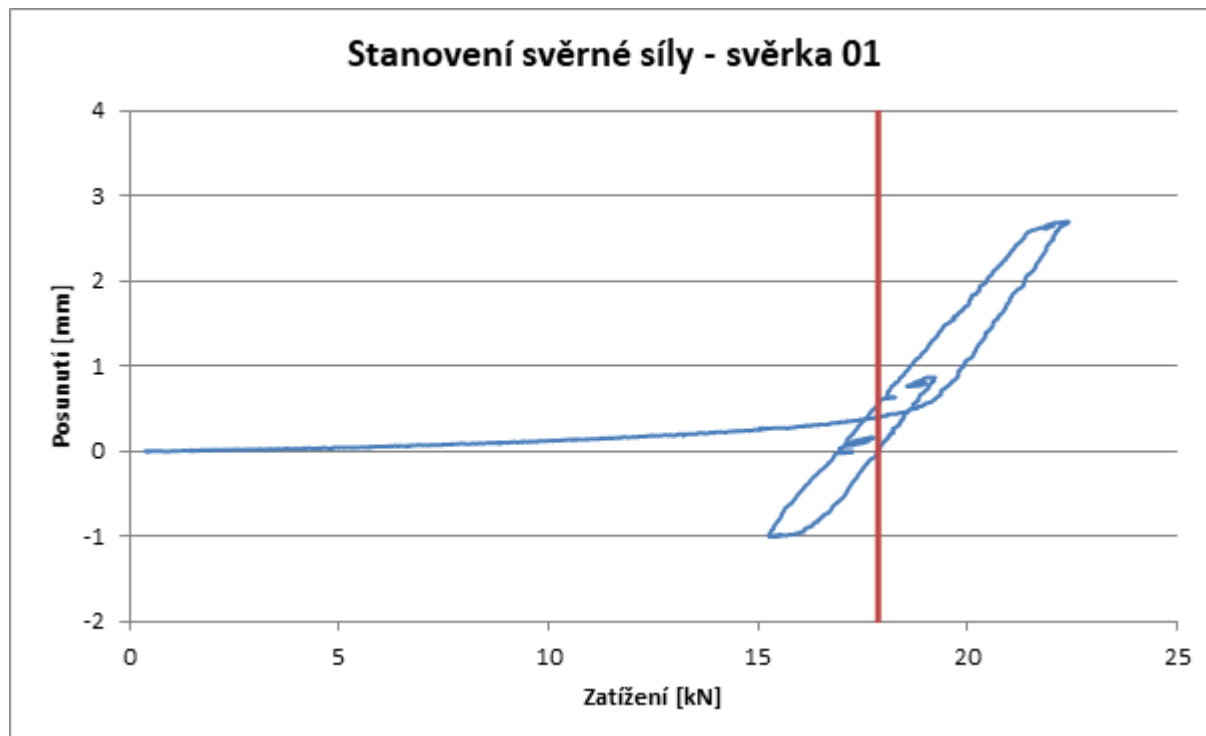


Legenda

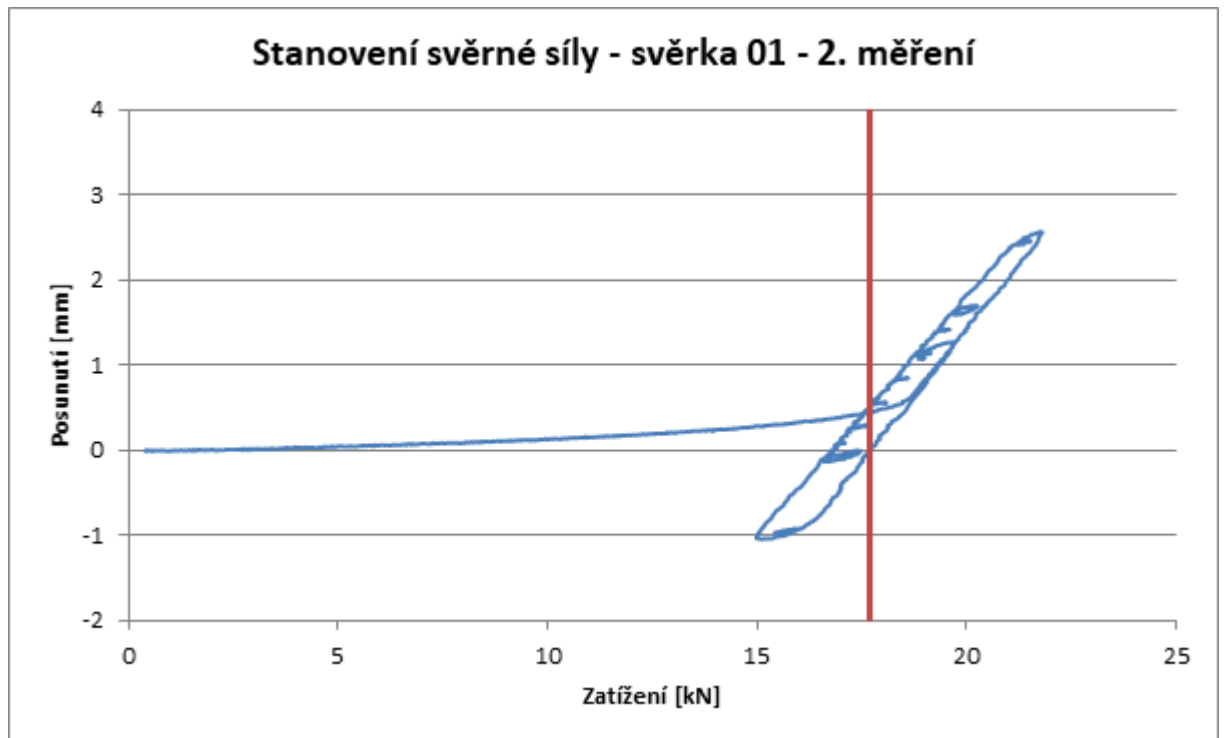
- 1 posunutí d , v mm
- 2 zatížení P , v kN

Obr. 4-41: Diagram zatížení – posunutí [35]

Měřeny byly 2 nové svěrky. Svěrky byly utaženy utahovacím momentem 200 Nm. Při prvním měření nových svěrek byla zjištěna hodnota svěrné síly 17,87 kN – viz Obr. 4-42, při druhém měření 17,69 kN - Obr. 4-43, výsledná hodnota daná průměrem těchto hodnot pak činí 17,78 kN, což nesplňuje požadavky [3] – 10 kN na jednu svěrku, 20 kN pro uzel upevnění. Požadavky [4] – min. 8 kN – splněny byly.



Obr. 4-42: Stanovení svěrné síly dle [35] – nové – 1. měření



Obr. 4-43: Stanovení svěrné síly dle [35] – nové – 2. měření

Oproti normě byla dvojice svěrek zkoušena 2x. S ohledem na velmi podobné výsledky při prvním měření nebylo měření opakováno častěji.

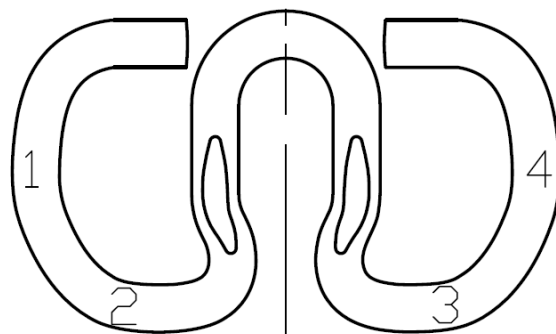
Přípravkem od Vosslohu pak byly zjištěny hodnoty svěrných sil 10,01 kN a 10,56 kN. Rozdíl mezi výsledky zjištěnými přípravkem a výsledky normové zkoušky (pro 2 svěrky) činí 2,79 kN, což je cca 16 %.

Výsledné hodnoty získané měření přípravkem Vosslohu vykazují vyšší hodnoty než hodnoty zjištěné normovaným postupem. Rozdíl je možné vysvětlit odlišným přístupem při měření, tedy měření celého uzlu v porovnání s měřením pouze jedné svěrky. Dále je třeba vzít v úvahu, že měření přípravkem Vosslohu nevykazuje tak přesné hodnoty měření, výsledky byly odečítány po 0,25 kN. Z Porovnání hodnot zjištěných pro novou svěrku přípravkem Vosslohu a zjištěných normovaným postupem je patrné, že hodnoty zjištěné přípravkem Vosslohu odpovídají požadavkům [3] – 10 kN na jednu svěrku. Hodnoty zjištěné normovaným postupem by tuto hodnotu nespĺňovaly, požadavky dle [4] – 8 kN - by však splněny byly. Pro účely práce je výhodnější měření pouze jedné svěrky, ne celého uzlu upevnění, proto bude dále v práci využíváno měření přípravkem Vosslohu.

4.5.3 Závislost svěrné síly na průměru tloušťky drátu svěrek a hmotnosti pružných svěrek

U svěrek byly změřeny průměry drátu, které byly ovlivněny korozním poškozením pružných svěrek a hmotnosti těchto svěrek. Zvoleny byly středy vnějších ramen svěrek a střední části svěrek – viz Obr. 4-44. Před měřením byly ze svěrek odstraněny volné korozní zplodiny pomocí

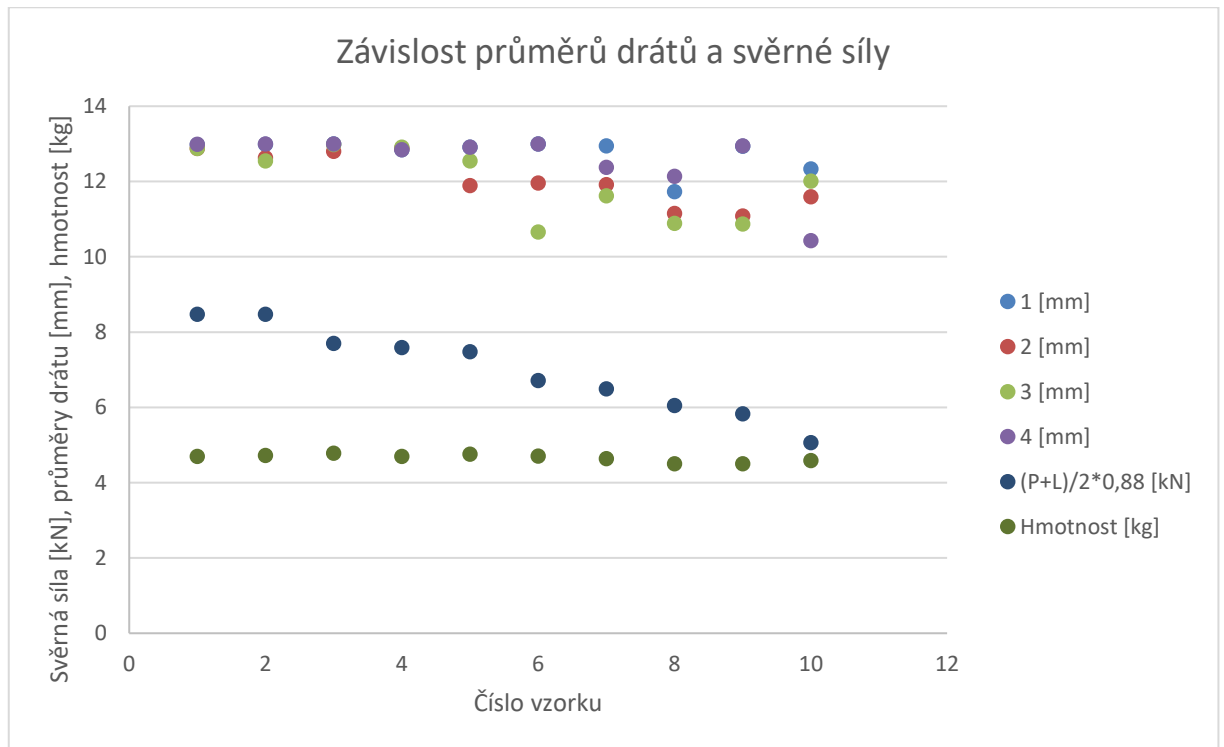
ocelového kartáče. Měření bylo realizováno digitálním posuvným měřítkem Mitutoyo CD-30PPX a váhou s přesností ± 1 g. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 4-5 a Obr. 4-45.



Obr. 4-44: Označení míst pro měření průměru drátu pružných svěrek

Tab. 4-5: Závislost svěrné síly na průměru drátu a hmotnosti (nevyhovující označeny červeně)

	1	2	3	4	P	L	(P+L)/2*0,88	Hmotnost
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[g]
1	12,98	12,88	12,88	12,99	9,25	10	8,47	470
2	12,99	12,63	12,55	13	9,5	9,75	8,47	472
3	13	12,8	12,98	13	8,5	9	7,7	478
4	12,84	12,88	12,91	12,84	8	9,25	7,59	470
5	12,91	11,89	12,55	12,91	8	9	7,48	469
6	13	11,96	10,66	13	7,5	7,75	6,71	468
7	12,95	11,92	11,62	12,38	7,25	7,5	6,49	464
8	11,73	11,15	10,89	12,14	6,25	7,5	6,05	450
9	12,94	11,08	10,87	12,95	6	7,25	5,83	450
10	12,33	11,59	12,01	10,43	5,75	5,75	5,06	459



Obr. 4-45: Grafické znázornění závislosti svěrné síly na průměru drátu svěrek

Dle [4] je požadovaná hodnota svěrné síly min. 8 kN (měření normovaným postupem dle [35]). Vzhledem k odlišnosti postupů a způsobu měření byla uvažována tolerance $\pm 0,5$ kN. Ze změřených hodnot svěrných sil a odpovídajících měření průměrů drátu a hmotností svěrek lze odvodit, že pokud je průměr drátu v jakémkoli měřeném místě 1 až 4 menší než 12 mm a hmotnost svěrky je menší než 470 g, pak hodnota svěrné síly nesplňuje požadavky [4] se zohledněním uvažované tolerance. Průměr drátu u nové svěrky přitom činí 13 mm, hmotnost nové svěrky cca 492 g.

5 MKP analýza napětí pružné svěrky SKL14

Numerická analýza založená na metodě konečných prvků (MKP) je nezbytným teoretickým postupem umožňujícím stanovit odezvu na zatížení svěrky. Cílem analýzy je stanovení hodnot redukovaných napětí (von Mises) v kritických místech svěrky.

5.1.1 Model MKP – geometrie

Pro vytvoření modelu MKP a výpočty byl použit software SolidWorks 2014.

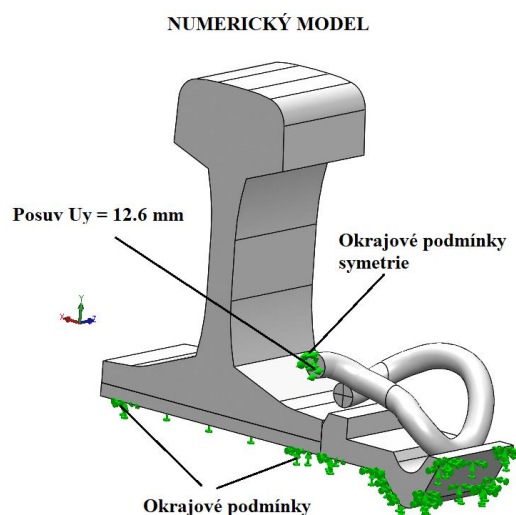
Pro model byly použity standardní součásti systému upevnění W14, které se používají na pražcích B91S a jsou schváleny pro používání na tratích v ČR [12]:

- Pružná svěrka Skl14 – byla použita ½ svěrky a aplikována referenční geometrie (0 mm).
- Úhlová vodicí vložka Wfp 14 K - byla použita ½ úhlové vodicí vložky a aplikována referenční geometrie (0 mm).
- Pružná podložka WU 7 – byla použita ½ pružné podložky a aplikována referenční geometrie (0 mm).
- Kolejnice 60E2.

Pražec nebyl v modelu použit, byl nahrazen fixní geometrií.

Nahrazení pražce a zjednodušení geometrie pomocí symetrií bylo použito z důvodu snížení výpočetního výkonu PC a nepodstatného vlivu na výsledky výpočtu.

Vrtule a podložka nebyly použity, zatížení svěrky (simulace utahení předepsaným momentem) bylo vneseno pomocí referenční geometrie – viz Obr. 5-1.

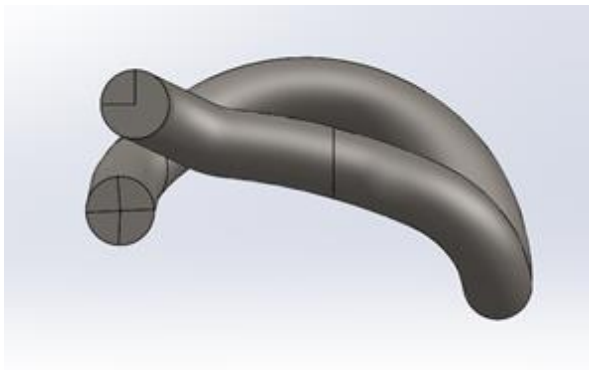


Obr. 5-1: Uspořádání sestavy systému upevnění v MKP modelu

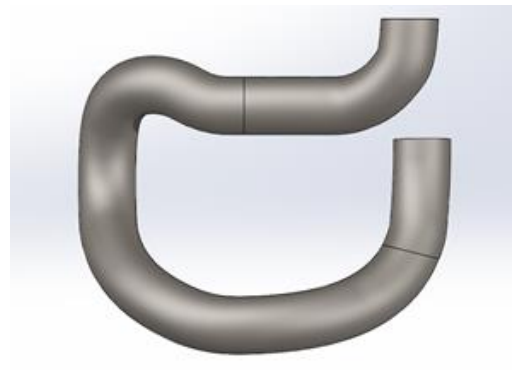
Model systému upevnění byl poskytnut Ing. Janem Vyčichlem, Ph.D. z ČVUT, Fakulty dopravní, Ústavu mechaniky a materiálů. Model byl použit pro [40] a [41]. Model byl zkontrolován dle výkresové dokumentace jednotlivých součástí upevnění a oproti zmiňovaným pracem byly aplikovány vstupy verifikované měřením v koleji.

5.1.2 Model pružné svěrky

Klíčovou součástí modelu je pružná svěrka. Pohledy na její model jsou zobrazeny na Obr. 5-2, Obr. 5-3 a Obr. 5-4. Při pohledu zdola jsou patrné plochy pro vytvoření kontaktu mezi svěrkou a kolejnicí, resp. svěrkou a úhlovou vodicí vložkou.



Obr. 5-2: Model pružné svěrky – pohled z boku



Obr. 5-3: Model pružné svěrky – pohled shora

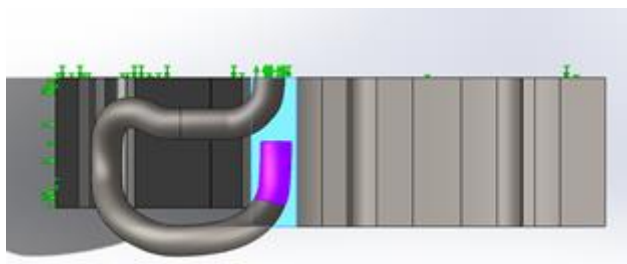


Obr. 5-4: Model pružné svěrky – pohled zdola

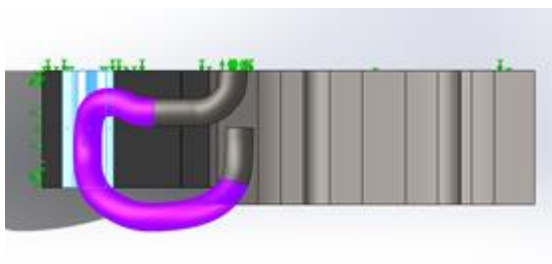
Materiálové charakteristiky jednotlivých částí byly voleny s ohledem na kapitolu 3.5.3.

5.1.3 Kontakty

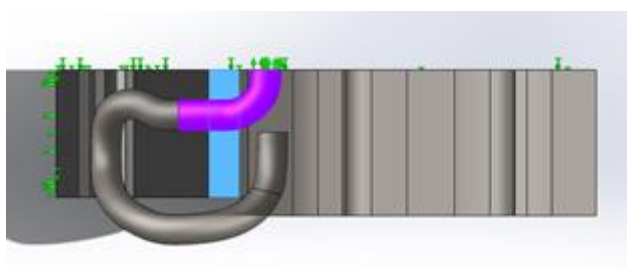
Přímo v MKP studii byly definovány kontakty mezi jednotlivými součástmi železničního svršku. Konkrétní kontakty s jejich vlastnostmi jsou uvedeny v Obr. 5-5 až Obr. 5-8.



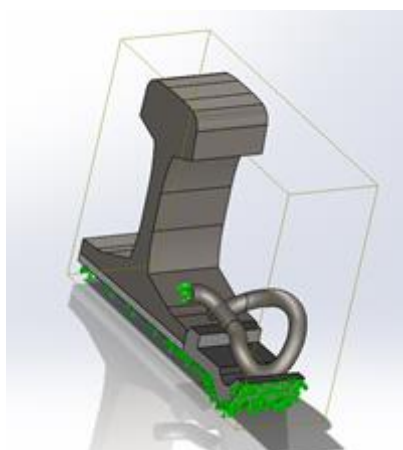
Obr. 5-5: Kontakt svěrka – kolejnice – třecí, součinitel tření 0,15



Obr. 5-6: Kontakt svěrka – úhlová vodicí vložka – třecí, součinitel tření 0,15



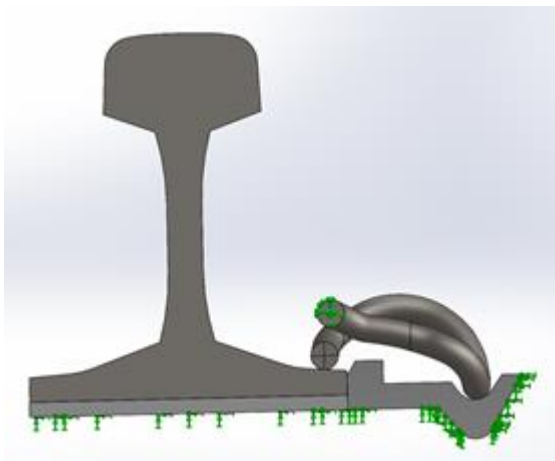
Obr. 5-7: Kontakt úhlová vodicí vložka – střední nos svěrky – žádný průnik



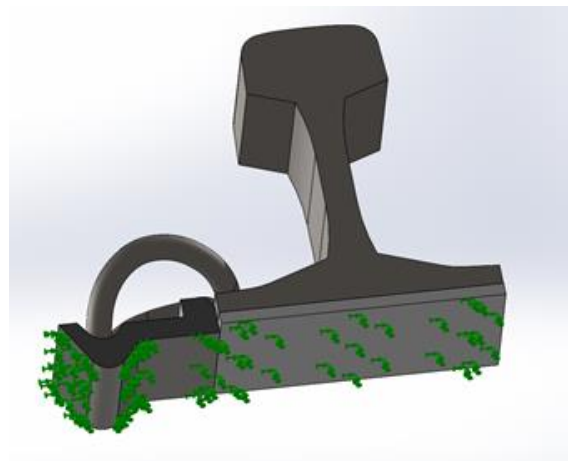
Obr. 5-8: Globální kontakt

5.1.4 Uchycení

Byla použita polovina pružné svěrky a druhá polovina byla nahrazena referenční geometrií 0 mm. Utažení svěrky bylo realizováno pomocí uchycení se svislým posunem – viz Obr. 5-9. Pražec byl nahrazen fixní geometrií – viz Obr. 5-10.



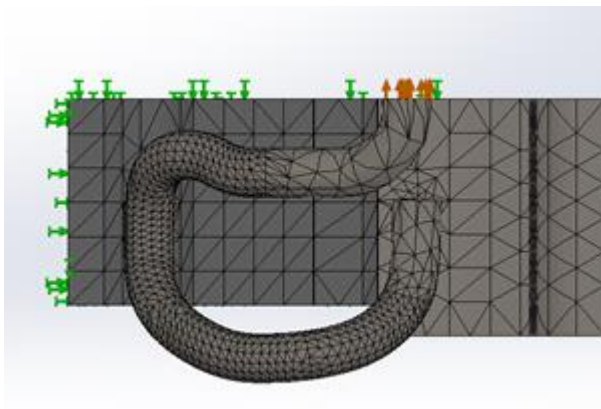
Obr. 5-9: Uchycení svěrky



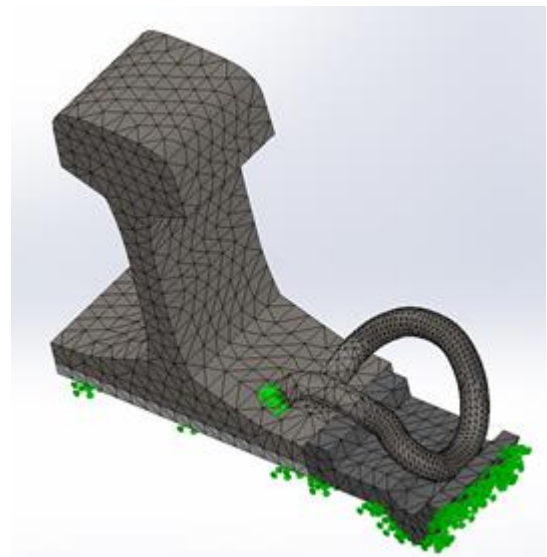
Obr. 5-10: Fixní geometrie – nahrazení pražce

5.1.5 Síť

Parametry sítě jsou patrné z Obr. 5-11 až Obr. 5-13. Síť na svěrci byla zjemněna, a to v místech očekávaných vyšších napětí. Parametry zjemnění – velikost elementu 1,5 mm, poměr 1,5 mm.



Obr. 5-11: Vytvořená síť – pohled shora



Obr. 5-12: Vytvořená síť - pohled

Název studie	Nelineární 1 (-Výchozí-)
Typ sítě	Objemová síť
Použité síťování	Standardní síť
Automatické zjemnění	Vypnuto
Včetně automatického cyklování	Vypnuto
Jakobiho body	4 body(ů)
Zjemnění sítě	Definované
Velikost elementu	9.12944 mm
Tolerance	0.45 mm
Kvalita sítě	Vysoká
Uzlů celkem	27659
Elementů celkem	17167
Maximální poměr stran	9.2314
Procenta elementů s poměrem stran < 3	97.5
Procenta elementů s poměrem stran > 10	0
% deformovaných elementů (Jakobi)	0
Pro selhané díly generovat nekompatibilní síť	Vypnuto
Doba dokončení sítě (hh:mm:ss)	00:00:04
Název počítače	

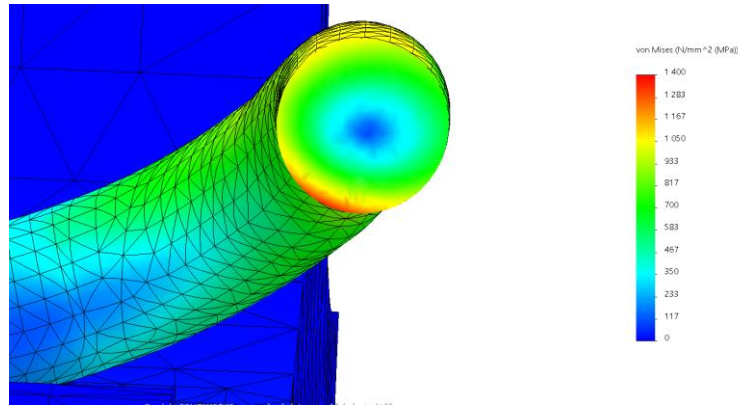
Obr. 5-13: Detail sítě

Pro výpočet byla použita nelineární analýza, řešičem byl Large Problem Direct Sparse.

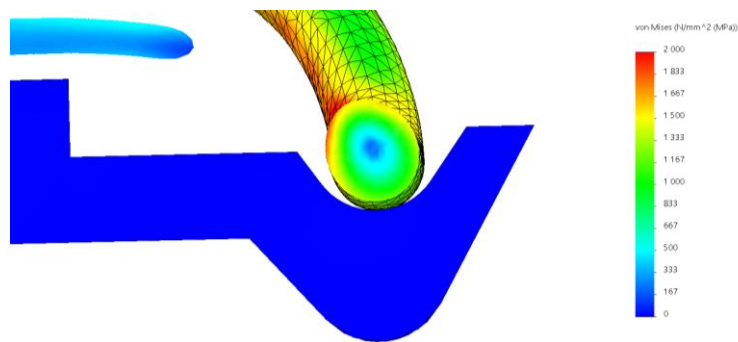
5.1.6 Stanovení statického předpětí svěrky Skl 14 (Von Mises) při utahování

Hodnota zdvihu svěrky je zásadní při identifikace vnitřního pnutí svěrky.

Teoretická hodnota statického předpětí svěrky je dána její geometrií, kdy při dotažení svěrky předepsaným momentem dojde ke stlačení/zdvihu svěrky o 13 mm. Zatížení svěrky (simulace utahování předepsaným momentem) bylo vneseno pomocí referenční geometrie – viz Obr. 5-1, a to hodnotami posunů 12,6 mm, 12,8 mm, 13 mm, 13,2 mm a 13,4 mm. Byly vytvořeny řezy v místech umístění tenzometrů dle Obr. 6-2, z důvodu zjištění změny napětí v průřezu svěrky – viz Obr. 5-14 a Obr. 5-15.

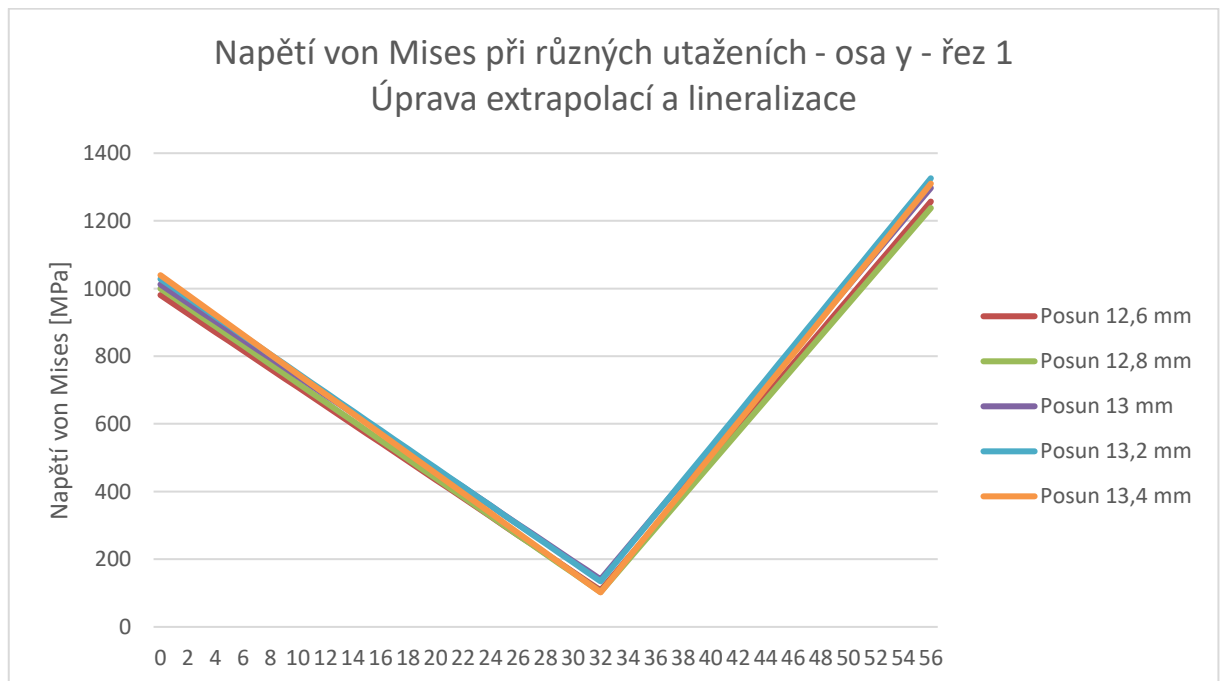


Obr. 5-14: Napětí von Mises v řezu v místě 1 (vnější rameno)

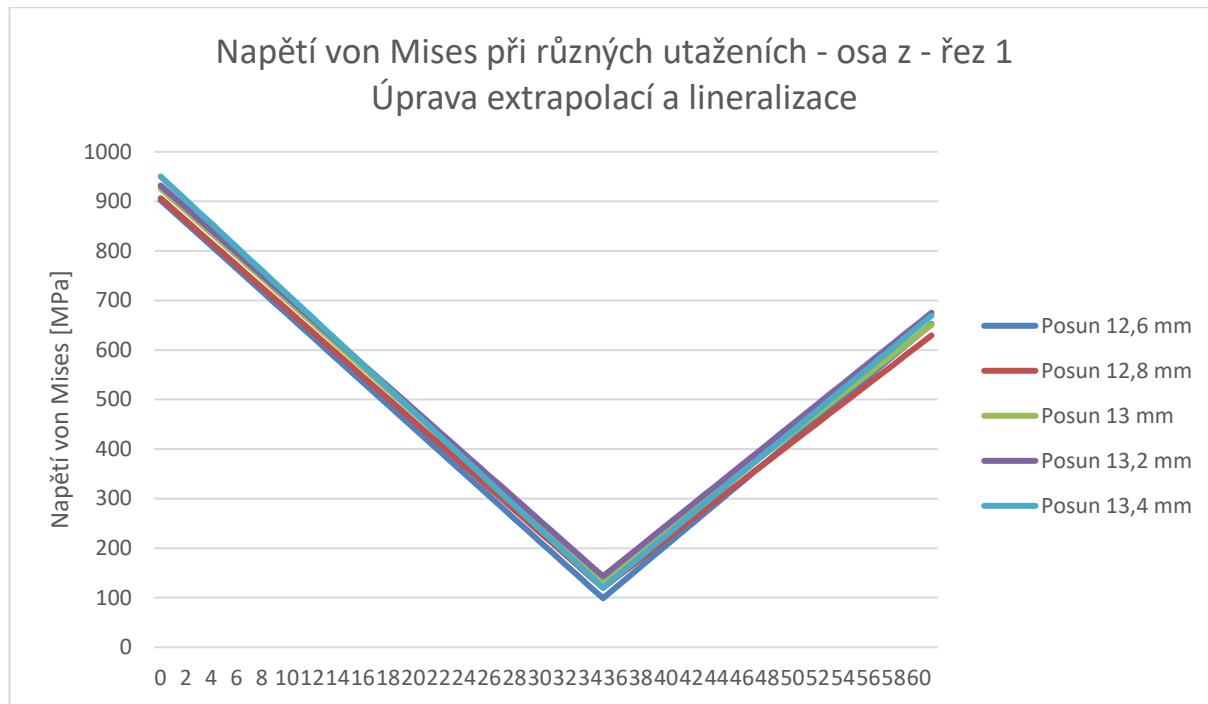


Obr. 5-15: Napětí von Mises v řezu v místě 2

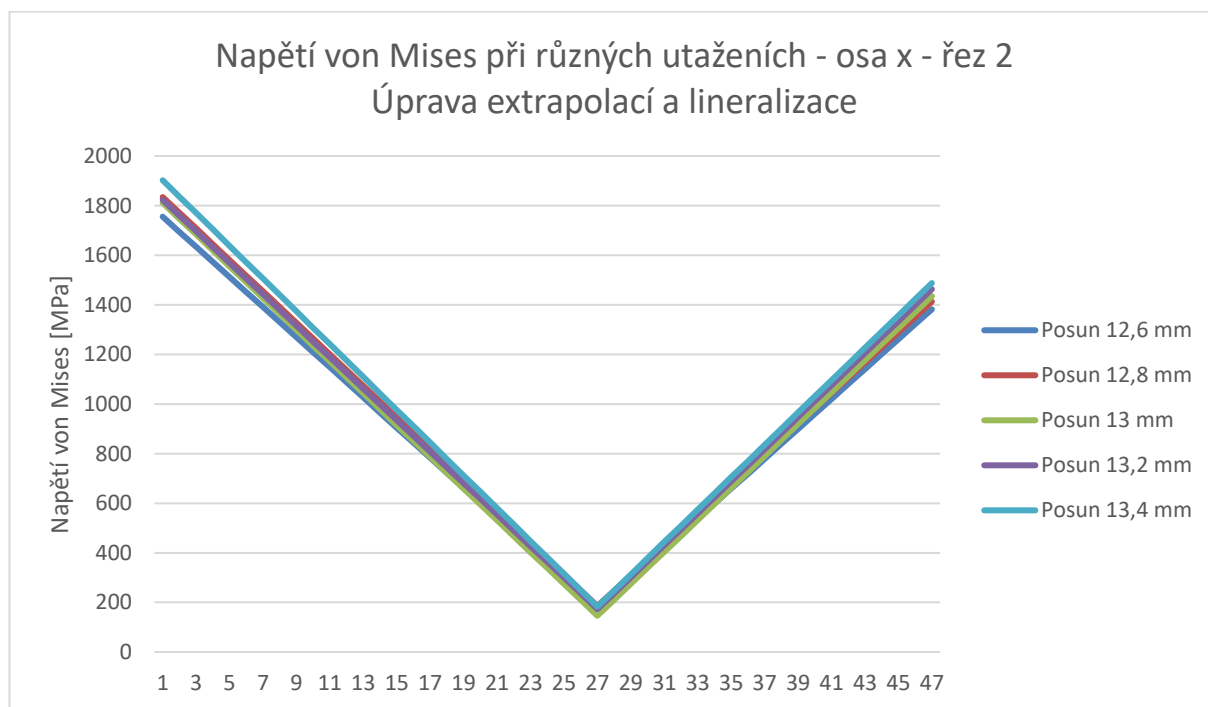
Výsledky jsou shrnuty v Obr. 5-16 až Obr. 5-20 a Tab. 5-1.



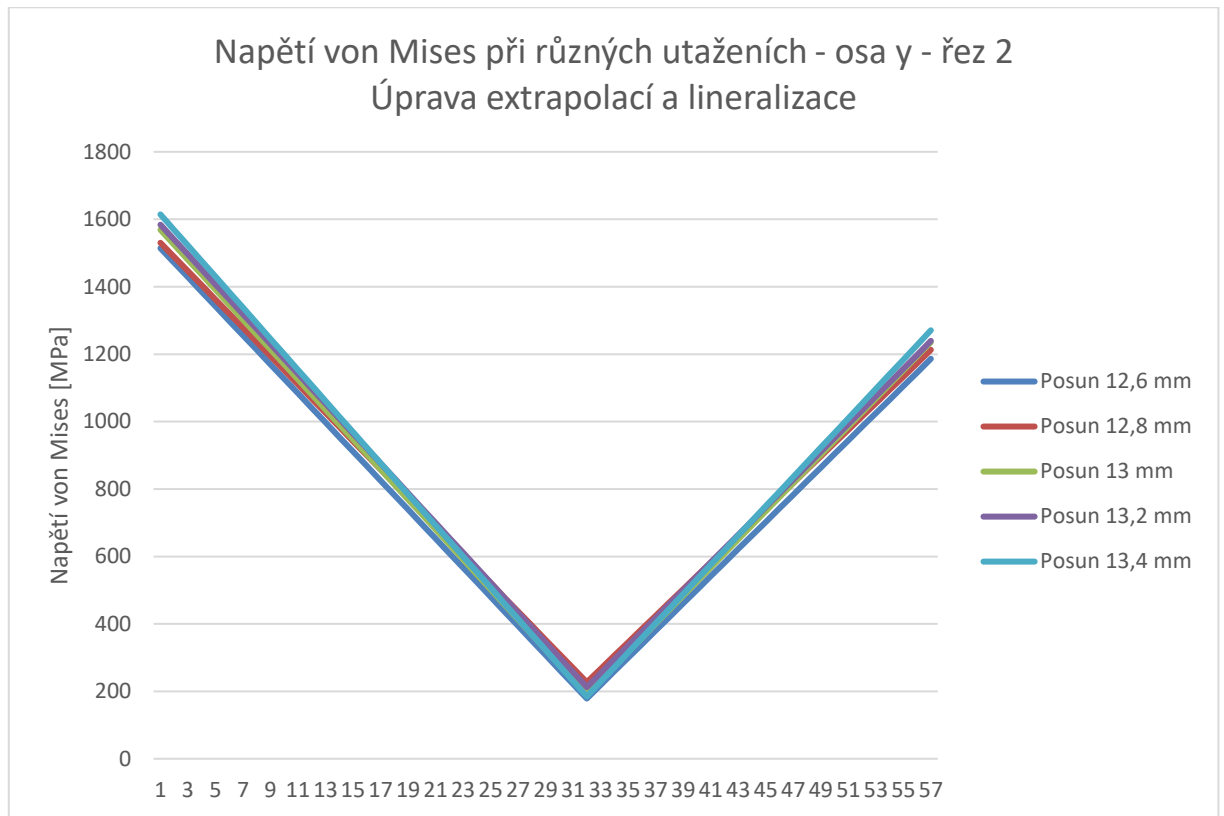
Obr. 5-16: Napětí von Mises při různých hodnotách utažení – osa y – řez v místě 1



Obr. 5-17: Napětí von Mises při různých hodnotách utažení – osa z – řez v místě 1



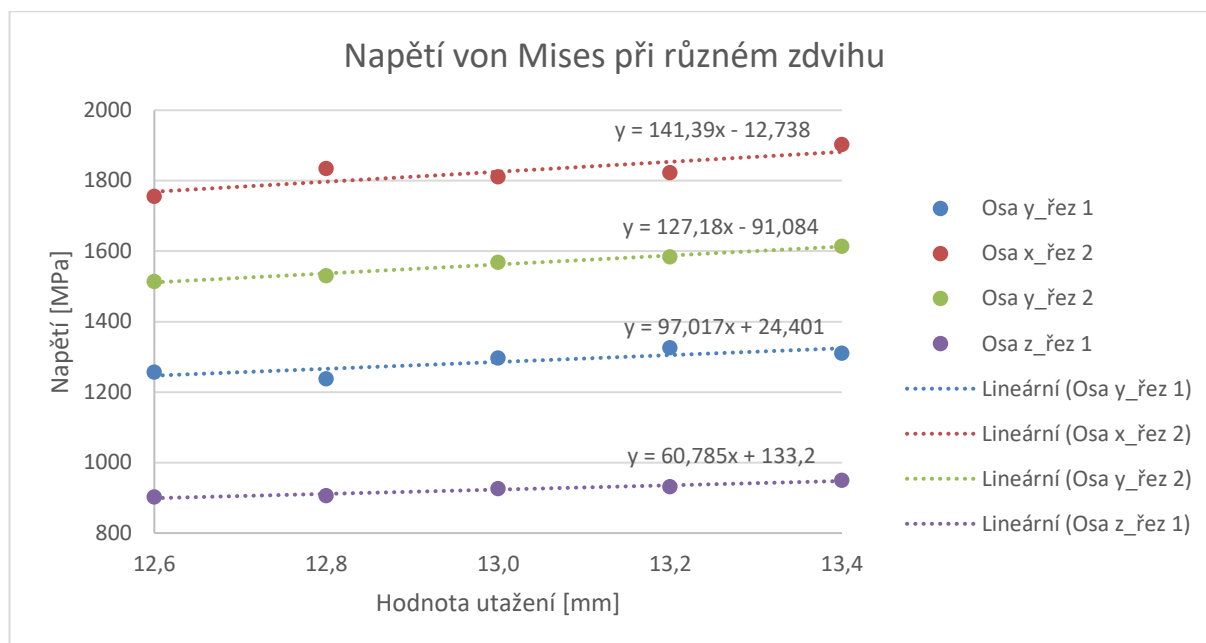
Obr. 5-18: Napětí von Mises při různých hodnotách utažení – osa x – řez v místě 2



Obr. 5-19: Napětí von Mises při různých hodnotách utažení – osa y – řez v místě 2

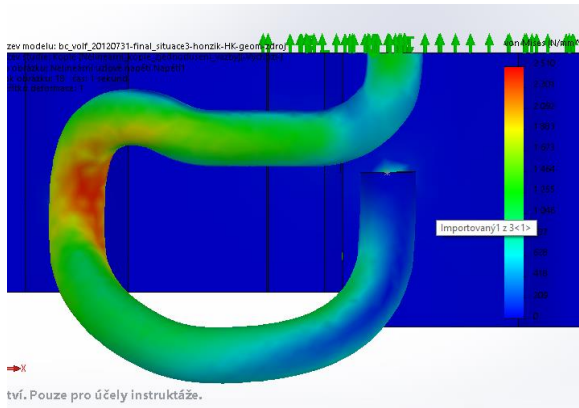
Tab. 5-1: Napětí von Mises při různých hodnotách utažení

	Řez	Napětí von Mises při zdvihu [MPa]				
		12,6 mm	12,8 mm	13 mm	13,2 mm	13,4 mm
Minima	Osa y_řez 1	108	103	140	135	102
	Osa z_řez 1	99	120	136	143	120
	Osa x_řez 2	176	186	146	173	183
	Osa y_řez 2	179	227	191	212	185
Maxima	Osa y_řez 1	1257	1238	1297	1326	1310
	Osa z_řez 1	902	906	926	932	950
	Osa x_řez 2	1755	1835	1811	1823	1902
	Osa y_řez 2	1514	1530	1569	1584	1614

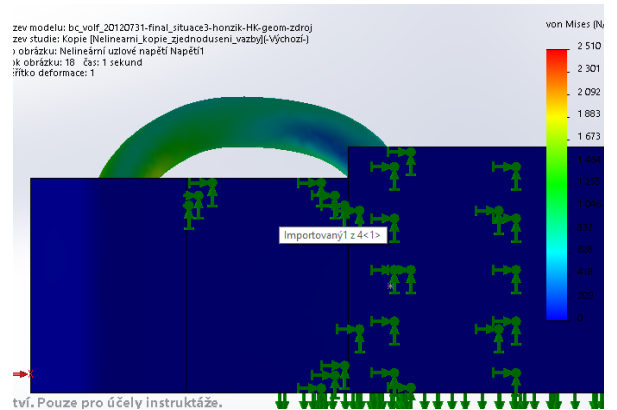


Obr. 5-20: Napětí von Mises při různých hodnotách utažení

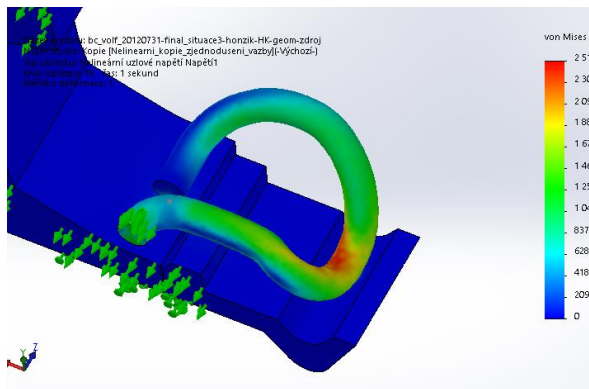
Vyšších hodnot je při utažení svěrky dosahováno v místě u úhlové vodící vložky. Ze zjištěných hodnot je zřejmé, že při utahování bylo dosahováno hodnot napětí von Mises až 1900 MPa, hodnoty napětí pozvolně klesají směrem ke středu svěrky, kde je dosahováno hodnot cca 100 až 200 MPa. K poškození svěrky nedojde při utažení předepsaným utahovacím momentem, i když je lokálně překročena mez pevnosti (dle [18] je to 1300 MPa až 1600 MPa, ověřeno tahovou zkouškou). Domnívám se, že vysoké napětí v povrchové vrstvě snižuje korozní či únavovou odolnost svěrky. Z grafického znázornění maximálních hodnot napětí von Mises, resp. proložení maximálních hodnot spojnicí trendu je zřejmé, že se stoupajícími hodnotami utažení stoupají i napětí von Mises na svěrkách. Grafické rozložení napětí von Mises na svěrce je patrné z Obr. 5-21 až Obr. 5-26.



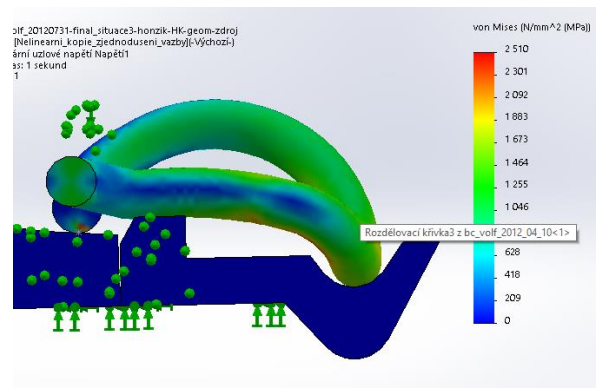
Obr. 5-21: Von Mises – pohled shora



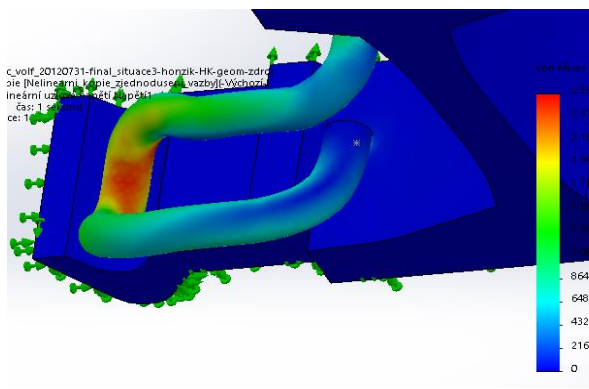
Obr. 5-22: Von Mises – pohled zdola



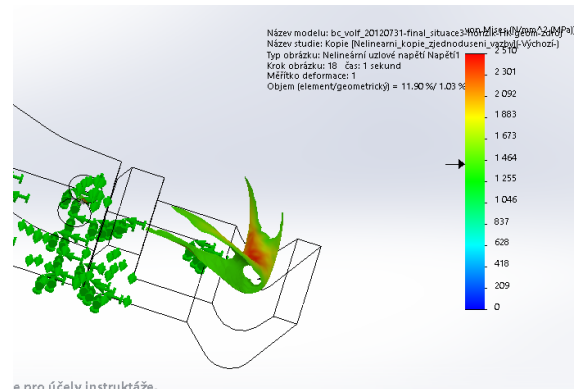
Obr. 5-23: Von Mises – pohled



Obr. 5-24: Von Mises – pohled zblouku



Obr. 5-25: Von Mises – pohled

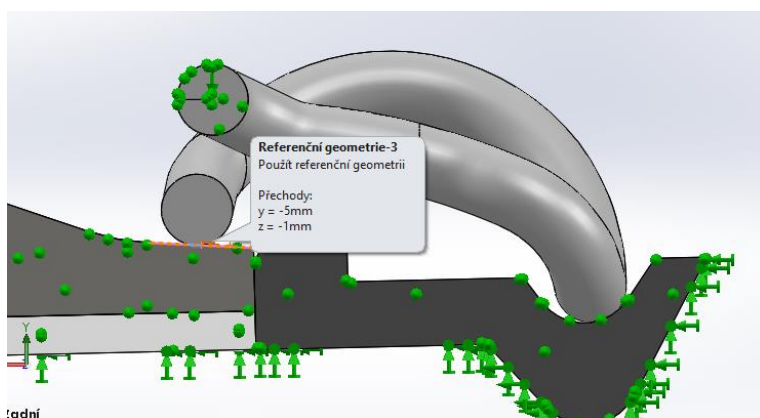


Obr. 5-26: Von Mises – rozložení napětí

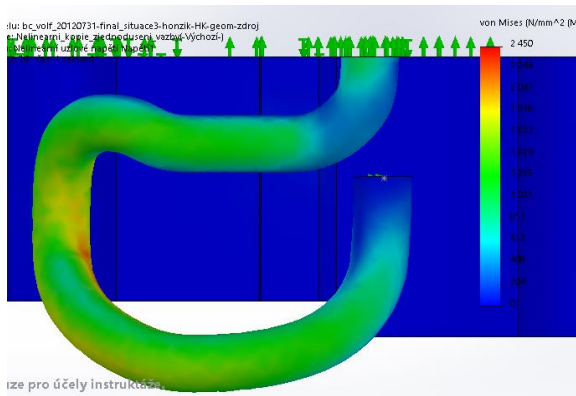
Hodnoty byly porovnávány v místech umístění tenzometrů a lze konstatovat, že odchylka byla cca 20 %.

5.1.7 Stanovení dynamického napětí od provozu u svěrky Skl14 (Von Mises)

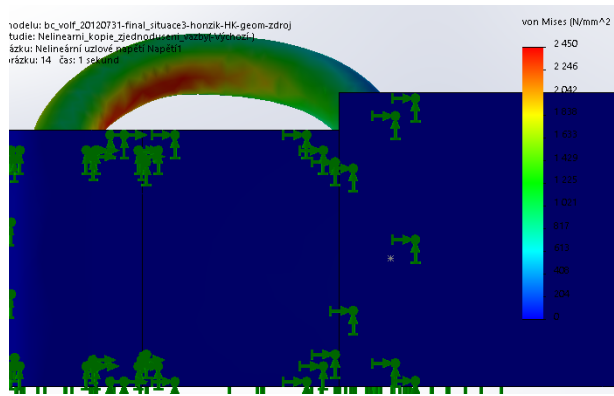
Na základě zjištění provedených v oblouku u žst. Kolín (poškození úhlových vodicích vložek) lze jako maximální příčné posuny ramen svěrek v kontaktu s kolejnicí uvažovat 5 mm a svislé posuny 1 mm – viz Obr. 5-27. Chování modelu, resp. místa největších napětí, se při daných zatížení zdvihem shodují s místy, kde v praxi dochází k poškození pružných svěrek, tedy cca v polovině vnějšího ramene pružné svěrky – viz Obr. 5-28 až Obr. 5-31. Z aplikování příčných posunů různých zatížení lze říci, že čím větší je velikost příčného zatížení, tím více se posouvá hodnota maximálního napětí směrem od úhlové vodicí vložky ke středu vnějšího ramene pružné svěrky.



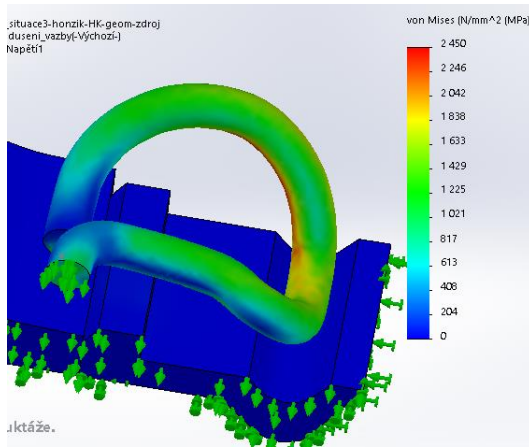
Obr. 5-27: Aplikovaná zatížení přidaná k utažení svěrky



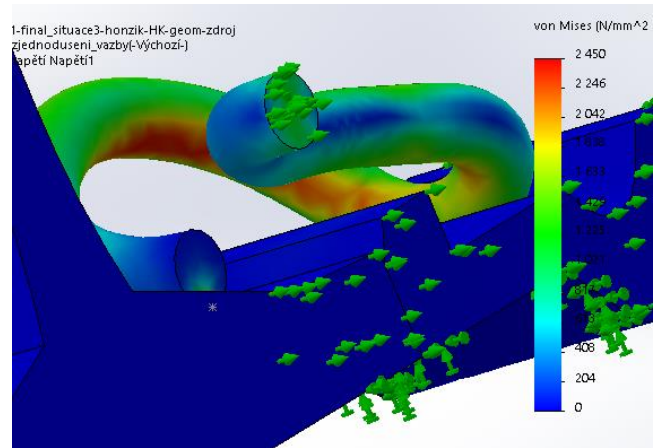
Obr. 5-28: Von Mises – pohled shora



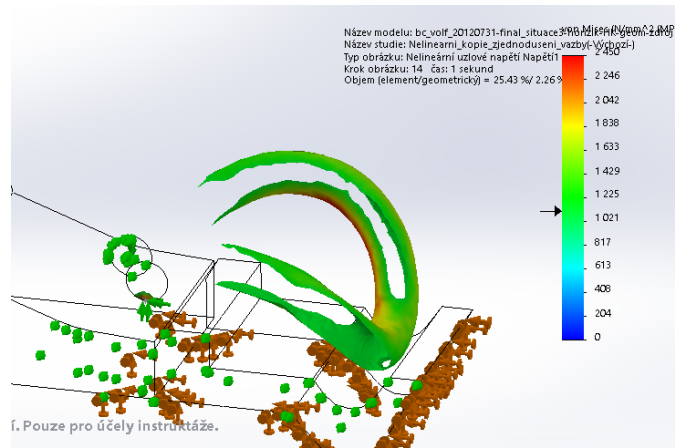
Obr. 5-29: Von Mises – pohled zdola



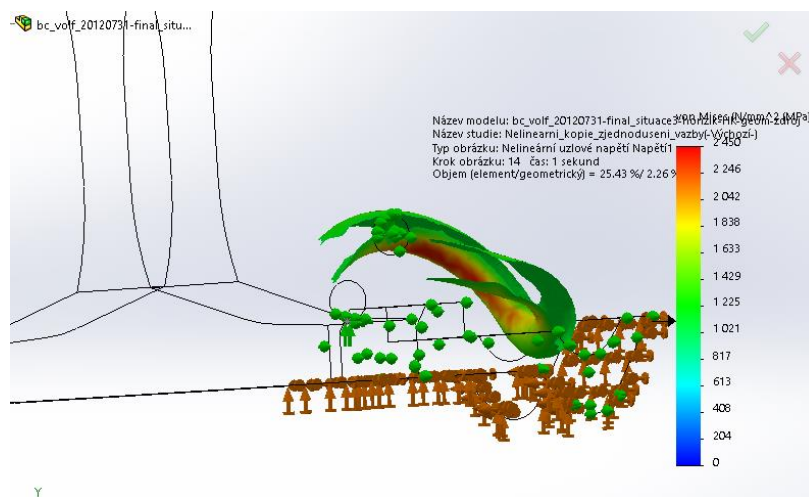
Obr. 5-30: Von Mises – pohled



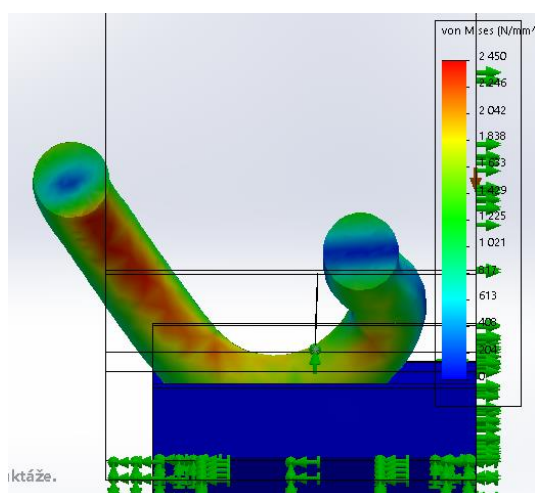
Obr. 5-31: Von Mises – pohled



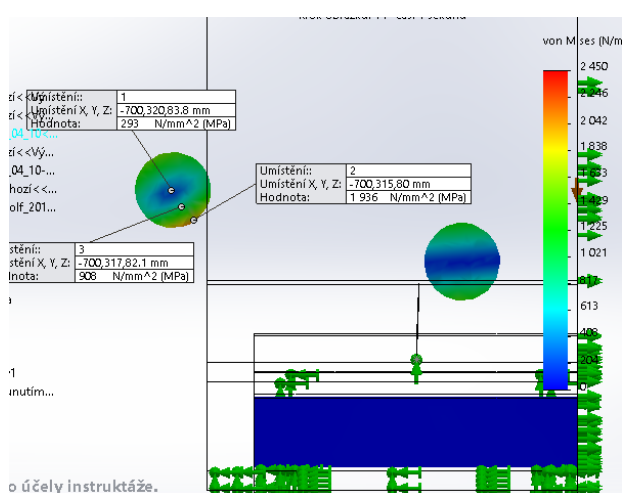
Obr. 5-32: Von Mises – rozložení napětí



Obr. 5-33: Von Mises – rozložení napětí



Obr. 5-34: Příčný řez svěrkou



Obr. 5-35: Příčný řez svěrkou

Z výsledků kombinovaného příčného a svislého zatížení svěrky je patrné, že vysokých hodnot napětí je dosahováno na povrchu svěrky – viz Obr. 5-32 a Obr. 5-35, směrem ke středu svěrky hodnoty pozvolně klesají.

6 Metodika hodnocení stavu pružných svěrek SKL14 v provozovaných tratích

Ačkoli užití výrobků v provozovaných tratích SŽ podléhá předchozí certifikaci, jejíž součástí je požadavek splnění Obecných technických podmínek (OTP) a technických podmínek dodacích (TPD) a následné provozní ověření, nelze se v případě svěrek SKL14 vyhnout poruchám vznikajícím za provozu ve ztížených situacích (oblouky malých poloměrů, železniční přejezdy, tratě v tunelech). Identifikace míry poškození a následné zhodnocení dalšího užití svěrek SKL 14 je řešeno v návrhu Metodiky hodnocení stavu pružných svěrek SKL14 v provozovaných tratích.

6.1 Návrh metodiky

Metodika hodnocení stavu pružných svěrek SKL14 v provozovaných tratích je zaměřena na stěžejní problematiku poruch. Vzhledem k faktu, že poruchy jsou vyvolány různými faktory (geometrie, struktura, statické předpětí, dynamické zatížení, koroze), je metodika členěna dle těchto faktorů:

- 1) Hodnocení odezvy na statické předpětí
 - Hodnocení zdvihu.
 - Hodnocení napětí.
 - Hodnocení svěrné síly.
- 2) Hodnocení lomu svěrky
 - Fraktografické analýza.
- 3) Hodnocení koroze
 - Hodnocení procentuálního úbytku hmotnosti.
 - Hodnocení zbývajícího průměru drátu.
- 4) Hodnocení odezvy na dynamické zatížení
 - Identifikace povrchového napětí na svěrci od provozu.
 - Identifikace svislých kolových a příčných vodících sil.
 - Identifikace svislých a příčných posunů.
 - Hodnocení únavového poškození.
- 5) Hodnocení zrychlení
 - Hodnocení efektivní hodnoty zrychlení (RMS).
 - Hodnocení skluzových vln.

Vzhledem k navrženým kritériím (geometrické, materiálové), je třeba tato kritéria chápat komplexně, nikoli samostatně např. korozní úbytek má vliv na tuhost svěrky (snížení předpínací síly, snížení únavové pevnosti, apod.).

Volba způsobu hodnocení by vždy měla odpovídat příznakům provázejících vady upevnění. Příznaky lze charakterizovat jako zřejmé defekty, jako jsou lomy ramen svěrek, nadměrný korozní úbytek, vada GPK, skluzové vlny, otlak svěrky v kolejnici či úhlové vložce, atp.

Hodnocení je pak realizováno v různých sledech (např.):

Zjištěna **vada lomu ramene** svěrky (svěrky s nízkou mírou napadení korozí):

- Provedení fraktografické analýzy (1. krok)
Na jejím základě bude stanoven druh lomové plochy, pokud se bude jednat o únavový lom (což je pravděpodobné), je třeba realizovat další postup ve směru identifikace únavového poškození. Pokud se bude jednat o houževnatý lom, bude třeba postup orientovat na měření statických veličin (např. měření zdvihu svěrky), případně analyzovat vysoká zatížení při provozu.
- Provedení měření statického předpětí (2. krok)
Měření je samo o sobě hodnotícím kritériem, v případě zjištění houževnatého lomu, nebo slouží jako podklad pro hodnocení únavy. Pro stanovení hodnoty charakteristického napětí svěrky je třeba využít modelu MKP.
- Provedení měření svislých a příčných posunů paty kolejnice (3. krok)
Měření je opět samo o sobě hodnotícím kritériem, lze provést hodnocení limitních posunů ve svislém i příčném směru a indikovat tak zvýšená zatížení svěrky vedoucí k únavovému poškození, nadlimitní posuny mohou rovněž indikovat, že je nedostatečná svěrná síla.
- Provedení měření napětí na svěrci od provozu (4. krok)
Jedná se o stěžejní informaci vedoucí k dynamické odezvě svěrky na provozní zatížení. Po transformaci na charakteristickou hodnotu a sečtení s hodnotou statického předpětí lze výsledný záznam použít pro stanovení únavového poškození od jednotlivých průjezdů vlakových souprav. Měření je možno doplnit o identifikaci svislé kolové a příčné vodící síly jako doplňující informace k odezvě na zatížení.
- Realizace hodnocení na únavu (5. krok)
V kontextu se stanovenou únavovou křivkou je možné a žádoucí stanovit na základě vyhodnoceného celkového charakteristického napětí poškozující únavový účinek průjezdu jednotlivých vlakových souprav. Na základě kumulativního dynamického poškození svěrky, předpokládaného budoucího zatížení a charakteristiky historie zatížení rozhodnout, zda svěrky v daném úseku vyměnit či zachovat (případně na jak dlouho zachovat).

Zjištěna **vada GPK** koleje (svěrky s vyšší mírou napadení korozí):

- Provedení identifikace míry napadení korozí (1. krok)
Zhodnocení užitých svěrek, jejich stav, stanovit druh antikorozi ochrany, posoudit vliv prostředí. Provést hodnocení napadení korozí (procentuální úbytek, zbývající průměr drátu).
- Provedení měření svislých a příčných posunů paty kolejnice (2. krok)
Měření bude indikovat nadměrné posuny, které mohou být vyvolány nízkou svěrnou silou svěrek napadených korozí. Měření je hodnotícím kritériem.
- Provedení měření svěrné síly (3. krok)

Realizovat statická měření síly svěrek vyjmutých z trati v kontextu s úbytkem materiálu vyvolaného korozním napadením svěrek. Vyhodnotit, jaká je svěrná síla svěrek napadených korozí. Posoudit, jak dlouho byla svěrka umístěna v provozu (tzn. jak rychle koroze postupovala), jak účinná byla antikorozní úprava svěrek a rozhodnout, zda uvedené svěrky dále provozovat či je nahradit jiným typem.

6.1.1 Hodnocení odezvy na statické předpětí

Svěrka SKL je pružnou svěrkou, její základní funkcí je působení na kolejnici stálou přítlačnou silou. Tato síla vzniká dotažením svěrky předepsaným utahovacím momentem, čímž dochází k jejím stlačení/zdvihu. Stlačení svěrky zároveň vyvolá ve svěrce vnitřní pnutí. Vzhledem k faktu, že mezi stlačení svěrky, vnitřním pnutím a svěrnou silou je přímá závislost, lze hodnotit svěrky dle těchto veličin odděleně a následně zbývající hodnoty dopočítat pomocí MKP.

Hodnocení zdvihu

Hodnocení zdvihu svěrky je základní měřitelnou veličinou. Hodnota teoretického zdvihu činí 13 mm. Teoretický zdvih svěrky umožňuje kmity (provozní namáhání) paty kolejnice ve svislém směru. V rámci běžného provozu lze kontakt „nosu“ svěrky a paty kolejnice považovat za limitní stav, ke kterému by nemělo docházet. Geometrie svěrky je zároveň navržena tak, aby při odlehčení svěrky při provozu nedocházelo ke ztrátě kontaktu ramen svěrky a paty kolejnice (ke ztrátě svěrné síly). Ke statické hodnotě zdvihu (dané stlačení svěrky při dotahování) se tak přidává dynamická složka daná provozem.

Hodnocení zdvihu při dotažení, který je daný tuhostí svěrky a předepsaným momentem dotahování, lze charakterizovat:

- 1) Hodnocení velikosti zdvihu v porovnání s teoretickou hodnotou 13 mm
Při překročení hodnoty 13 mm je nutné provést měření napětí při provozu, zároveň posoudit, zda nedochází ke kontaktu nosu svěrky a paty kolejnice.
Při nedosažení hodnoty 13 mm je nutno provést měření svěrné síly.
- 2) Hodnocení napětí na svěrce jako statického předpětí při dynamickém chování svěrky

Rozdílné hodnoty zdvihu ve vztahu k teoretické hodnotě jsou příznakem možné poruchy úhlové vodící vložky (např. vymačkání), chybně osazené svěrky či jiné části upevnění, nečistoty v upevnění, apod.

Hodnocení napětí

Na rozdíl od vnějších charakteristik (nominální svěrná síla, míra zdvihu) není vnitřní pnutí na svěrce přímo měřitelné, jeho hodnotu lze vyhodnotit nepřímo prostřednictvím MKP výpočtu. Charakteristika tohoto pnutí na průřezu svěrky v kritických místech (místech s nejvyšší hodnotou tohoto pnutí) je uvedena v kapitole 5.1.6. Hodnota napětí svěrky je přímo úměrná zdvihu svěrky.

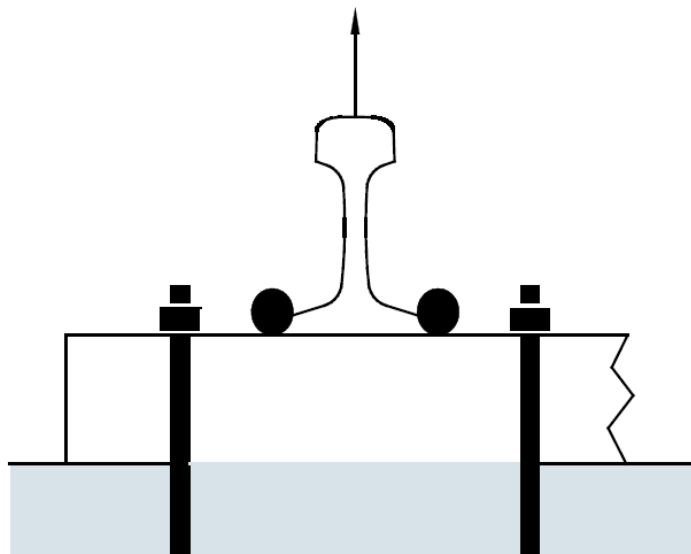
Přestože není možné realizovat měření vnitřního pnutí přímo, lze s modelem MKP konfrontovat hodnotu povrchového pnutí, které měřitelné je. Hodnotu povrchového napětí (hodnocení dle HMM hypotézy) lze stanovit pomocí tenzometrického měření.

Podobně jako u hodnocení zdvihu, lze hodnocení napětí charakterizovat:

- 1) Stanovit hodnotu zdvihu na základě znalosti napětí porovnáním s tabulkovými hodnotami dle MKP a následně porovnat s teoretickou hodnotou 13 mm
Při překročení hodnoty 13 mm je nutné provést měření zdvihu při provozu a posoudit, zda nedochází ke kontaktu nosu svěrky a paty kolejnice.
Při nedosažení hodnoty 13 mm je nutno provést měření svěrné síly.
- 2) Definovat napětí na svěrce jako statického předpětí při dynamickém chování svěrky

Hodnocení svěrné síly

Měření svěrné síly dle [35] je realizováno na dvojici svěrek (jeden uzel upevnění). Schématické znázornění zkoušky je uvedeno na Obr. 6-1.



Obr. 6-1: Zkouška měření svěrné síly [35]

Svěrnou sílu lze také měřit přípravkem Vosslohu, kdy je měřena jedna svěrka.

Hodnotícím kritériem je přímo velikost svěrné síly. Dle [4] je minimální limitní hodnota stanovena na 8 kN. Dle [3] je při dráze pružiny cca 13 mm svěrná síla cca 10 kN u jedné svěrky, tedy 20 kN pro každý uzel upevnění.

Pokud by došlo k poklesu svěrné síly pod uvedené hodnoty, může dojít ke změně geometrické polohy koleje při provozu. Maximální limitní hodnota svěrné síly je dána kontaktem nosu svěrky a paty kolejnice, je stanovena na 12 kN [3] – viz Obr. 4-36.

Vzhledem k charakteru měření je vhodnější individuální hodnocení svěrné síly (přístup dle Vossloh). V případě užití postupu dle [35] je možné individuální hodnocení realizovat tak, že jedna strana upevnění bude osazena novou svěrkou.

6.1.2 Hodnocení lomu svěrky

V případě, že dochází v provozované trati k lomům svěrek (nejčastěji jejich ramen) je třeba realizovat fraktografickou analýzu lomové plochy. Kritériem hodnocení je specifikace způsobu porušení (identifikace únavy), místo iniciace trhliny.

6.1.3 Hodnocení koroze

Korozní napadení svěrek je zásadním faktorem ovlivňujícím jejich provozní vlastnosti, má přímý vliv na velikost svěrné síly (přímý dopad na geometrickou polohu koleje), významně se uplatňuje při dynamickém chování, tj. snižuje únavovou pevnost svěrky. Míru koroze svěrky ovlivňuje celá řada faktorů, jedná se zejména o vliv prostředí a způsob ochrany povrchu (viz. kapitoly 1.1 a 3.2).

Hodnotícím kritériem je identifikace svěrné síly při různé míře korozního napadení. Míra napadení korozi lze hodnotit dvojím způsobem:

- Zbývající průměr drátu svěrky,
- úbytek hmotnosti.

Hodnocení zbývajícího průměru drátu

Prvním hodnotícím kritériem je zbývající průměr drátu (v případě korozního úbytku). Původní tloušťka drátu svěrky (nenapadeného korozi) činí 13 mm. Na základě provedeného experimentu (kap. 4.5.3) je přípustný úbytek průměru 1 mm. Při průměru menším než 12 mm klesá svěrná síla pod 8 kN se zohledněním tolerance $\pm 0,5$ kN.

Hodnocení procentuálního úbytku hmotnosti

Na základě experimentu dle kapitoly 4.5 této práce lze odhadnout závislost poklesu svěrné síly ve vztahu k hmotnosti svěrky při napadení korozi (po odstranění koroze). Hodnotícím kritériem je limitní úbytek hmotnosti vlivem koroze, kdy svěrná síla poklesne pod 8 kN na svěrci se zohledněním tolerance $\pm 0,5$ kN. Hodnota limitní hmotnosti svěrky vlivem koroze je 470 g.

6.1.4 Hodnocení odezvy na dynamické zatížení

Dynamické zatížení svěrky od provozu má zásadní vliv na únavovou životnost svěrky. Pokud se na trati objeví svěrky s únavovými lomy (prokázání únavového lomu na základě fraktografické analýzy – viz. kap. 6.1.2) je třeba provést posouzení na únavu. Základem posouzení je spektrum napětí odpovídající reprezentativnímu zatížení a únavová křivka. Únavová křivka je definována v kap. 4.2. Reprezentativní spektrum lze získat pomocí:

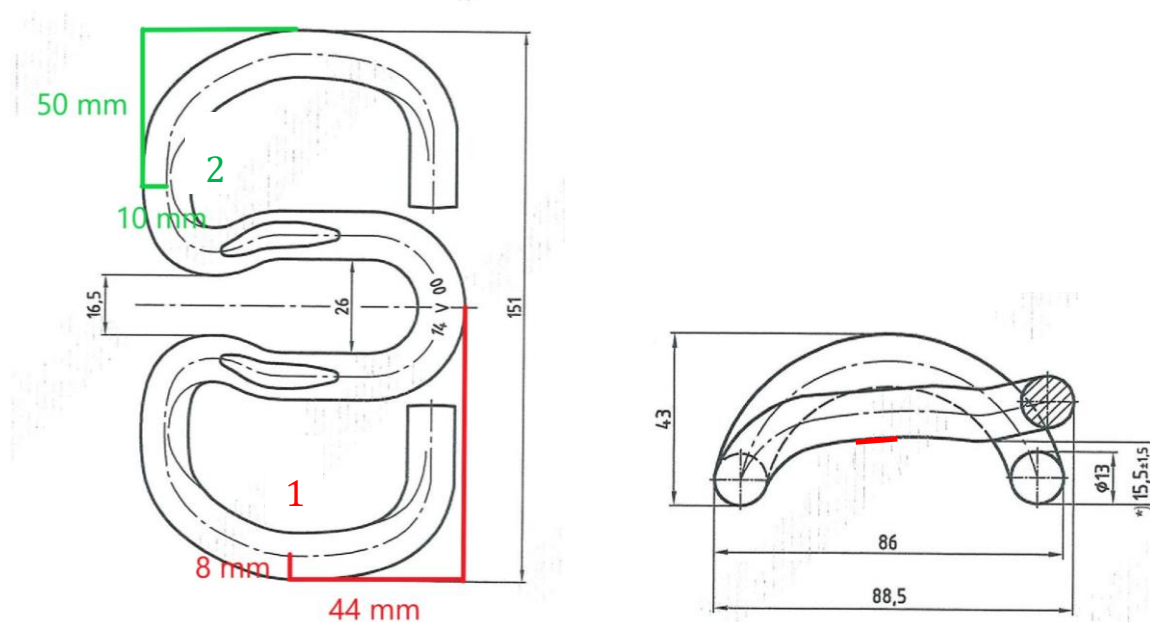
- přímého měření napětí na svěrci a následného vyhodnocení (HMH/von Mises hypotéza),

- měření svislých a příčných posunů kolejnice a následného využití MKP pro stanovení napětí,
- měření svislé kolové a příčné vodící síly působící na kolejnici a následného využití MKP pro stanovení napětí.

Uvedené hodnoty napětí reprezentují pouze dynamickou složku. Celková hodnota napětí bude dána součtem dynamické složky se složkou statickou (viz kap. 6.1.1).

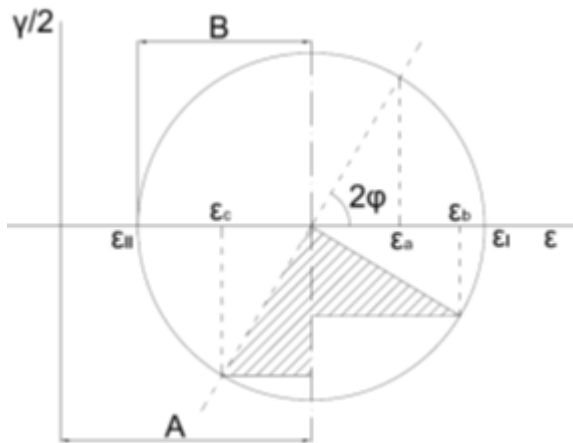
Identifikace povrchového napětí na svěrci od provozu

Podstatou identifikace odezvy na dopravní zatížení svěrky SKL14 je tenzometrické měření na ramenech svěrky prostřednictvím tenzometrických ružic. Doporučená místa měření jsou uvedena na Obr. 6-2. Srovnávacím/nosným kritériem je ekvivalentní napětí (HMH/Von Mises).

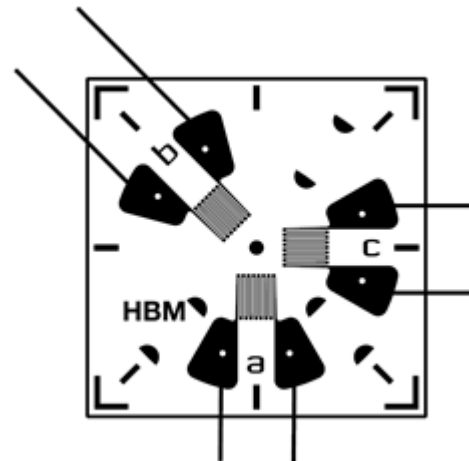


Obr. 6-2: Označení tenzometrů na svěrkách (1 nalepen zesponu vnějšího ramene svěrky)

Při užití tenzometrických ružic umístěných ve úhlech 90°-135°-135° (viz Obr. 6-4) je identifikace redukovaného/srovnávacího napětí dle HMH následující (Obr. 6-3):



Obr. 6-3: Stanovení hlavních napětí



Obr. 6-4: Tenzometrická růžice - např. HBM 1-RY11-3/120 [24]

$$\varepsilon_{I,II} = A \pm B, \text{ kde} \quad (1)$$

$$A = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \quad \text{a} \quad B = \sqrt{(A - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_b - A)^2}, \text{ potom} \quad (2), (3)$$

$$\sigma_I = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_I + \mu \varepsilon_{II}) = \frac{E}{1-\mu^2} [A + B + \mu(A - B)] \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

$$\sigma_{II} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{II} + \mu \varepsilon_I) = \frac{E}{1-\mu^2} [A - B + \mu(A + B)] \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

E je uvažováno 210 000 MPa, pokud materiálové charakteristiky nedefinují jinou hodnotu Youngova modulu pružnosti.

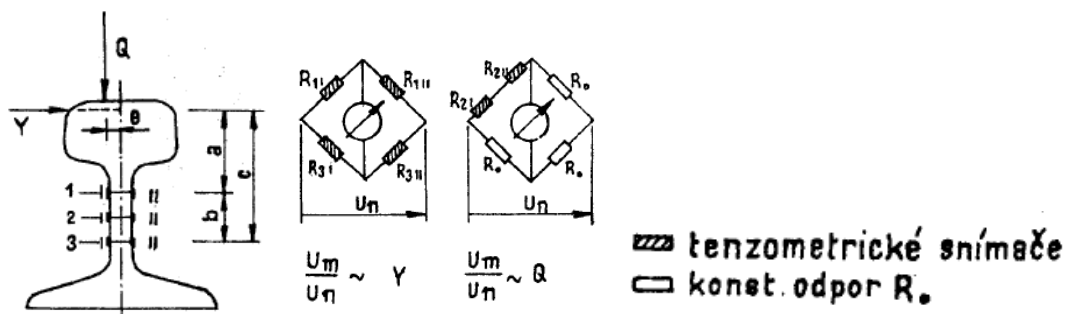
Na základě identifikovaných maximálních hlavních napětí (v daném čase), lze pro rovinnou napjatost dovodit hodnotu ekvivalentního/redukovaného napětí (HMH energetická hypotéza) – např. dle [48]:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

Vzhledem k faktu, že tenzometrické snímače se umísťují na povrchu svěrky, budou dosažené hodnoty měření vysoké (v souladu s MKP výpočtem).

Identifikace svislých kolových a příčných vodících sil

Postup pro měření příčné vodící síly Y a svislé kolové síly Q je uveden v [25, 26]. Uvedený postup umožňuje na základě tenzometrického měření deformace stojiny kolejnice identifikovat uvedené síly od provozu, schéma zapojení je zobrazena na Obr. 6-5.



Obr. 6-5: Umístění tenzometrů na stojně kolejnice, schéma zapojení tenzometrů [25]

Správné nastavení přepočtových konstant vodící síly Y (výstupy tenzometrického měření jsou uvedeny v mV/V) je možno realizovat pomocí kalibrace, kdy je využita měřící rozpěrná tyč osazená siloměrem. Měření svislé kolové síly Q je pak možno definovat tárovaným zatížením (doloženo kalibračními vahami).

Na základě záznamu svislé kolové a příčné vodící síly a modelu MKP je možné definovat/generovat záznam napětí svěrky. Tento postup je však značně komplikovaný.

Vlastní měření svislých a příčných sil je tedy spíše doplňujícím měřením, které přináší informaci, jaké kolové a vodící síly způsobují případná vysoká napětí na svěrkách, popř. způsobují nadměrné svislé a příčné posuny paty kolejnic. Jde tedy o identifikaci míry zatížení.

Identifikace svislých a příčných posunů

Dle MKP modelu (kap. 5) je možné napětí ve svěrci definovat jako odezvu na působící zatížení na kolejnici. Toto působící zatížení může být definováno svislým a příčným zdvihem. Na základě identifikace/měření posunů paty kolejnice a přepočtových tabulek MKP lze generovat modifikovaný záznam napětí na svěrci.

I v tomto případě se jedná o komplikovaný způsob stanovení záznamu napětí na svěrci. Měření posunů paty kolejnice však může dle [28], [3] identifikovat tzv. únavový limit svěrek Skl14. Tento limit činí ve svislém směru ± 1 mm, tzn. pokud je svislý posun nižší než uvedená hodnota, není nutné svěrku na únavové poškození hodnotit. Svěrky se zkouší dle [3] dlouhodobou zkouškou pevnosti při vertikálním namáhání. Amplituda zatěžování je 2 mm při frekvenci 15 – 18 Hz a po 5 mil. cyklech nesmí svěrky vykazovat žádná poškození. Z pohledu příčných posunů paty kolejnice (za předpokladu srovnatelných posunů ramen svěrky - rameno svěrky se za současného působení koroze zatlačí do paty) se dle [3] svěrky zkouší dlouhodobou zkouškou pevnosti při horizontálním namáhání. Amplituda zatěžování je $+0,6/-0,2$ mm při zkušební frekvenci 7 – 9 Hz a po 3 mil. cyklech nesmí svěrka vykazovat žádná poškození. Pokud je tato hodnota překračována, dochází k lomům ramen svěrky.

Přestože není identifikace svislých a příčných posunů z pohledu výpočtu vlastních napětí na svěrci vhodnou metodou z důvodu komplikovanosti výpočtu, je tato metoda důležitým vodítkem, zda dochází k významnému únavovému namáhání či nikoli.

Hodnocení únavového poškození

Hodnocení únavového poškození je založené na Palmgren-Minerově hypotéze kumulace únavového poškození dle [49].

Podkladem pro hodnocení jsou:

- upravený reprezentativní časový záznam napětí svěrky stanovený v kritickém místě, časový záznam je modifikován tak, aby vyjadřoval ekvivalentní/redukované napětí dle HMM hypotézy (možno reflektovat na poznatky uvedené v kap. 5.1.7 a kap. 6.1.4) se zahrnutím statického předpětí dle kap.6.1.1,
- definovaná únavová křivka dle kap. 4.2,
- definovaná historie zatěžování svěrky.

Postup hodnocení na únavu dle [50]:

Dle postupu uvedeném v této kapitole je třeba získat reprezentativní záznam napětí na svěrce, tento záznam dále transformovat tak, aby vyjadřoval redukované napětí dle HMM hypotézy. Vzhledem ke způsobu realizace tenzometrického měření dynamické složky (neobsahuje statické předpětí) je také k záznamu připočteno konstantní napětí od dotahování svěrky. Finálně upravený záznam se následně vyhodnotí třídící dvouparametrickou metodou Rain Flow. Dvouparametrická matice se transformuje na jednoparametrickou pomocí Goodmana [56]. Určí se únavová životnost s ohledem na volbu reprezentativního záznamu. Pokud je známá provozní historie svěrky, lze odhadnout zbytkovou životnost.

6.1.5 Hodnocení zrychlení

Měření zrychlení paty kolejnice ve svislém směru je určující pro stanovení srovnávacích energetických parametrů RMS (efektivní hodnota zrychlení) a identifikace frekvence způsobující tzv. vlnovitost. Kromě uvedené charakteristiky lze identifikovat lokální maxima a minima zrychlení a tím i případný poškozující účinek jednotlivých náprav na upevnění.

Hodnocení efektivní hodnoty zrychlení (RMS)

Obecně lze konstatovat, že efektivní hodnota zrychlení RMS má vyšší vypovídací hodnotu o energetickém obsahu zrychlení, než lokální maxima. Popis RMS je uveden např. v [29]: „Odráží časový průběh amplitud chvění a zároveň má přímý vztah k jeho energetickému obsahu. Je tedy měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti dané veličiny.

Efektivní hodnotu zrychlení kmitání a_{ef} [$m \cdot s^{-2}$] definovat [29]:

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt}, \quad (8)$$

kde $a(t)$ [$m \cdot s^{-2}$] je okamžitá hodnota zrychlení kmitání a T [s] je doba, pro kterou je efektivní hodnota RMS určena.

Výsledná efektivní hodnota svislého zrychlení může být hodnocena dle [30]:

Umístění	Efektivní zrychlení ve svislém směru m/s^2	Efektivní zrychlení v příčném směru m/s^2	Efektivní zrychlení v podélném směru m/s^2	Obrázek (příloha C)
Na kolejnici	280	140	50	C.1
Na pražci	130	50	90	C.2
Na kolejovém loži	10	10	10	C.3
Mimo trať (1 m až 3 m od kolejnice)	2,3	2,3	2,3	C.4

Limitní hodnotou RMS je $280 m/s^2$ (cca 28 g).

Hodnocení skluzových vln (vlnkovitost)

Dle [51] jsou skluzové vlny typickou vadou kolejnice vznikající provozem. V daném kontextu se jedná o tzv. krátké vlny (rozteč vlny 8 až 30 cm) o hloubce až 1,2 mm. Vada je vyvolána nestejným odvalováním kol pevné nápravy žel. vozidla při jízdě oblouky malých poloměrů (méně než 300 m). Na vnitřních kolejnicích se pak projevuje skluz odlehčeného kola. Vady se projevují zejména u kolejnic s vyšší pevností, kde je průběžné opotřebení temene hlavy kolejnice nižší než růst vznikajících skluzových vln.

Přestože přímý vliv vlnkovitosti na upevnění nebyl prokázán, respektive nebyly stanoveny účinky vlnkovitosti na upevnění (zda se jedná o svislé, příčné či podélné zatížení), má se obecně zato, že vlnkovitost může ovlivnit vady upevnění (chybějící součásti upevnění, prasklé svěrky a vrtule, zničené podložky pod patu kolejnice, atd.).

Stanovení frekvenční hodnoty výskytu vlnkovitosti při provozním zatížení v kontextu s jednotlivými průjezdy zatěžovacích souprav může být doplňujícím údajem k celkovému hodnocení svěrek Skl14.

7 Ověření metodiky

7.1 Volba hodnoceného úseku

Měřicím místem byla zvolena železniční stanice Kolín, konkrétně trať 502A Kolín – Nymburk (viz Obr. 7-1). U měřicího místa se nachází železniční přejezd, ze kterého má autor práce vzorky pružných svěrek, které vykazovaly velké korozní úbytky, a velká část svěrek byla zničena, kdy došlo k odlomení vnějších ramen pružných svěrek. Měřicí místo se nachází v oblouku o poloměru 190 m s převýšením 56 mm a rychlostí 50 km/h. Toto místo bylo vybráno po domluvě s pracovníky Správy železnic, vzhledem k poruchám, které v daném místě vznikají (skluzové vlny, praskání svěrek, apod.).

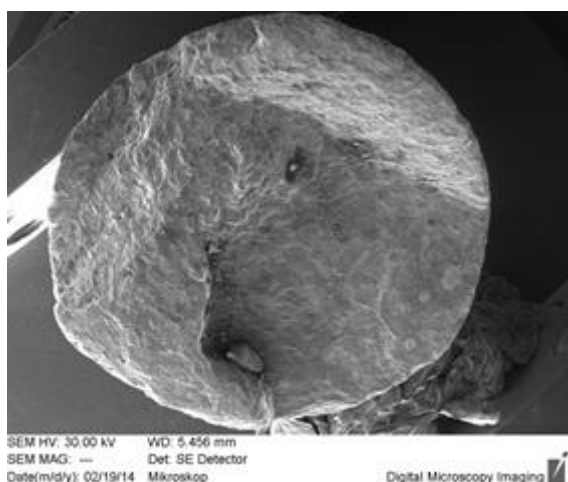


Obr. 7-1: Lokalita měřeného místa [52]

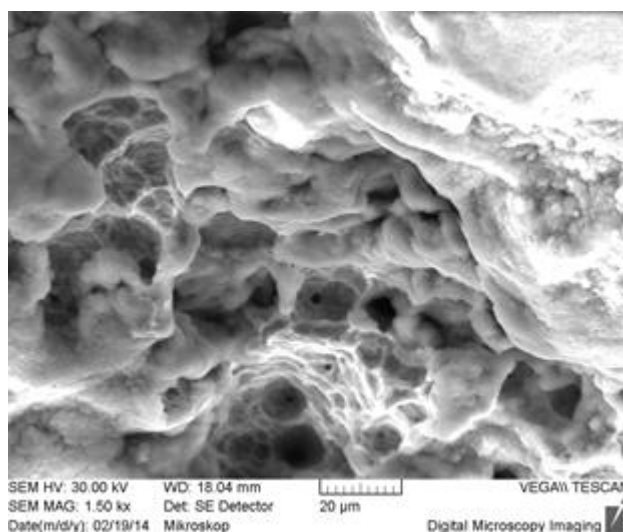
7.2 Fraktografická analýza

Vzhledem k faktu, že se v daném měřeném úseku nacházely svěrky Sk114 s vadami odlomených ramen, bylo v rámci ověření metodiky přistoupeno nejprve k fraktografické analýze.

Lomová plocha svěrky z přejezdu v Kolíně, u které nastal lom i přes to, že nevykazovala výrazný korozní úbytek, byla podrobena zkoumání elektronovým mikroskopem. Cílem tohoto zkoumání bylo zjištění, jakým lomem došlo k porušení svěrky. U svěrky s úplným odlomením ramene byla lomová plocha byla značně korozně napadena, proto ji nebylo možno vyhodnotit - Obr. 7-2 a Obr. 7-3.



Obr. 7-2: Lomová plocha svěrky z Kolína zachycená elektronovým mikroskopem



Obr. 7-3: Detail lomové plochy svěrky z Kolína s patrnou korozí zachycený elektronovým mikroskopem

Vzhledem k nemožnosti zkoumání lomové plochy svěrky vyjmuté z železničního přejezdu u žst. Kolín, byla z dalších získaných vzorků vybrána jiná svěrka, u které nedošlo k úplnému odlomení ramene svěrky – Obr. 7-4. U této svěrky bylo rameno uměle dolomeno - Obr. 7-5 a vzniklá plocha byla podrobená zkoumání elektronovým mikroskopem. Před samotným zkoumáním byl povrch svěrky ultrazvukově vyčištěn.

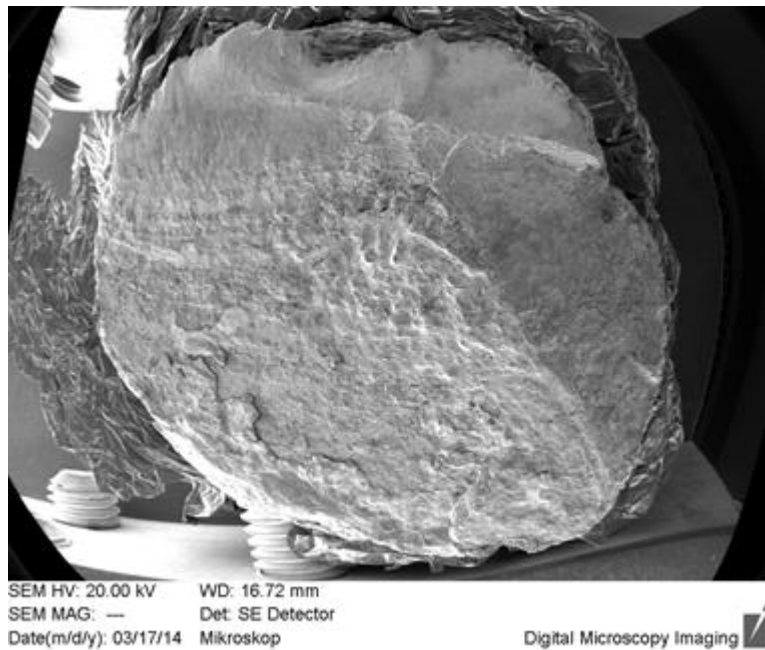


Obr. 7-4: Svěrka z Kolína s nalomeným ramenem

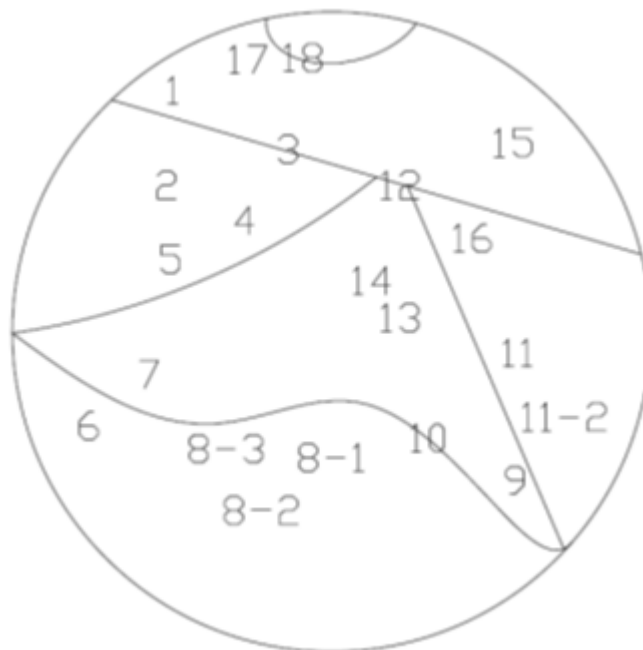


Obr. 7-5: Svěrka z Kolína s uměle dolomeným ramenem

Na Obr. 7-6 je znázorněn povrch dolomeného vzorku. Horní část vzorku znázorňuje uměle dolomenou část. Jak je z Obr. 7-5 patrné, dolomená část je v horní části ramena svěrky (pracovní poloha svěrky v koleji). Jednotlivé oblasti vzorků byly zkoumány podrobněji a každé zkoumané oblasti bylo přiřazeno číslo. Číslo jednotlivých oblastí jsou patrná z Obr. 7-7.



Obr. 7-6: Povrch dolomeného vzorku zachycený elektronovým mikroskopem



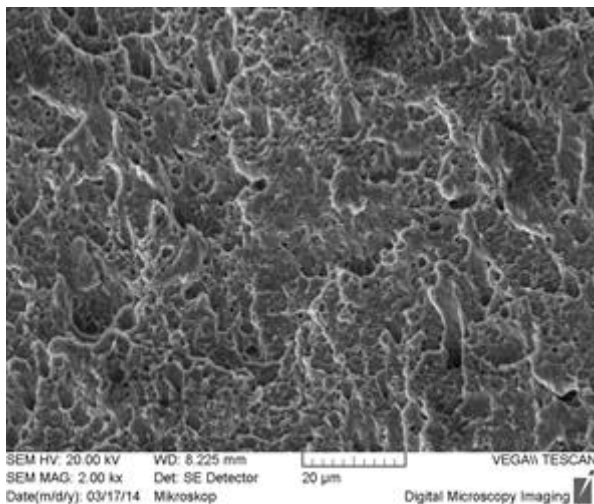
Obr. 7-7: Povrch dolomeného vzorku s vyznačenými čísly zkoumaných oblastí

Povrch dolomeného vzorku s vyznačenými čísly zkoumaných oblastí je znázorněn na Obr. 7-7. Rozložení porušení na vzorku je schematicky znázorněno na Obr. 7-8. Je patrné, že se v horní části nachází oblast dolomu (čistý tvárný lom), nad touto oblastí je korozní díra a zbytek vzorku byl poškozen únavou, případně kombinací únavy a kvazistatického namáhání. Nešlo tedy o statický lom, ale lom způsobený opakovaným zatížením. Dále je možné říci, že únavový lom měl více míst iniciace. Vzhledem ke korozi povrchu svěrky nebylo možné tato místa iniciace určit.

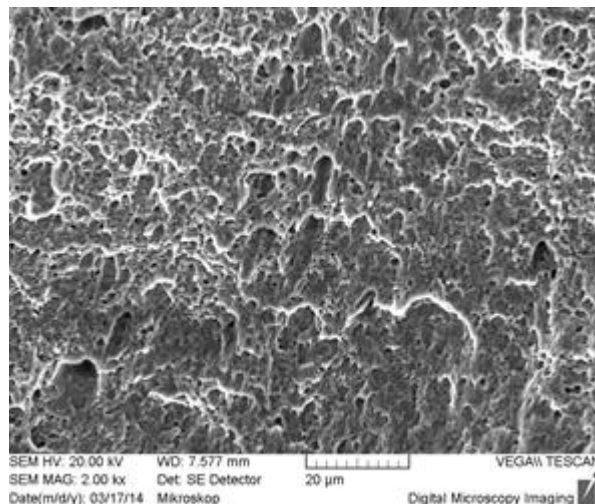


Obr. 7-8: Rozdělení ploch na povrchu vzorku s popisem příčiny vzniku poškození

Vyhodnocení vzorku je popsáno od oblasti dolomení. Bylo zřejmé, jakým způsobem bylo místo poškozeno (umělé dolomení úderem). Při vyhodnocení se místo objevilo jako čistý tvárný lom – Obr. 7-9 a Obr. 7-10.

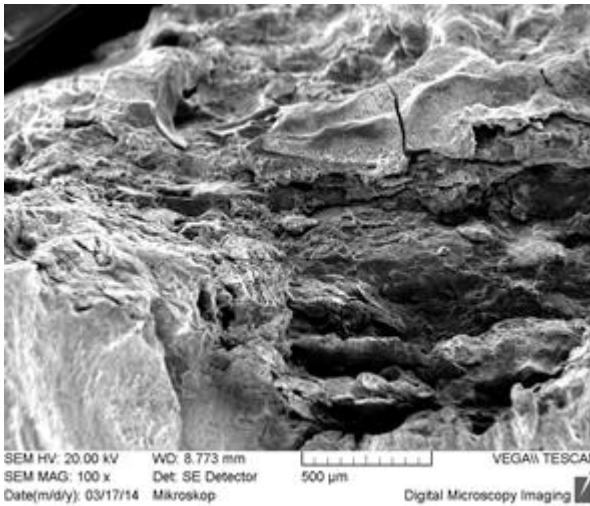


Obr. 7-9: Oblast 1 – čistý tvárný lom

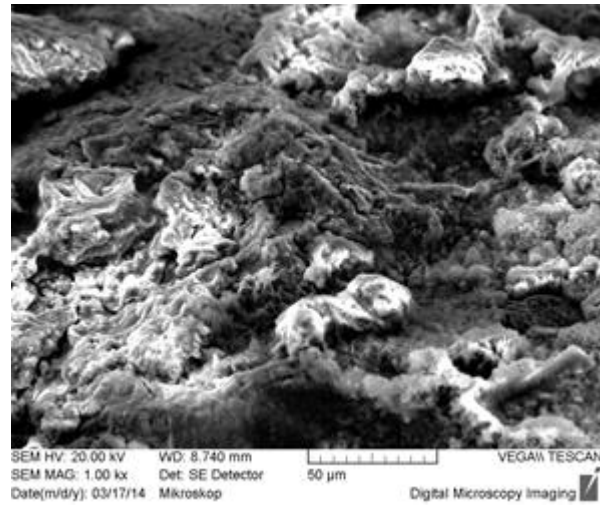


Obr. 7-10: Oblasti 15 – čistý tvárný lom

V oblasti 18 nad dolomem se nachází korozní díra - Obr. 7-11 a Obr. 7-12. Lze konstatovat, že velikost plochy, kterou drželo rameno svěrky pohromadě, činila cca 15 % plochy svěrky a v místě korozní díry byla ještě zmenšená právě o tuto díru.

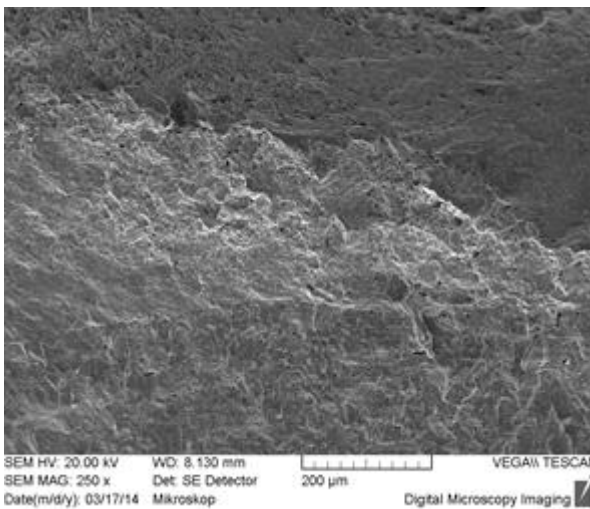


Obr. 7-11: Oblast 18 – korozní díra

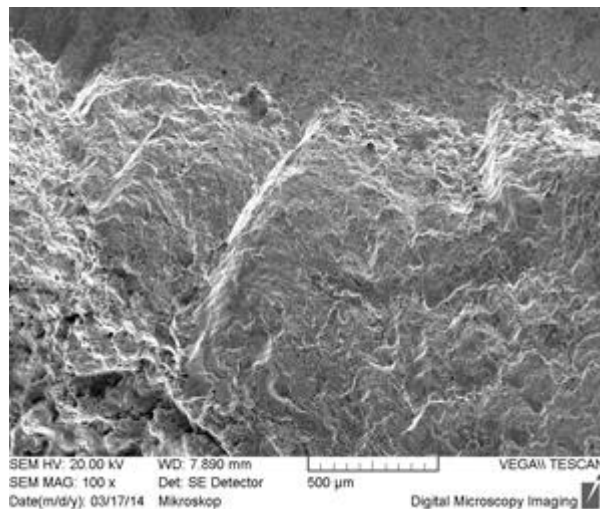


Obr. 7-12: Oblast 18 – korozní díra

Pod oblastí dolomu je oblast, kde přechází čistý tvárný lom v únavové poškození - Obr. 7-13 a Obr. 7-14.

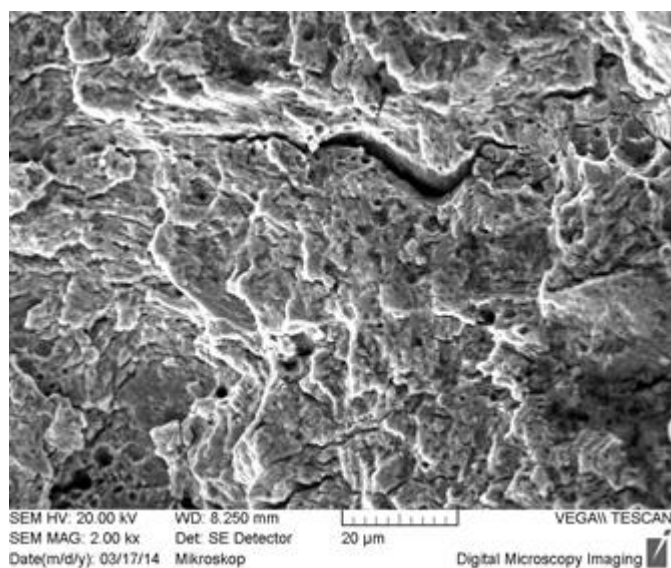


Obr. 7-13: Oblast 3 – přechod čistý tvárný lom / únava



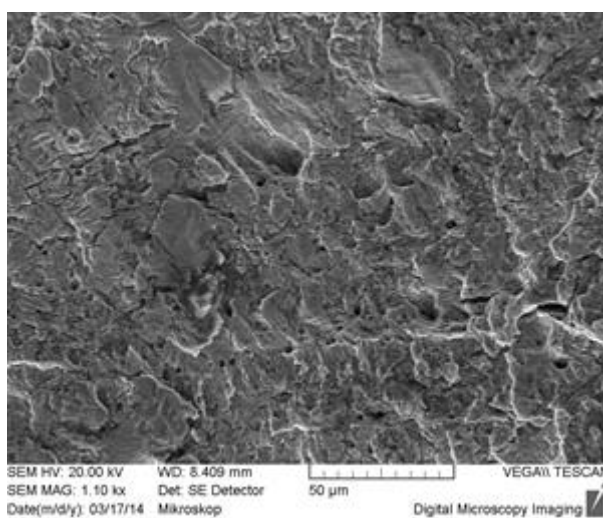
Obr. 7-14: Oblast 12 – přechod čistý tvárný lom / únava

Uprostřed vzorku jsou patrné projevy kvazistatického porušení – Obr. 7-15.

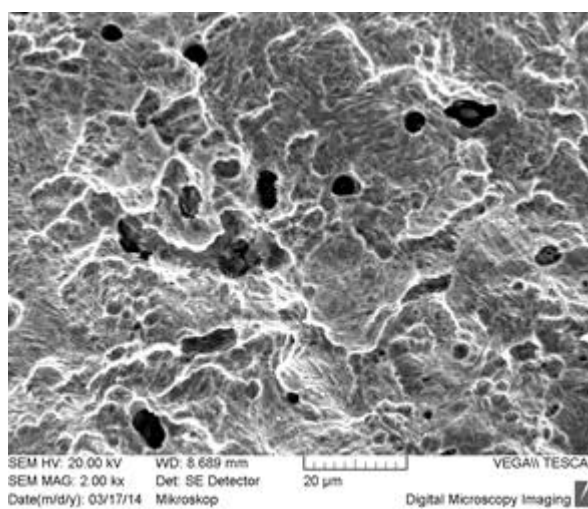


Obr. 7-15: Oblast 5 - kvazistatika

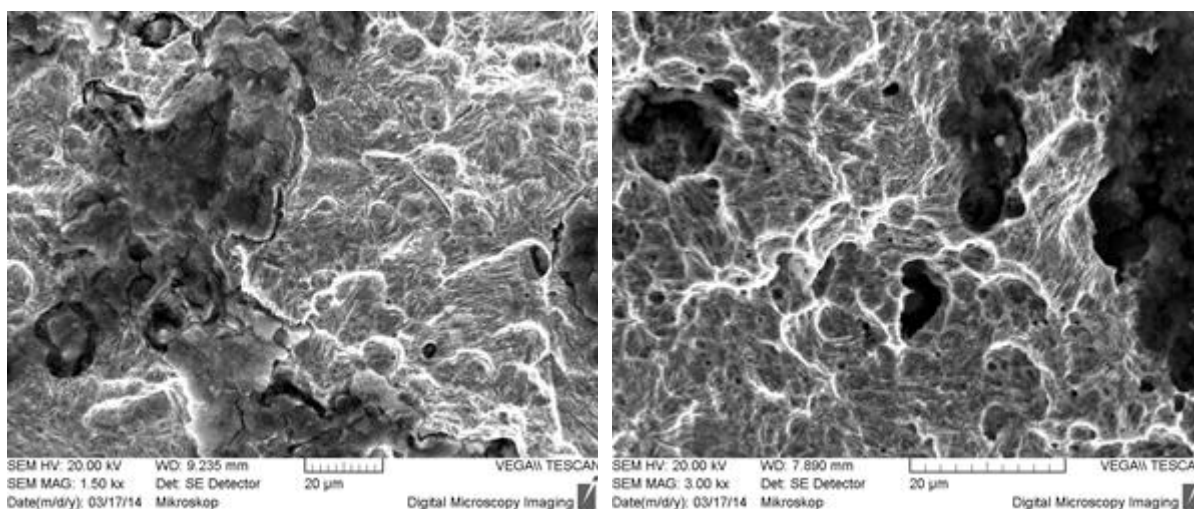
Projevy únavového poškození jsou zobrazeny na Obr. 7-16 až Obr. 7-19.



Obr. 7-16: Oblast 2 – únava



Obr. 7-17: Oblast 7 - únava



Obr. 7-18: Oblast 8-2 – únava, patrné také korozní projevy

Obr. 7-19: Oblast 11 – únava, patrné také korozní projevy

Na lomu svěrky bylo prokázáno únavové porušení. K únavovému porušení došlo i přes fakt, že svěrka nebyla výrazně korozně napadena a provoznímu zatížení byla vystavena pouze 3 roky. Prokázání únavového poškození bylo v tomto případě rozhodující pro další podrobné hodnocení svěrky dle navržené metodiky hodnocení.

7.3 Hodnocení odezvy na statické předpětí

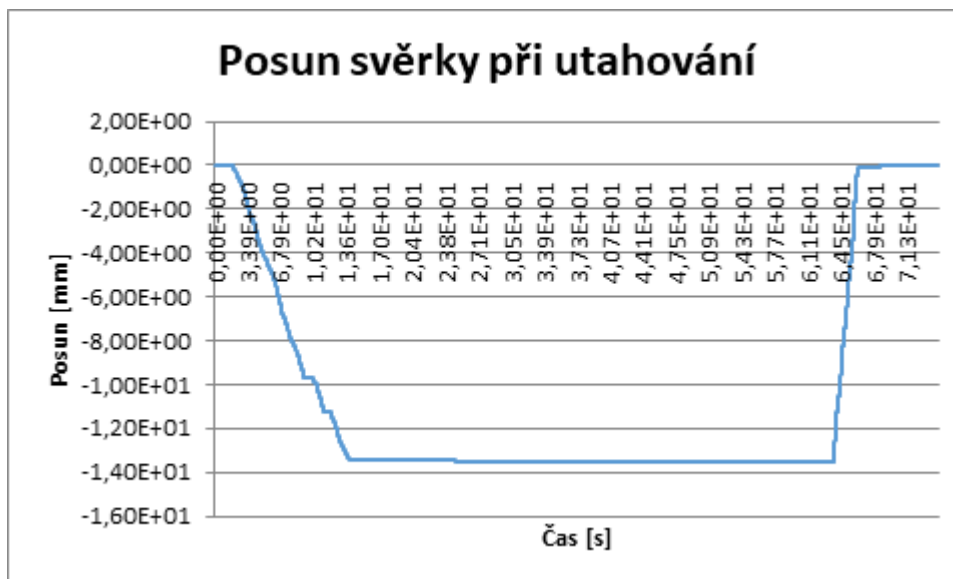
V rámci metodiky je třeba před vlastním hodnocením únavového zatížení definovat hodnoty statického předpětí (vliv střední hodnoty zatížení na únavovou pevnost), které je dáno dotažením svěrky předepsaným momentem.

7.3.1 Hodnocení zdvihu

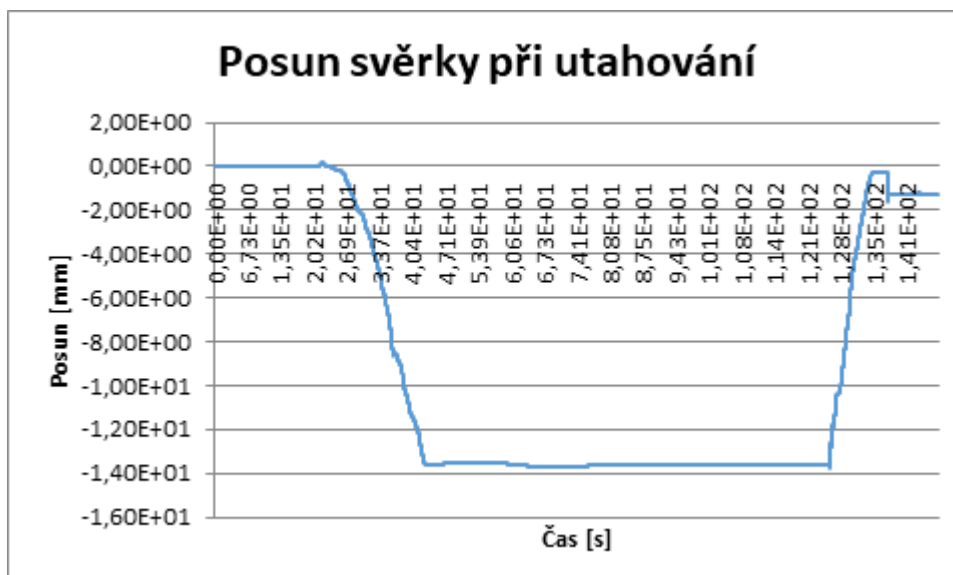
V rámci měření byla zjištěna hodnota posunů středního „nosu“ pružné svěrky Skl 14 při utahování momentovým klíčem dle [12] na hodnotu 180 – 220 Nm. Svěrky byly utahovány na 200 Nm a dále na 220 Nm. Vrtule byla dotažena tak, aby došlo ke kontaktu se svěrkou, což je bráno jako výchozí stav. Uspořádání sestavy bylo následující. Na pražec byla přilepena kovová destička a na tu byl připevněn magnetický stojánek, do kterého byl upnutý indukční snímač měření posunů. Hrot snímače byl přiložen na střední nos svěrky, ke které byla dotažena vrtule. Následně došlo k utahování na předepsaný moment. Snímače byly připojeny na měřicí zesilovač HBM DMC Plus, kde došlo zároveň k digitalizaci analogového záznamu. Digitalizované záznamy posunu byly registrovány do PC prostřednictvím SW HBM Catman.

K měření byly použity svěrky bez známek vnějších vad (deformace, koroze, lomy).

Grafické záznamy jsou zobrazeny na Obr. 7-20 a Obr. 7-21.



Obr. 7-20: Záznam posunů středního nosu svěrky při utahování



Obr. 7-21: Záznam posunů středního nosu svěrky při utahování

Při hodnotách utahovacích momentů 200 Nm byly změřeny hodnoty 13,4 mm a 13,5 mm. Při hodnotách utahovacích momentů 220 Nm pak byly změřeny hodnoty 13,5 – 13,7 mm.

Dosažené hodnoty překračovaly o 3,84 – 5,38 % hodnotu teoretického zdvihu. Porovnání von Mises napětí při teoretické hodnotě 13 mm a hodnotami změřenými při utahování je zobrazeno v Tab. 7-1. Hodnoty byly zjištěny MKP výpočtem (dle kap. 5.1.6) a interpolací dle Obr. 5-20. Je zřejmé, že čím vyšší jsou hodnoty utažení, tím vyšší lze očekávat také hodnoty napětí na svěrce, a to o 1 až 6 % dle velikosti zdvihu a místa na svěrce. Uvedené rozdíly vedly k dalšímu stupni ověření pomocí hodnocení napětí.

Tab. 7-1: Porovnání napětí při utaženích vyšších než referenční hodnota

	Řez	Napětí von Mises při zdvihu [MPa]					Procentuálně oproti referenční hodnotě 13 mm			
		13 mm	13,4 mm	13,5 mm	13,6 mm	13,7 mm	%	%	%	%
Maxima	Osa y_řez 1	1297	1310	1334	1344	1354	101	103	104	104
	Osa z_řez 1	926	950	954	960	966	103	103	104	104
	Osa x_řez 2	1811	1902	1896	1910	1924	105	105	105	106
	Osa y_řez 2	1569	1614	1626	1639	1651	103	104	104	105

7.3.2 Hodnocení napětí

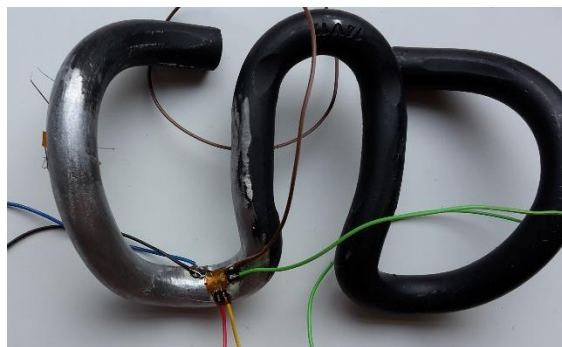
Na základě předchozího hodnocení zdvihu bylo následně přistoupeno k hodnocení napětí svěrky v kritických místech. Za tímto účelem byly zhotoveny měřící svěrky.

7.3.2.1 Měřící svěrky – měřící řetězec

Měřící svěrky (v počtu 2 ks) byly osazeny tenzometrickými růžicemi ve dvou různých polohách (celkem 4 ks růžic). Polohy snímačů byly voleny s ohledem na místa největšího namáhání dle MKP výpočtu výrobce, společnosti Vossloh a s ohledem na statistické vyhodnocení poškozených svěrek po 3 letech provozu. Vzhledem k absenci podrobných dat MKP výpočtu byla tato místa volena na základě konzultací se zástupcem společnosti Vossloh pro Českou republiku. Svěrky vyjmuté z provozu vykazovaly lom přibližně v polovině vnějšího ramene, přičemž místem iniciace lomu byla spodní strana svěrky. Výsledky fraktografické analýzy poškozené svěrky vyjmuté z železničního přejezdu u žst. Kolín jsou uvedeny v kapitole 7.2.

Tenzometrické měření je standardní měření, popis je uveden např. v [34].

Poměrně složitým se ukázala být problematika výběru tenzometrů. Vzhledem k účelu měření, složitosti namáhání a velikosti plochy, na kterou byly tenzometry lepeny, bylo rozhodnuto, že budou použity co možná nejmenší tenzometrické růžice, které umožňují měření ve třech směrech. Jako první varianta byly zvoleny tenzometrické růžice HBM 1-RY91-1,5/120, 0°/45°/90° s překrývajícími se mřížkami délky 1,5 mm a jmenovitým odporem 120 Ohmů. Tento typ se však ukázal jako nevhodný, protože při lepení růžic docházelo opakovaně k poškození části tenzometrické růžice (přerušování odporu jednoho z tenzometrů v důsledku zakřivení povrchu svěrky). Proto bylo rozhodnuto použít tenzometrické růžice, u kterých se jednotlivé tenzometry nepřekrývají, byly zvoleny tenzometrické růžice HBM 1-RY11-3/120, 0°/45°/90° s mřížkami délky 0,8 mm, jmenovitým odporem 120 Ohmů a k-faktorem 1,85. Umístění tenzometrů na svěrce je patrné z Obr. 7-22 a Obr. 7-23 - vnější rameno svěrky a střední část svěrky.

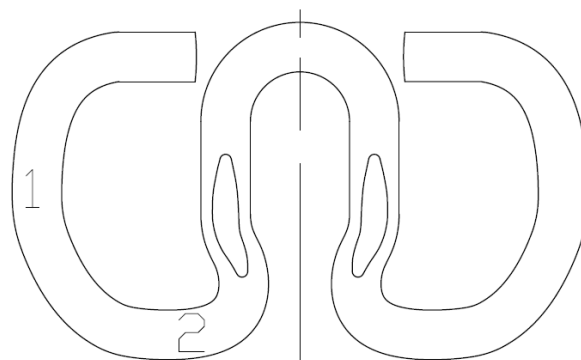
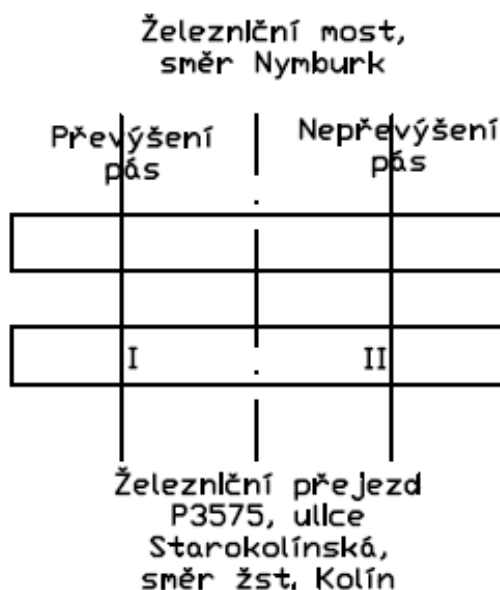


Obr. 7-22: Umístění tenzometrů na svěrce – střední část svěrky – označeno 2



Obr. 7-23: Umístění tenzometrů na svěrce – vnější rameno – Označeno 1. Včetně kompenzačních tenzometrů

Označení měřicího místa je tedy např. I_1. Přehledné je označení snímačů ve vztahu k měřenému místu je patrné z Obr. 7-24 a Obr. 7-25.



Obr. 7-25: Označení tenzometrů na svěrkách (1 nalepen zespodu vnějšího ramene svěrky)

Obr. 7-24: Označení svěrek v koleji

Zapojení bylo provedeno do půlmostového Wheatstoneova můstku (kompenzace teploty byla umístěna rovněž přímo na svěrce). El. zapojení měřených míst bylo ve všech místech obou měrných svěrek analogické. Tenzometrické snímače byly připojeny na měřicí zesilovač HBM DMC Plus (kde došlo zároveň k digitalizaci analogového záznamu deformací/napětí). Digitalizované záznamy napětí byly registrovány do PC prostřednictvím SW HBM Catman. V měřicí ústředně bylo nastaveno zesílení dle konstanty tenzometru, maximálního napájení a typu zapojení. Vzorkovací frekvence pro měření byla 600 Hz. Výsledné změřené hodnoty deformací na jednotlivých tenzometrech různic byly následně použity pro stanovení ekvivalentního napětí (postup přepočtu napětí je uveden v kapitole 6.1.4).

7.3.2.2 Umístění svěrek – měřící místo

Svěrky byly umístěny na vnitřní strany kolejnic – viz Obr. 7-26. Pohled je směrem ke stanici/přejezdu. Měřící místo bylo umístěno v pravé koleji ve směru na železniční most, koleji č. 114 – viz Obr. 7-27. Svěrka vlevo s označením II (vnitřní svěrka u nepřevýšené kolejnice, mělo by být větší namáhání při přebytku převýšení), svěrka vpravo s označením I (vnitřní svěrka u převýšené kolejnice, mělo by být větší namáhání při nedostatku převýšení). Místa umístění svěrek byla vybrána na základě analýzy umístění poškozených svěrek v koleji.



Obr. 7-26: Umístění svěrek v koleji



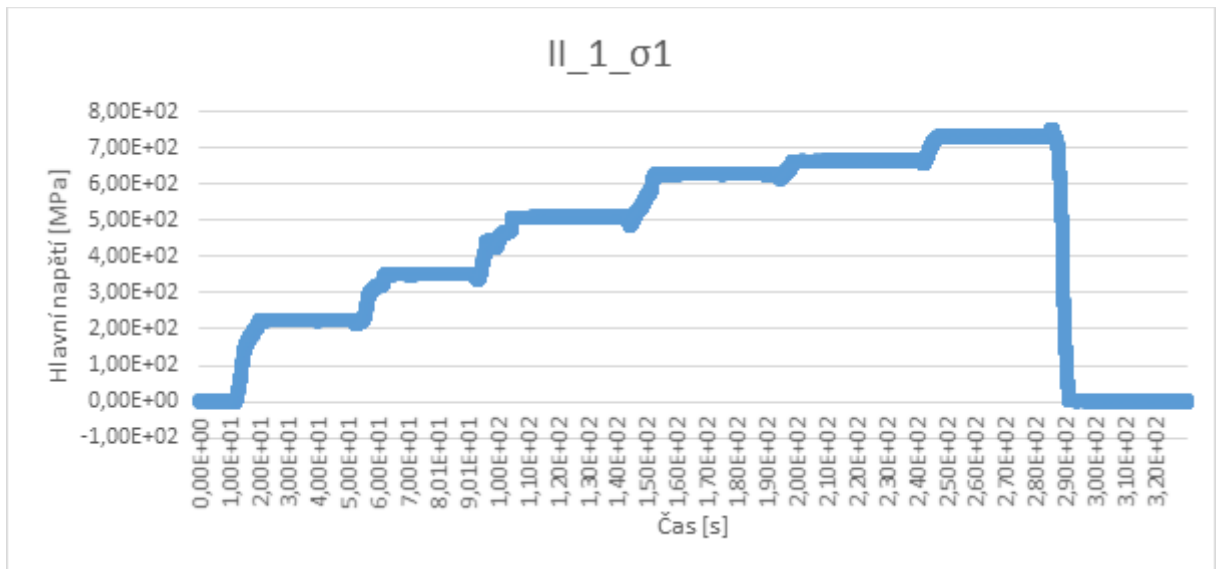
Obr. 7-27: Měřené místo žst. Kolín

Měření bylo realizováno na standardní, běžně užívané konstrukci železničního svršku – betonové pražce B91S/1, kolejnice 60E1, upevnění W14 (svěrky Skl14), bezstyková kolej.

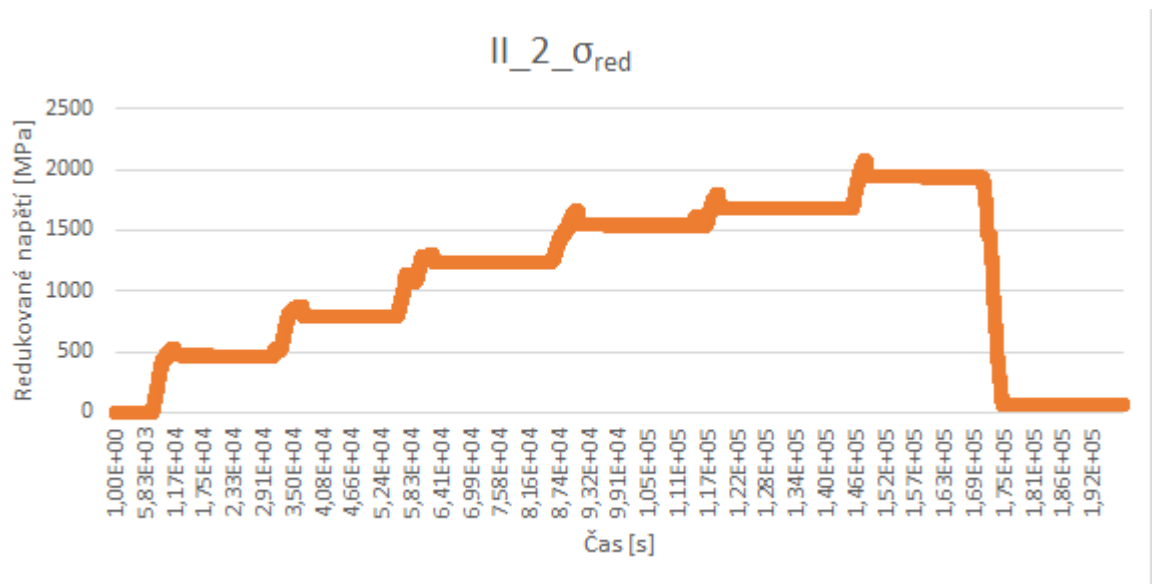
7.3.2.3 Realizace měření

Po umístění měřicí svěrky do měřeného místa byla svěrka postupně utahována na 50, 100, 150, 180, 200, 220 Nm a následně úplně povolena. Utahování bylo prováděno kalibrovaným momentovým klíčem s budíkem. Měření bylo realizováno celkem čtyřikrát. Hodnoty napětí na jednotlivých tenzometrech byly měřeny pomocí měřicí ústředny a následně postupně převedeny

na hlavní napětí a ekvivalentní napětí dle postupu uvedeném v kap. 6.1.4. Grafické záznamy z jednotlivých tenzometrů, převedené záznamy na hl. napětí a finální záznam ekvivalentního napětí jsou uvedeny v Příloze D. Příklad grafu zobrazujícího hlavní napětí je uveden na Obr. 7-28 a ekvivalentní napětí je na Obr. 7-29.



Obr. 7-28: Záznam měření utahování pružné svěrky



Obr. 7-29: Záznam měření utahování pružné svěrky – von Mises

Výsledné hodnoty ekvivalentního zatížení jsou shrnuty v Tab. 7-2.

Tab. 7-2: Hodnoty redukovaných napětí zjištěné při utahování

	Svěrka_II_1	Svěrka_II_2	Svěrka_I_1	Svěrka_I_2
	σ_{red}	σ_{red}	σ_{red}	σ_{red}
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Měření 01	887,014	2068,590	x	x
Měření 02	899,254	2137,032	x	x
Měření 03	x	x	974,635	1977,293
Měření 04	x	x	961,121	1794,913

Výsledky je možno konfrontovat s napětím vyvolaným teoretickou hodnotou při zdvihu 13 mm dle MKP, kde je dosaženo velmi dobré shody. Zároveň je maximální hodnota napětí podkladem pro pozdější hodnocení na únavu.

7.3.3 Hodnocení svěrné síly

Dle uvedené metodiky nesouvisí hodnocení identifikace svěrné síly přímo s hodnocením únavového poškození. Svěrná síla svěrky je však důležitá z hlediska celkové funkce upevnění (GPK, pohyb mezi kolejnicí a ramenem svěrky, atp.). Výhodou hodnocení svěrné síly je jednoznačná parametrizace limitních hodnot dle legislativy [4]. Hodnota svěrné síly je rovněž velmi dobrým indikátorem míry oslabení svěrky korozí, kdy dochází ke snížení hodnoty svěrné síly v důsledku úbytku materiálu svěrky.

Měření svěrné síly proto bylo realizováno na svěrkách s různou mírou korozního napadení. Míra korozního napadení byla dána zbývající tloušťkou drátu po očištění od koroze (mechanické očištění). Pro měření byly zvoleny střední části svěrek, viz Obr. 4-44. Měření bylo realizováno digitálním posuvným měřítkem Mitutoyo CD-30PPX, hmotnosti svěrek byly měřeny digitální váhou s přesností ± 1 g.

Do měření byly z důvodu porovnatelnosti/srovnání zařazeny i svěrky z jiných traťových úseků.

Měření bylo realizováno pomocí speciálního přípravku zapůjčeného Vosslohem a dále normovanou zkouškou dle [35]. Dosažené hodnoty svěrné síly byly konfrontovány s limitními hodnotami zjištěnými v kapitole 4.5 – velikost svěrné síly min. 8 kN se zohledněním tolerance $\pm 0,5$ kN, která je splněna při průměru drátu svěrky min. 12 mm a hmotností svěrky min. 470 g.

7.3.3.1 Měření přípravkem od Vosslohu

Měření svěrek ze žst. Kolín

První sada měření byla realizována 17.05.2019. Byly vybrány svěrky vyjmuté z přejezdu v žst. Kolín, které byly rozděleny do dvou skupin, a to na více poškozené a na méně poškozené. Fotodokumentace vzorků je patrná z Přílohy K. Svěrky byly v provozu přibližně 3 roky. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 7-3 a Tab. 7-4.

Tab. 7-3: Kolín - méně poškozené: změřené velikosti svěrných sil, průměry drátu a hmotnosti svěrek (nevyhovující označeny červeně)

	1	2	3	4	P	L	$(P+L)/2*0,88$	Hmotnost
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[g]
1	12,94	11,08	10,87	12,95	6	7,25	5,83	450
2	13	11,96	10,66	13	7,5	7,75	6,71	468
3	12,33	11,59	12,01	10,43	5,75	5,75	5,06	459
4	12,92	12,85	12,67	12,9	8,5	10	8,14	490
5	12,88	12,48	12,47	13	9	9,5	8,14	489
6	12,95	12,69	12,83	13	9,75	10,25	8,8	490
7	12,95	11,92	11,62	12,38	7,25	7,5	6,49	464
8	12,7	11,37	12,45	12,82	8	8	7,04	469
9	12,91	11,89	12,55	12,91	8	9	7,48	469
10	11,73	11,15	10,89	12,14	6,25	7,5	6,05	450

U méně poškozených svěrek pak byly změřeny hodnoty v rozmezí 5,06 kN až 8,8 kN, průměry drátu svěrek v měřených místech byly od 10,43 mm do 13 mm a hmotnosti od 450 do 490 g. Vyhověly svěrky označené 4 až 6.

Tab. 7-4: Kolín - více poškozené: změřené velikosti svěrných sil, průměry drátu a hmotnosti svěrek (nevyhovující označeny červeně)

	1	2	3	4	P	L	$(P+L)/2*0,88$	Hmotnost
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[g]
1	12,48	9,23	8,72	12,24	3	4	3,08	441
2	13	9,06	8,6	12,84	4,25	4	3,63	448
3	12,44	9,75	8,38	12,91	3,5	4	3,3	443
4	12,59	11,45	9,6	12,79	4	6,5	4,62	453
5	12,35	8,97	8,96	12,14	4	3,75	3,41	436
6	10,22	9,68	8,8	11,01	2	2	1,76	381
7	11,26	10,02	8,79	12,03	3,5	4,25	3,41	428
8	12,56	11,03	9,7	12,99	4,5	6	4,62	461
9	12,31	9,55	7,95	12,47	2	3,25	2,31	419
10	11,91	10,14	9,54	12,07	4,5	5,5	4,4	453
11	12,15	9,52	8,86	11,89	4	5,5	4,18	446

U více poškozených svěrek byly změřeny hodnoty svěrných sil od 1,76 kN do 4,62 kN, průměry drátů svěrek v měřených místech od 7,95 mm do 13 mm a hmotnosti od 381 do 461 g. Ani jedna svěrka nevyhověla.

Měření svěrek vyjmutých v Dobříně

Další sada měření byla realizována 28.05.2019. Měřeny byly svěrky vyjmuté z přejezdu u Dobříně. Tyto svěrky byly vybrány kvůli výraznému koroznímu úbytku materiálu svěrek - viz obrázky v Příloze K. Svěrky byly rozděleny do tří skupin dle vlivu korozního úbytku na průměry drátu. Svěrky byly v provozu přibližně 15 let. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 7-5 až Tab. 7-7.

Metodika hodnocení stavu pružných svěrek Skl14 v provozovaných tratích

Tab. 7-5: Dobříň - jedno rameno větší úbytek: změřené velikosti svěrných sil, průměry drátu a hmotnosti svěrek (nevyhovující označeny červeně)

	1	2	3	4	P	L	$(P+L)/2*0,88$	Hmotnost
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[g]
1	4,24	12,56	11,14	11,7	1,75	0,1	0,814	312
2	5,14	11,01	10,98	11,3	1,75	1,25	1,32	290
3	12,79	10,64	10,83	5,23	1	2	1,32	302
4	13	9,18	7,95	3,36	0,5	1	0,66	250
5	9,4	11,13	11,61	4,51	1,5	0,1	0,704	304
6	11,85	11,11	10,67	5,24	1,5	2	1,54	286
7	12,96	10,67	10,13	4,65	1,5	1,75	1,43	310
8	11,84	10,52	10,96	5,3	1	2,25	1,43	314

U svěrek, kde byl na jednom rameni větší úbytek, byly změřeny hodnoty svěrných sil od 0,66 kN do 1,54 kN, průměry drátů svěrek v měřených místech od 3,36 mm do 13 mm a hmotnosti od 250 do 314 g. Ani jedna svěrka nevyhověla.

Tab. 7-6: Dobříň – obě ramena velký úbytek: změřené velikosti svěrných sil, průměry drátu a hmotnosti svěrek (nevyhovující označeny červeně)

	1	2	3	4	P	L	$(P+L)/2*0,88$	Hmotnost
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[g]
1	4,55	11,32	9,7	4,01	0,1	0,1	0,088	187
2	3,39	10,81	10,83	5,02	0,1	0,1	0,088	207
3	6,24	11,25	10,25	5,73	0,25	0,25	0,22	224
4	5,58	10,34	10,87	5,35	0,1	0,1	0,088	208
5	5,32	10,98	10,96	4,53	0,1	0,1	0,088	222
6	5,82	11,15	11	4,78	0,1	0,1	0,088	229
7	5,7	11,53	9,91	5,21	0,1	0,1	0,088	227
8	4,94	10,52	11,05	6,5	0,5	0,25	0,33	255
9	7,6	9,64	11,12	8,41	1,5	1,5	1,32	251
10	7,53	11,59	10,9	7,46	1,75	1,75	1,54	275
11	8,45	10,16	10,65	8,09	1,25	1,25	1,1	240
12	9,28	11,1	11,35	7,2	1,5	2	1,54	299

U svěrek, kde byl na obou ramenech velký úbytek, byly změřeny hodnoty svěrných sil od 0,088 kN do 1,54 kN, průměry drátů svěrek v měřených místech od 3,39 mm do 11,59 mm a hmotnosti od 187 do 299 g. Ani jedna svěrka nevyhověla.

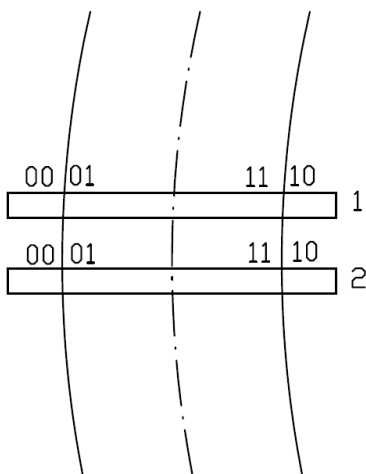
Tab. 7-7: Dobříň – více poškozené: změřené velikosti svěrných sil, průměry drátu a hmotnosti svěrek (nevyhovující označeny červeně)

	1	2	3	4	P	L	(P+L)/2*0,88	Hmotnost
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[g]
1	zdeformovaná, nešla vložit do čelistí							339
2	10,17	12,53	11,85	9,65	2,5	2	1,98	327
3	7,44	11,31	11,16	7,58	1,5	1,5	1,32	296
4	11,26	10,69	7,97	11,45	2,25	3,5	2,53	394
5	12,82	12,79	11,97	12,84	8	8,25	7,15	459
6	12,98	12,88	12,88	12,99	9,25	10	8,47	470
7	12,84	12,88	12,91	12,84	8	9,25	7,59	470
8	12,99	12,63	12,55	13	9,5	9,75	8,47	472
9	12,95	11,69	11,86	12,92	7	7,75	6,49	462
10	13	12,8	12,98	13	8,5	9	7,7	478
11	12,77	12,58	12,79	10,53	8	9	7,48	433

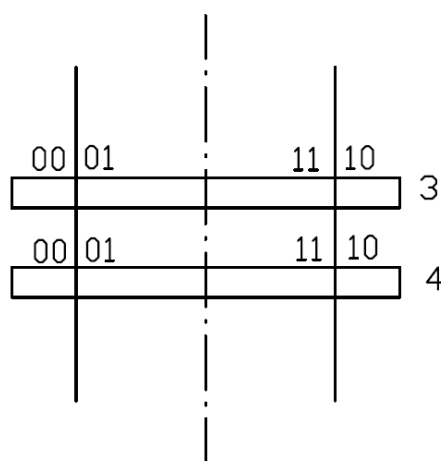
U svěrek Dobříň – více poškozené byly změřeny hodnoty svěrných sil od 1,32 kN do 8,47 kN, průměry drátů svěrek v měřených místech od 7,44 mm do 13 mm a hmotnosti od 296 do 478 g. Vyhověly svěrky označené 6 až 8 a 10.

Měření svěrek vyjmutých z Poříčan a TÚ Český Brod - Poříčany

Poslední měřenou skupinou byly vzorky vyjmuté z Poříčan a TÚ Český Brod - Poříčany. Měření bylo realizováno 28.05.2019. Odebrané vzorky jsou ze 4 pražců. Svěrky jsou z Poříčan (pražec 1 a 2, oblouk ve stanici R = 810 m s převýšením 100 mm, rychlost v daném úseku je 120/130 km/h) a dále z úseku Český Brod – Poříčany (pražec 3 a 4, přímá kolej s rychlostí 130 km/h). Umístění svěrek v koleji je patrné z Obr. 7-30 a Obr. 7-31.



Obr. 7-30: Umístění svěrek v koleji – oblouk



Obr. 7-31: Umístění svěrek v koleji - přímá

Vzhled svěrek a jejich popis je zobrazen v Příloze K. Svěrky byly v provozu přibližně 15 let. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 7-8 a Tab. 7-9.

Tab. 7-8: Poříčany: změřené velikosti svěrných sil a průměry drátu svěrek (nevyhovující označeny červeně)

	1	2	3	4	P	L	(P+L)/2*0,88	Hmotnost
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[g]
001	12,98	12,85	12,92	12,94	9,75	9	8,25	489
002	12,95	12,81	12,79	12,97	9,75	10,75	9,02	488
011	12,93	12,78	12,82	12,98	10	10,75	9,13	487
012	12,97	12,83	12,98	12,99	10,5	10	9,02	490
111	12,96	12,92	12,89	12,96	9	9,25	8,03	482
112	12,96	12,95	13	12,97	7,5	8,5	7,04	485
101	12,97	12,76	12,76	12,67	8,25	8	7,15	478
102	12,98	12,9	12,84	12,96	10,25	10	8,91	482

U svěrek z Poříčan byly změřeny hodnoty svěrných sil od 7,04 kN do 9,13 kN, průměry drátů svěrek v měřených místech od 12,67 mm do 13 mm a hmotnosti od 478 do 490 g. Nevyhověly svěrky označené 112 a 101.

Ze vzorků z Poříčan je patrné, že nejvyšší hodnoty byly změřeny na vnějším kolejnicovém pásu, tedy na převýšené kolejnici. Ve výsledcích se neprojevovalo, zda je svěrka umístěna na vnější straně nebo vnitřní straně kolejnicového pásu. Z výsledků je patrné, že u svěrek, které nevyhověly, metodika nefungovala, vliv na svěrnou sílu v tomto případě neměl dominantně korozní úbytek materiálu pružných svěrek, ale vliv opakovaného zatížení, svěrky byly vyjmuty z velmi zatížené trati železničním provozem, kde byly namáhány po dobu 15ti let. Pokud tento případ nastane, je třeba svěrky posoudit z hlediska únavového poškození a stanovit zbytkovou životnost (kap. 7.4.4).

Tab. 7-9: Český Brod - Poříčany: změřené velikosti svěrných sil a průměry drátu svěrek (nevyhovující označeny červeně)

	1	2	3	4	P	L	(P+L)/2*0,88	Hmotnost
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[g]
003	12,99	12,8	12,97	12,98	6,5	8,75	6,71	485
004	12,97	12,95	12,95	12,94	9	9	7,92	486
013	12,96	12,84	12,87	12,99	7,5	9	7,26	489
014	12,98	12,86	12,9	12,98	7,5	8	6,82	490
113	12,95	12,79	12,84	12,97	8	8,5	7,26	489
114	12,99	12,98	12,93	12,93	7,5	7,75	6,71	488
103	12,93	12,9	12,92	12,95	8,25	9	7,59	486
104	12,94	13	12,95	12,99	8,75	8,75	7,7	489

U svěrek z úseku Český Brod - Poříčany byly změřeny hodnoty svěrných sil od 6,71 kN do 7,92 kN, průměry drátů svěrek v měřených místech od 12,79 mm do 13 mm a hmotnosti od 485 do 490 g. Vyhovely pouze svěrky označené 004, 103 a 104. Z výsledků lze vyvodit stejný závěr jako u předchozí skupiny vzorků, vliv na svěrnou sílu neměl dominantně korozní úbytek materiálu pružných svěrek, ale vliv opakovaného zatížení, svěrky byly vyjmuty z velmi zatížené trati železničním provozem, kde byly namáhány po dobu 15ti let.

Shrnutí výsledků měření přípravkem Vosslohu

Změřené hodnoty svěrných sil a odpovídající měření průměrů drátu potvrdila, že pokud je průměr drátu v jakémkoli měřeném místě 1 až 4 menší než 12 mm a hmotnost svěrky je menší než 470 g, pak je hodnota svěrné síly menší než 8 kN s tolerancí $\pm 0,5$ kN. Tato hodnota svěrné síly svěrky je již nevyhovující, svěrka by tedy měla být vyměněna. Zvláštní kategorií jsou svěrky, které jsou dlouho vloženy ve velmi zatížených tratích, u kterých mohou být hodnoty svěrné síly nižší než požadavky stanovené v [4] i přes to, že korozní úbytky jsou minimální (cca 0,4 mm).

Z pohledu vlivu korozního úbytku na velikost svěrné síly lze vyvodit následující doporučení:

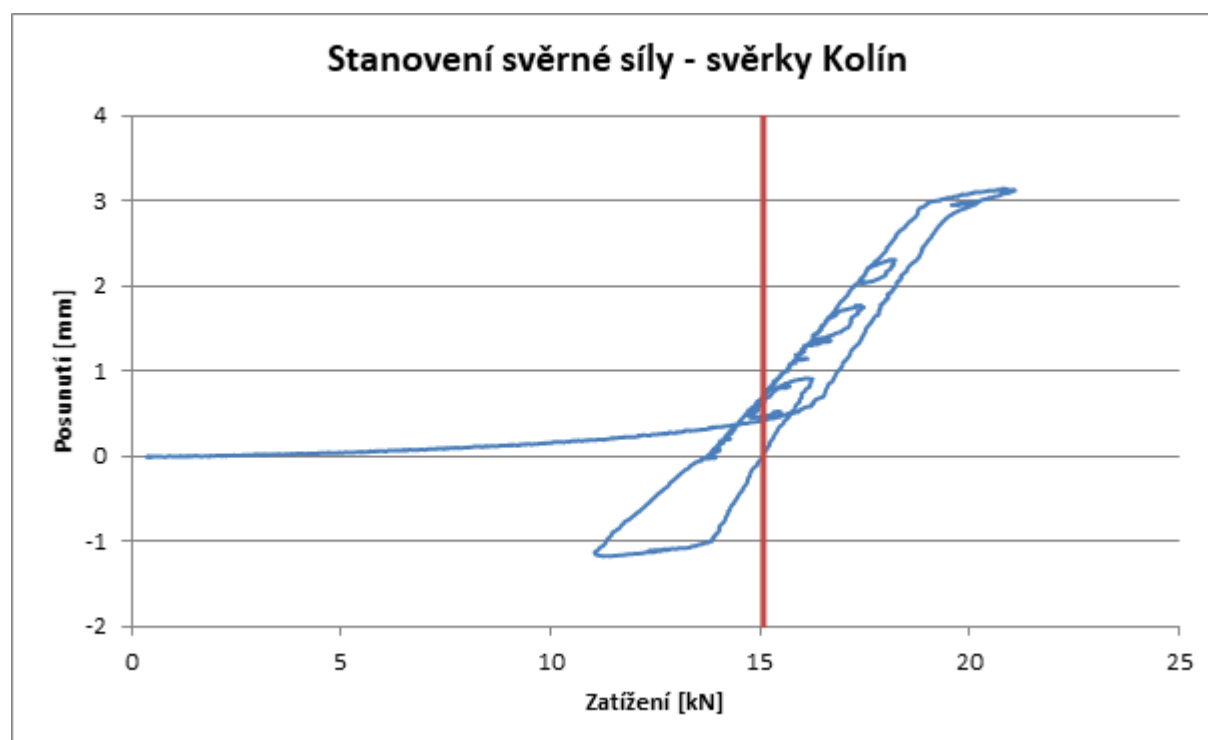
- Provádět pravidelné prohlídky železničního svršku, při kterých bude realizována i vizuální kontrola svěrek s ohledem na korozní úbytek materiálu. V případě zjištění tloušťky drátu menší než 12 mm a hmotnosti menší než 470 g je třeba zajistit výměnu svěrek. Pokud byly použity svěrky bez antikorozi povrchové úpravy, případně s již neperspektivní, případně nepoužívanou (např. KTL), vložit svěrky s aktuální nejlepší možnou antikorozi úpravou.
- Kontrolovat jakékoli negativní projevy na záznamech měření GPK, pokud se projevují vyšší hodnoty především v rozchodu koleje, je třeba analyzovat daný úsek stejně jako ve výše popsaném případě. Ne všechna místa jsou přístupná vizuální kontrole, např. přejezdy, je třeba se tedy vypořádat i s těmito úseky tratí, což umožní právě výstupy z měření GPK.

Fotodokumentace dokumentující stav svěrek, je uvedena v Příloze K.

7.3.3.2 Měření svěrné síly dle normy ČSN EN 13146-7

U svěrek Kolín – méně poškozené č. 4 a 5 byly měřeny také normovým postupem a byly zjištěny přípravkem Vosslohu hodnoty celkové svěrné síly na upevnění shodně 16,28 kN. Při měření dle [35] byla zjištěna hodnota svěrné síly 15,08 kN – viz Obr. 7-32. Rozdíl mezi výsledky zjištěnými přípravkem a výsledky normové zkoušky činí 1,2 kN, což je cca 8 %. Rozdíl je možné vysvětlit odlišným přístupem měření, tedy měření celého uzlu v porovnání s měřením pouze jedné svěrky. Dále je třeba vzít v úvahu také to, že měření přípravkem Vosslohu nevykazuje tak přesné hodnoty měření, výsledky byly odečítány po 0,25 kN.

Přestože měření přípravkem Vossloh vykazuje mírně vyšší hodnoty na upevnění, domnívám se, že je vhodnější než postup dle [35]. Důvodem je negativní vliv „průměrování“ u postupu dle [35], kdy se dvě různě korozí napadené svěrky průměrují na jeden uzel a vypovídající schopnost se tak snižuje.



Obr. 7-32: Stanovení svěrné síly dle [35] – Kolín – méně poškozené

7.4 Hodnocení odezvy na dynamické zatížení

Vlastní hodnocení odezvy na dynamické zatížení by dle metodiky mělo odpovídat příznakům, např. porucha GPK může značit v kontextu se svěrnou silou vysoké příčné a svislé posuny, které jsou vyvolány vysokou svislou kolovou a příčnou vodící silou na pružných svěrkách. Je zřejmé, že různá hodnotící kritéria spolu souvisí. Vždy je třeba rozhodnout v kontextu s možnostmi daného měření, jaké kritérium bude hodnoceno.

Zatížení provozem v průběhu měření

Přehled železničních vozidel, která byla změřena, je uveden v Příloze E. Jedná se o vozidla osobní, nákladní, a to s loženými i prázdnými vozy i vozidla speciální. U každého vozidla je uvedena rychlost, která byla spočítána, směr, kterým vozidlo jelo a uspořádání vlaku. Vozidla jsou uspořádána ve třech tabulkách dle data měření. Měření byla realizována v říjnu 2016, červnu 2017 (měření napětí na svěrkách, měření Y a Q) a dále v říjnu 2018, kdy byly měřeny příčné a svislé posuny kolejnice vůči pražci a zrychlení měřené na patě kolejnice. Při průjezdech byla změřena vozidla řad 122, 123, 854, 162, 471, 130, 163, 730, 740, 386, pušl, podbíječka + vozy. Rychlost jednotlivých vlaků byla zjištěna výpočtem ze známé hodnoty rozvoru vozidel a rozdílu časů mezi průjezdem náprav měřeným úsekem (odečteno z měřící ústředny) a pohybovala se od 27 do 52 km/h.

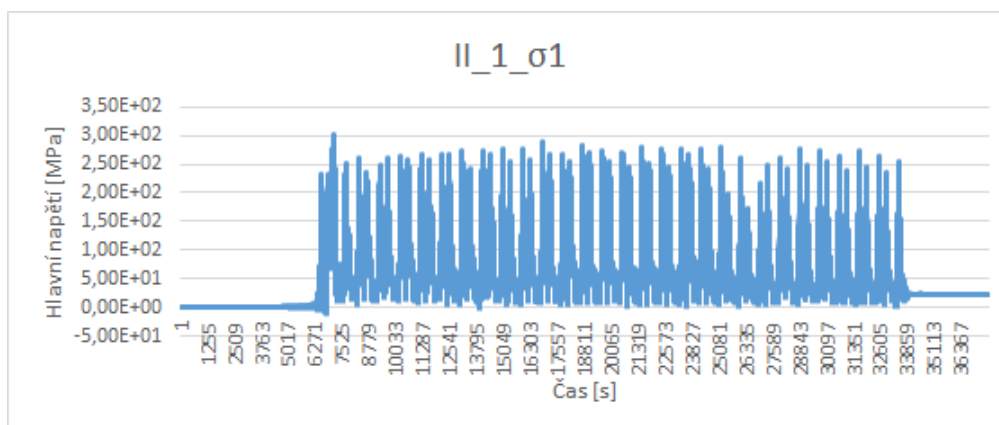
7.4.1 Identifikace povrchového napětí na svěrce od provozu

V návaznosti na předchozí krok hodnocení statických veličin, zejména pak stanovení ekvivalentního napětí na svěrce, je měření odezvy na provozní zatížení prvním logickým krokem k pozdějšímu stanovení únavové životnosti svěrky v daném úseku.

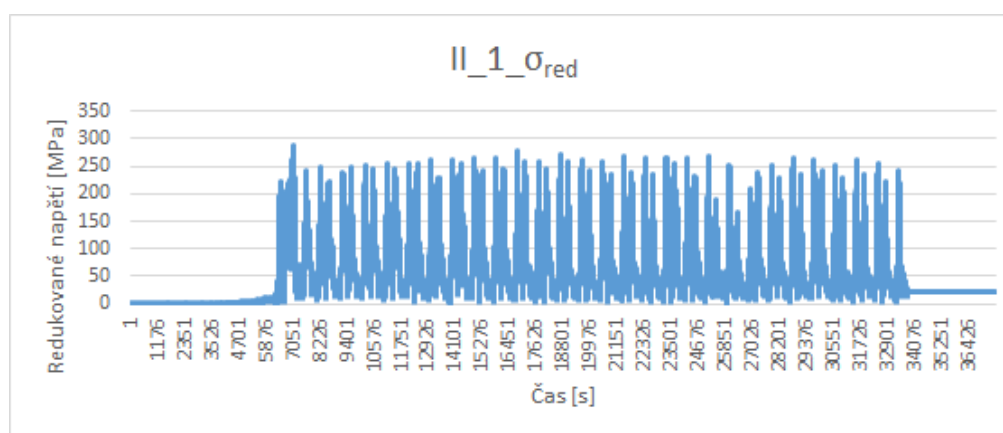
7.4.1.1 Realizace měření

K měření dynamické odezvy od provozu (průjezd železničních vozidel) byly použity měřící svěrky dle kap. 7.3.2. Jako nulový stav je brána upnutá svěrka předepsaným utahovacím momentem.

Hodnoty změřených napětí na jednotlivých tenzometrech ružice byly dále upraveny dle postupů definovaných v kap. 6.1.4 na hlavní napětí a následně redukována napětí. Finální záznam napětí je ve tvaru ekvivalentního napětí (HMH/Von Mises). Výsledné hodnoty napětí jsou uvedeny v příloze K. Náhled přináší Obr. 7-33 a Obr. 7-34.



Obr. 7-33: Záznam hlavního napětí při průjezdu vozidla



Obr. 7-34: Záznam redukovaného napětí při průjezdu vozidla

Celkem bylo změřeno 23 záznamů při 2 měřeních (10/2016 a 06/2017). Kompletní záznamy jsou zobrazeny v Příloze F. Před každým průjezdem byl měřící řetězec nulován.

Přestože stanovení ekvivalentního napětí od provozu je nezbytným podkladem pro hodnocení únavové životnosti svěrek, lze záznamy hodnotit i statisticky, což má rovněž důležitou vypovídající hodnotu o zatížení svěrek.

Záznamy byly uspořádány do skupin dle vozidel. Hodnocení hlavních napětí je patrné z Obr. 7-35 až Obr. 7-42. Statistické hodnocení ekvivalentních napětí jsou zobrazeny na Obr. 7-43 a Tab. 7-10.

Zjištění lze shrnout následovně:

- Nejvyšších maximálních hodnot hlavních napětí je dosaženo na svěřce II_1_σ1 (vnější rameno), a to 302,8 MPa, (záznam 12_46_122027_28 vozu).
- Nejmenších hodnot hlavních napětí pak bylo dosaženo u I_1_σ2 (vnější rameno), a to -204,94 MPa (záznam 14_43_471060_směr KO_2017). Ale σ_2 i u ostatních tenzometrů dosahují poměrně nízkých hodnot (minima -127 MPa až -157 MPa).
- Vyšších hodnot ekvivalentních napětí bylo dosahováno na vnějších ramenech pružných svěrek. Maximální zjištěná hodnota činí 288,43 MPa (záznam 12_46_122027_28 vozu). Ve

střední části svěrek byla zjištěna maximální hodnota ekvivalentního napětí 159,92 MPa (záznam 16_00_730_730_podbíječka_pušíl_podbíječka).

- Největší hodnoty byly zjištěny na tenzometru umístěném na vnějším rameni pružné svěrky, což ukazuje na namáhání způsobené kombinací svislého a příčného pohybu vnějších ramen pružných svěrek.
- Jako výchozí stav byly pro měření napětí od projíždějících vozidel brány utažené svěrky. Je tedy třeba ještě zohlednit napětí způsobené utažením svěrek předepsaným momentem.
- Z porovnání je zřejmé, že hodnoty napětí nejsou závislé pouze na rychlosti projíždějících vozidel, ale také na typu vozidla a jeho zatížení.
- Byl zjištěn pokles maximálních hodnot ekvivalentních napětí při porovnání měření 10/2016 a 06/2017. Důvodem této změny je zřejmě broušení kolejnic, které bylo provedeno v květnu 2017.
- Obdobné hodnoty ekvivalentních napětí byly zjištěny jak na svěrce na nepřevýšeném kolejnicovém pásu, tak svěrka na převýšeném kolejnicovém pásu, což bude způsobeno různou rychlostí projíždějících vozidel (přebytky / nedostatky převýšení).
- Porovnáním hodnot napětí zjištěných u vozidel řady 471 (obdobné rychlosti, stejný směr jízdy) lze vyvodit závěr, že pokud byl hnací vůz řazen vzadu (záznam 15_30_971043_vuz_471043 a 16_31_971_471), byla zjištěná napětí na svěrkách vyšší než při uspořádání s hnacím vozem vpředu. Nejvyšší hodnoty byly zjištěny na přední nápravě hnacího vozidla – viz grafy v Příloze F.
- U řady vozidel 854 není patrné, že by umístění hnacího vozidla ve vlaku mělo vliv na výsledky napětí.

Legenda ke grafům:

Označení:

I – svěrka na převýšeném kolejnicovém pasu

II – svěrka na nepřevýšeném kolejnicovém pasu

1 – umístění tenzometru na vnějším rameni

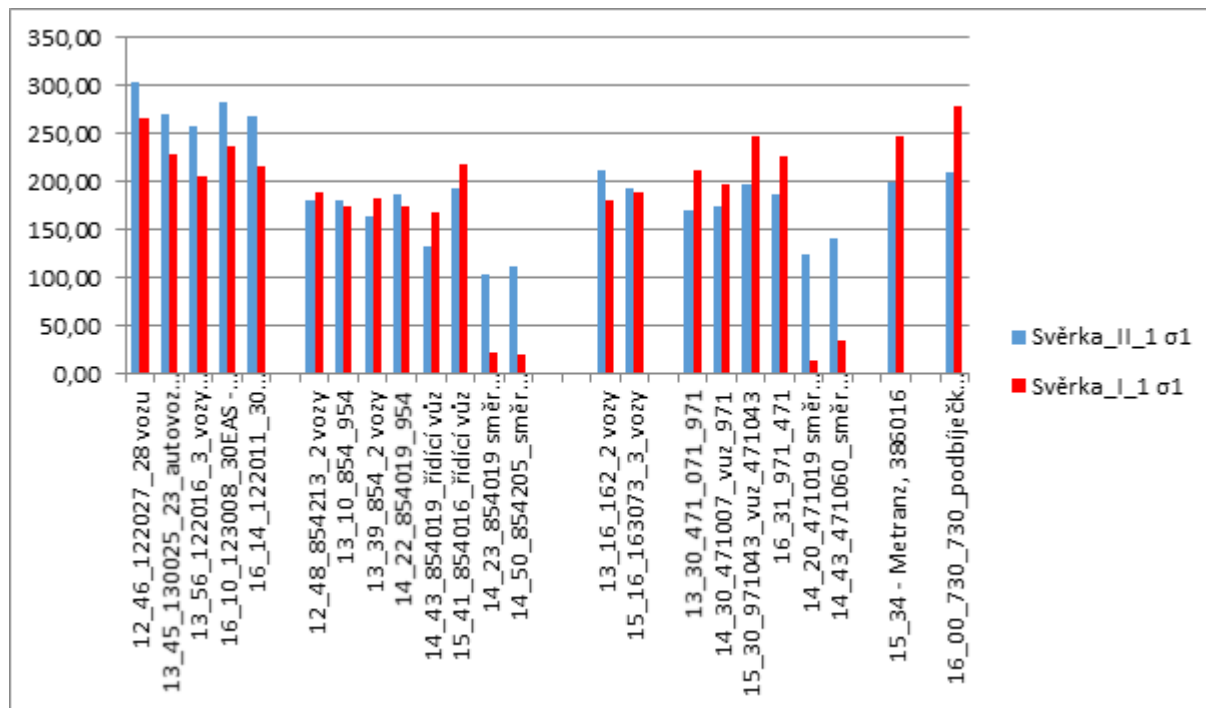
2 – umístění tenzometru ve střední části svěrky

Popis os:

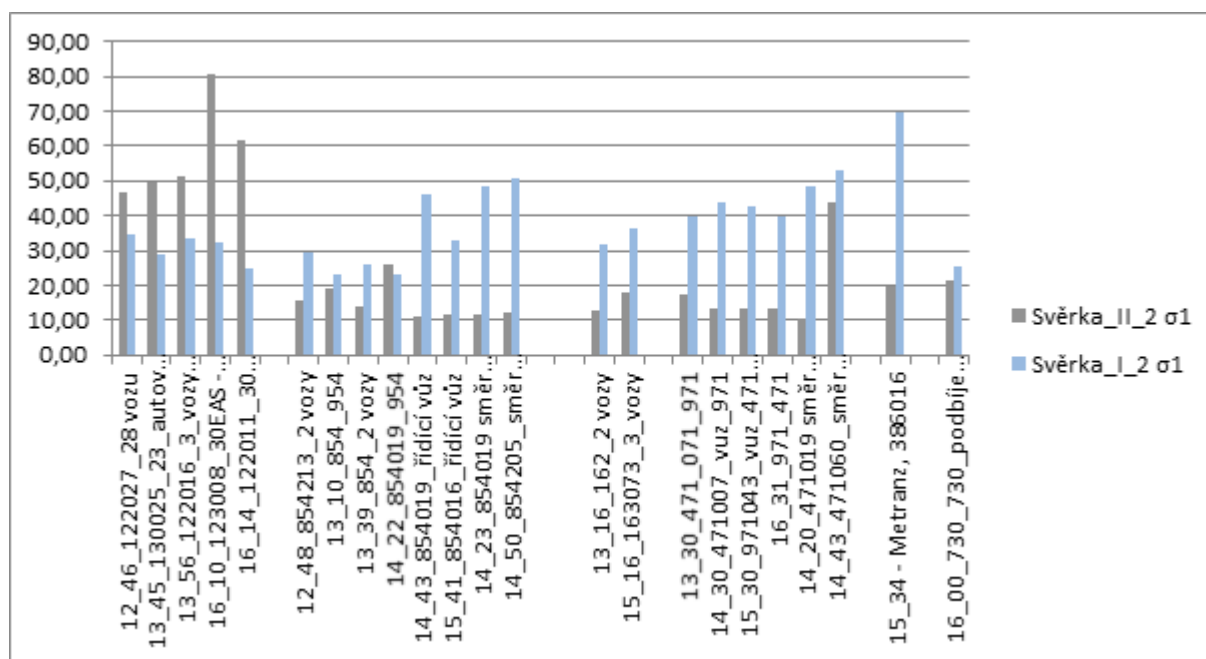
Osa x – vozidlo

Osa y – hlavní napětí [MPa]

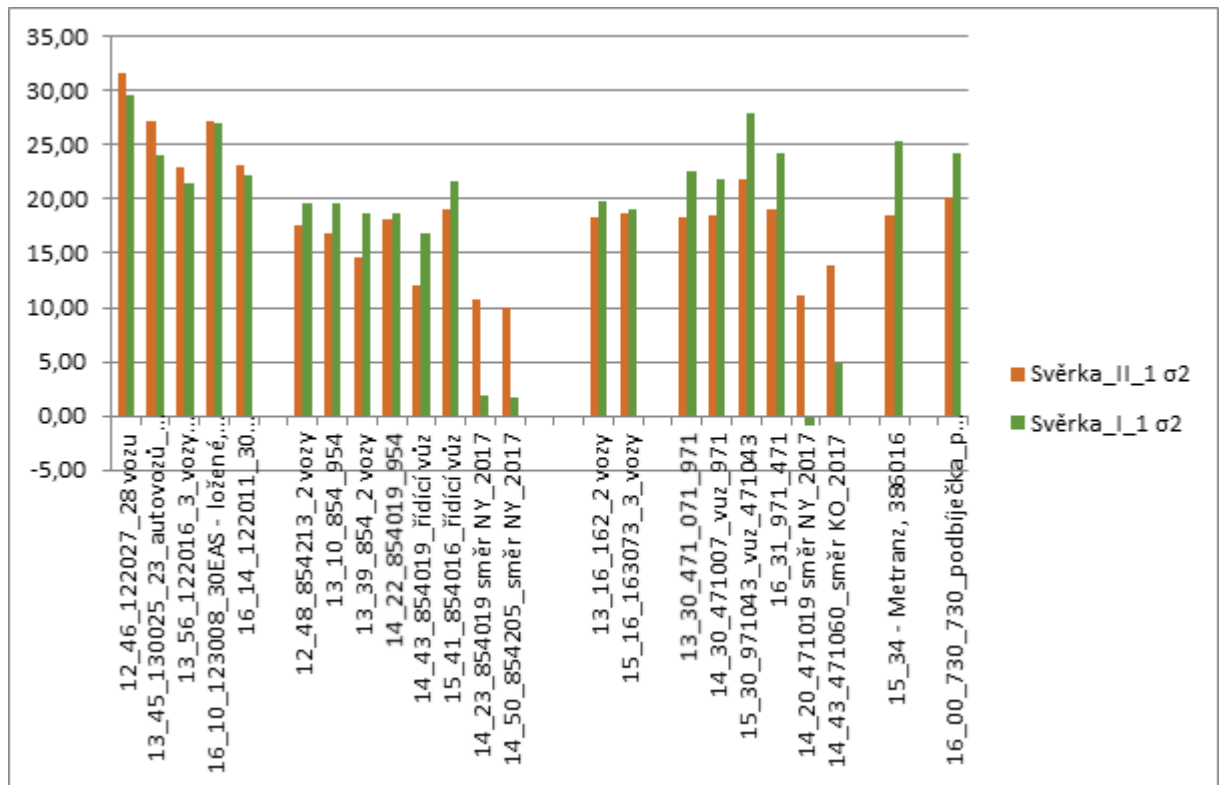
Zjištěné maximální hodnoty hlavních napětí



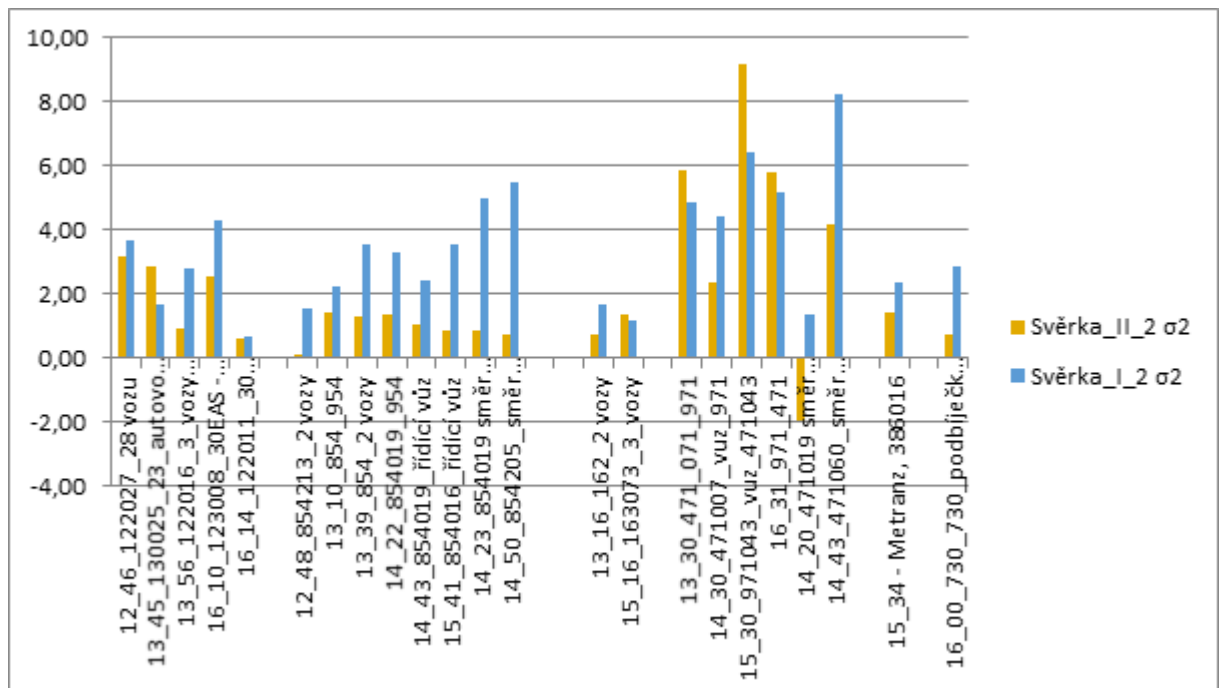
Obr. 7-35: Zjištěné maximální hodnoty σ_1 na vnějších ramenech svěrek



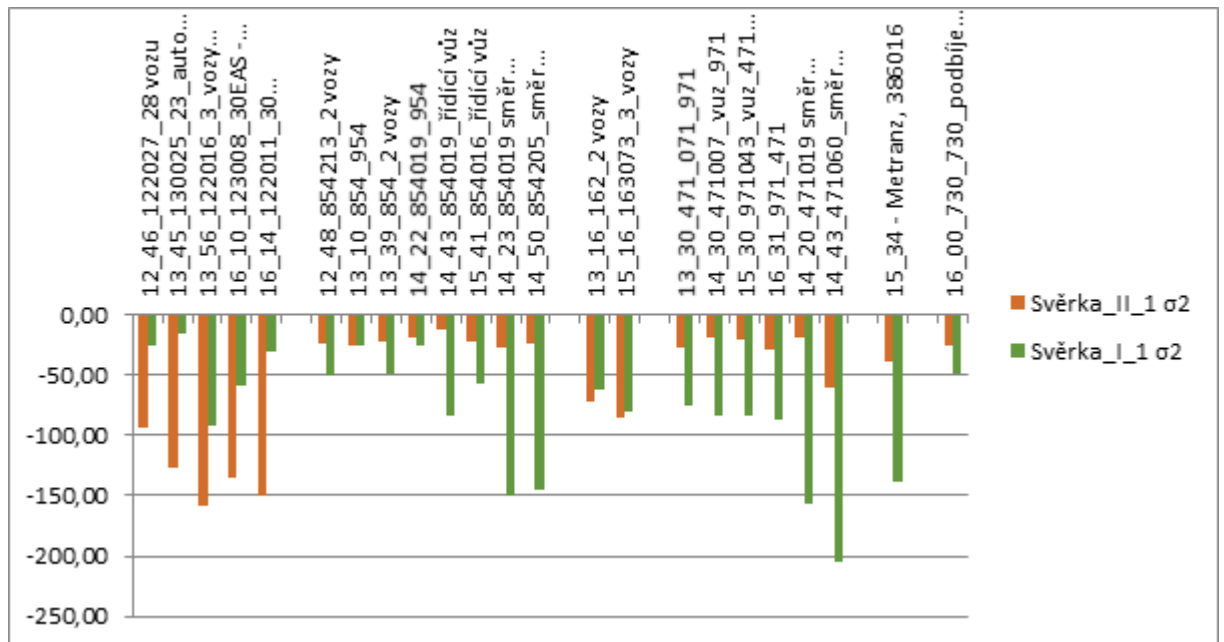
Obr. 7-36: Zjištěné maximální hodnoty σ_1 ve střední části svěrek



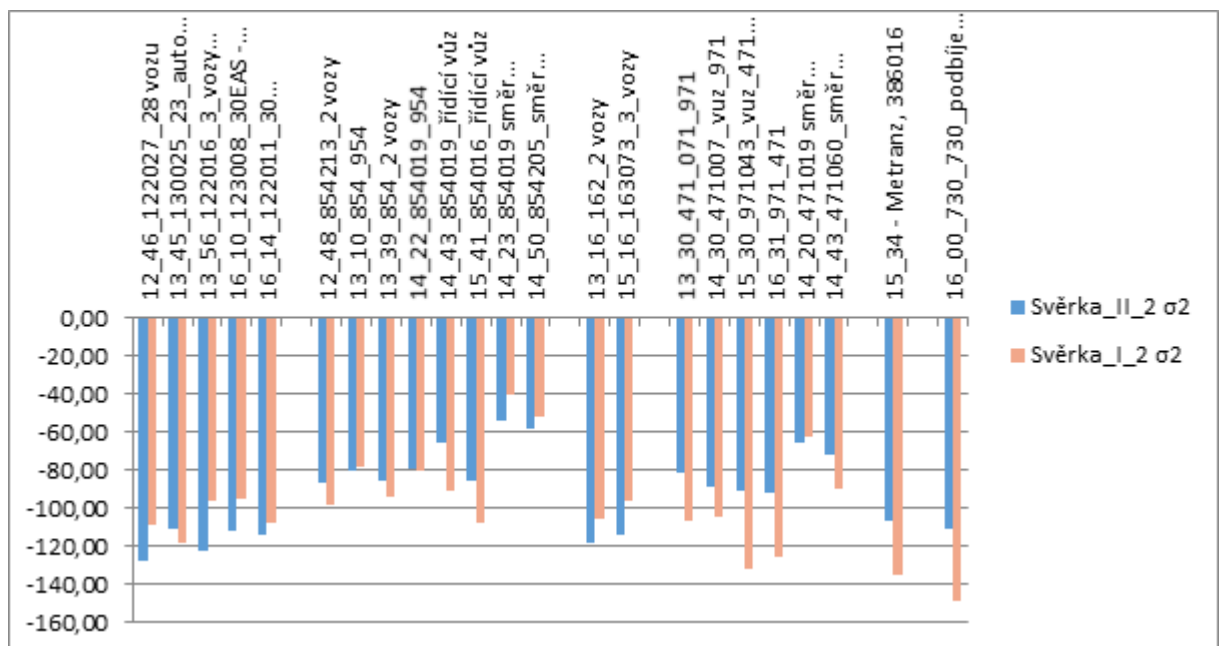
Obr. 7-37: Zjištěné maximální hodnoty σ_2 na vnějších ramenech svěrek



Obr. 7-38: Zjištěné maximální hodnoty σ_2 ve střední části svěrek



Obr. 7-41: Zjištěné minimální hodnoty σ_2 na vnějších ramenech svěrek



Obr. 7-42: Zjištěné minimální hodnoty σ_2 ve střední části svěrek

Zjištěné maximální hodnoty redukováných napětí

Legenda ke grafům:

Označení:

I – svěrka na převýšeném kolejnicovém pasu

II – svěrka na nepřevýšeném kolejnicovém pasu

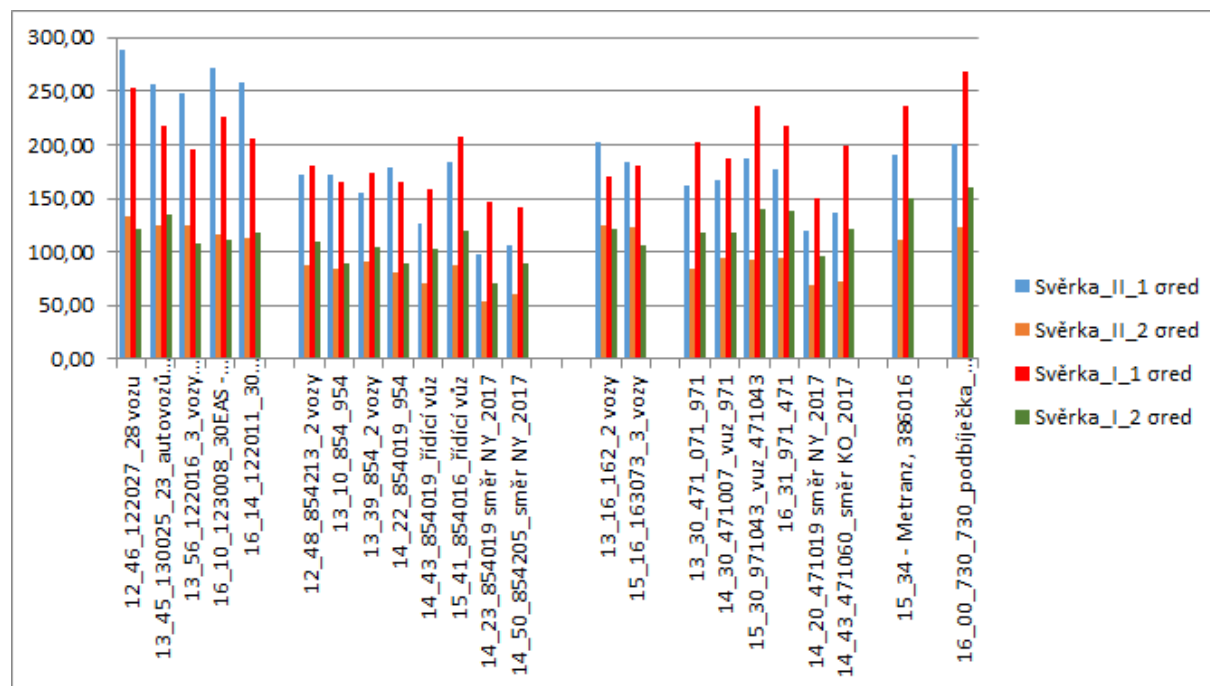
1 – umístění tenzometru na vnějším rameni

2 – umístění tenzometru ve střední části svěrky

Popis os:

Osa x – vozidlo

Osa y – redukované napětí [MPa]



Obr. 7-43: Zjištěné maximální hodnoty redukovaných napětí

Tab. 7-10: Zjištěné hodnoty redukovaných napětí

	Svěrka_II_1	Svěrka_II_2	Svěrka_I_1	Svěrka_I_2
	σ_{red}	σ_{red}	σ_{red}	σ_{red}
12_46_122027_28 vozu	288,43	132,49	252,45	121,36
13_45_130025_23 autovozů prázdné	257,21	124,30	217,53	135,55
13_56_122016_3 vozy Lex_1_sypák_18_vozy_EAS-U	247,66	124,11	195,12	107,51
16_10_123008_30EAS - ložené, uhlí	270,96	116,85	225,42	112,10
16_14_122011_30 vozůEAS_prázdné	257,63	112,55	206,67	118,67
12_48_854213_2 vozy	172,77	88,48	180,61	109,64
13_10_854_954	172,06	83,98	165,79	89,40
13_39_854_2 vozy	156,03	90,87	173,88	105,17
14_22_854019_954	179,34	81,10	165,82	89,96
14_43_854019_řídící vůz	126,48	70,04	159,18	102,04
15_41_854016_řídící vůz	184,39	88,22	207,69	119,44
14_23_854019 směr NY_2017	97,88	54,27	146,92	70,49

14_50_854205_směr NY_2017	106,13	60,27	142,07	88,75
13_16_162_2 vozy	202,35	124,40	170,70	120,64
15_16_163073_3_vozy	183,84	122,66	180,31	105,90
13_30_471_071_971	161,41	84,39	201,79	118,54
14_30_471007_vuz_971	166,49	94,32	187,64	117,43
15_30_971043_vuz_471043	186,91	92,28	235,77	140,01
16_31_971_471	177,97	94,39	216,85	139,06
14_20_471019 směr NY_2017	119,50	68,72	150,57	95,60
14_43_471060_směr KO_2017	136,64	73,21	198,41	120,63
15_34 - Metranz, 386016	191,07	110,73	236,38	150,02
16_00_730_730_podbíječka_pušl_podbíječka	200,90	122,34	267,77	159,92
Průměr	184,52	96,30	195,01	114,69
Medián	179,34	92,28	195,12	117,43
Max	288,43	132,49	267,77	159,92

7.4.2 Identifikace svislých kolových a příčných vodících sil

V návaznosti na metodiku hodnocení (kap. 6.1.4) by měření svislých kolových a příčných vodících sil mohlo směřovat ke stanovení napětí ve svěrkách (na základě vnesení těchto sil do modelu upevnění MKP a zjištění následné odezvy). Tento způsob by však byl značně komplikovaný ve srovnání s přímým měřením dle 7.4.2. Vlastní měření svislých a příčných sil bylo pro naše účely doplňujícím měřením určeným pro získání představy působení jednotlivých souprav v daném měřeném úseku trati.

7.4.2.1 Realizace měření

V souladu s popisem metodiky měření kap. 6.1.4 bylo na stojinu kolejnice nalepeno 6 tenzometrů. Jedna dvojice tenzometrů byla umístěna v místě neutrální osy kolejnice dle [53]. Pomocí těchto tenzometrů byla měřena svislá síla Q. Další dvě dvojice tenzometrů byly umístěny ve stejných vzdálenostech nad a pod neutrální osu – viz Obr. 7-44. Pomocí těchto tenzometrů je měřena vodící síla Y.



Obr. 7-44: Šablona pro umístění tenzometrů pro měření Y a Q

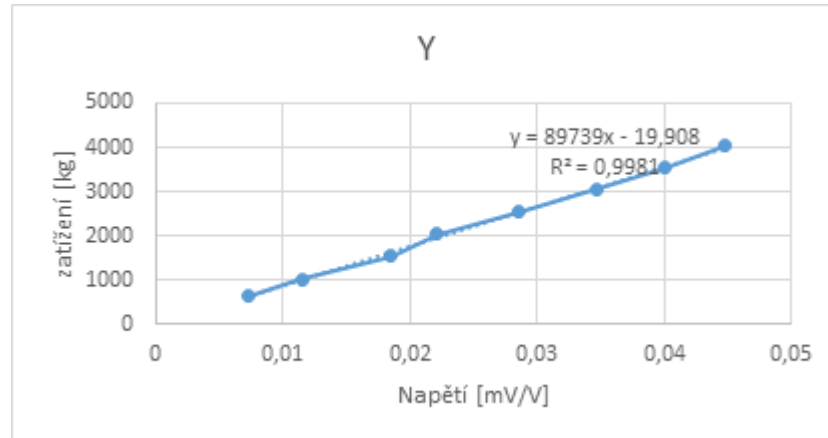
K šesti měřicím tenzometrům bylo třeba vzhledem k zapojení do Wheatstoneova můstku přidat dalších 6 kompenzačních tenzometrů. Celkem bylo tedy pro měření použito 12 tenzometrů. Použity byly tenzometry 1-LY11-1,5/120 s jmenovitým odporem 120. Zapojení bylo do celého Wheatstoneova můstku – viz Obr. 7-45.



Obr. 7-45: Umístění tenzometrů na stojině kolejnice

Měření vodící síly Y

Hodnoty byly zaznamenávány do měřicí ústředny v mV/V a záznamy bylo nutné následně převést na kN. Pro kalibraci byla použita hydraulická rozpěrnou tyč. Tyč se umístila mezi kolejnice a vyvozovala zatížení v kg. Zároveň byla odečítat hodnota v mV/V z měřicí ústředny. Výsledkem byla závislost mezi kg a mV/V, která byla následně použita pro výpočet Y v kN – viz Obr. 7-46 a Tab. 7-11.

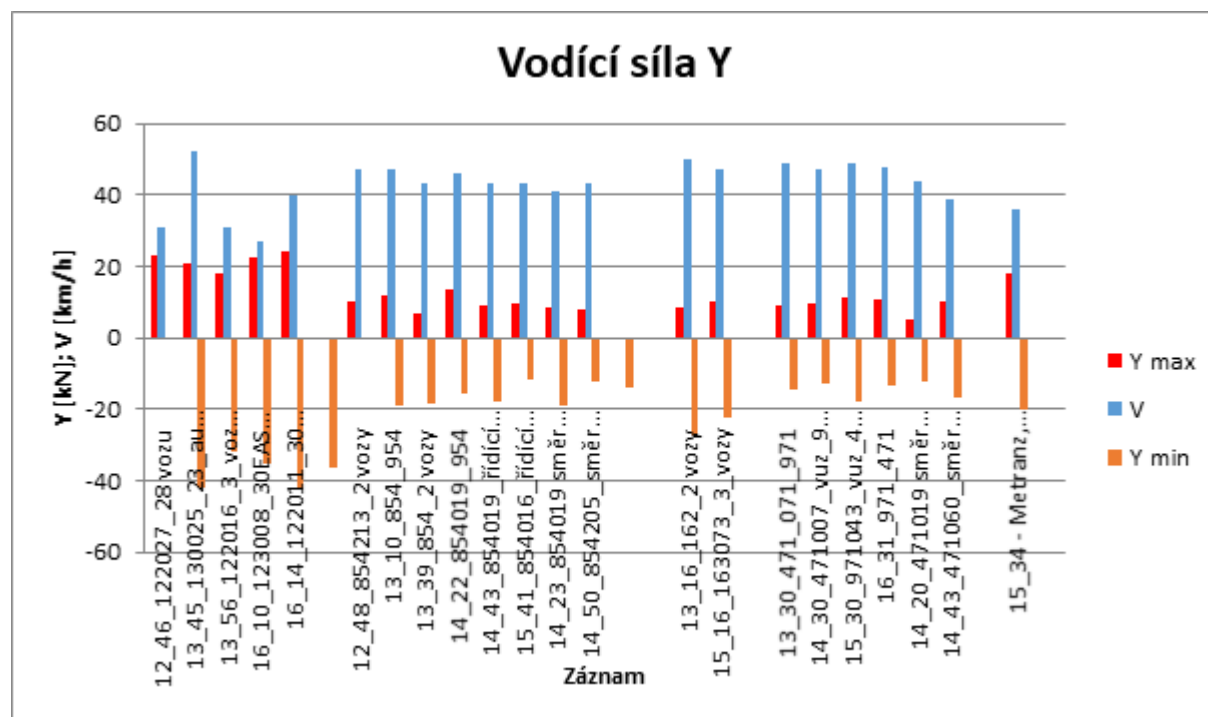


Obr. 7-46: Y - Převod kg na mV/V

Tab. 7-11: Y - Převod kg na mV/V

kg	mV/V
640	-0,00726
1030	-0,0115
1550	-0,0185
2050	-0,0221
2530	-0,0285
3070	-0,0347
3540	-0,04
4030	-0,0447

Po provedeném nastavení měřícího řetězce byla realizována měření při různém provozním zatížení. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny na Obr. 7-47v Tab. 7-12. Ze zobrazených hodnot je patrné, že závislost na rychlosti pojezdu vlakových souprav je nízké.



Obr. 7-47: Výsledné minimální a maximální hodnoty Y s příslušnými rychlostmi

Tab. 7-12: Zjištěné hodnoty vodící síly Y

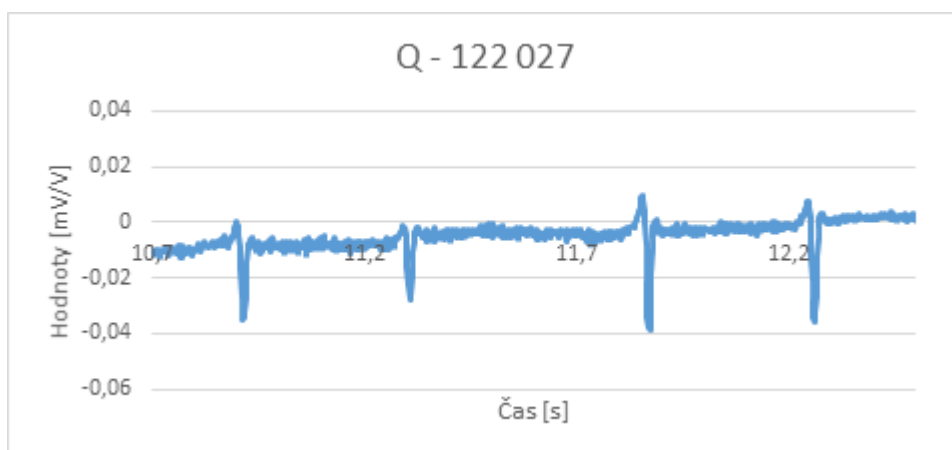
Záznam	Rychlost	Y max	Y min
	km/h	kN	kN
12_46_122027_28 vozu	31	23,11609	-41,985
13_45_130025_23 autovozů prázdné	52	20,59832	-32,0196
13_56_122016_3 vozy Lex_1 sypák_18 vozy_EAS-U	31	17,79884	-35,0215
16_10_123008_30EAS - ložené, uhlí	27	22,24456	-42,3724
16_14_122011_30 vozůEAS prázdné	40	24,18131	-36,4653
12_48_854213_2 vozy	47	10,1575	-18,8673
13_10_854_954	47	11,99741	-18,5768
13_39_854_2 vozy	43	7,058701	-15,3812
14_22_854019_954	46	13,25629	-18,0838
14_43_854019_řídící vůz	43	9,189123	-11,807
15_41_854016_řídící vůz	43	9,382797	-18,9641
14_23_854019 směr NY_2017	41	8,220749	-12,5201
14_50_854205 směr NY_2017	43	7,930237	-13,7525
13_16_162_2 vozy	50	8,608098	-27,3802
15_16_163073_3 vozy	47	10,1575	-22,3446
13_30_471_071_971	49	9,083482	-14,2279
14_30_471007_vuz_971	47	9,382797	-12,5729
15_30_971043_vuz_471043	49	11,02903	-17,6084
16_31_971_471	48	10,54485	-13,3564
14_20_471019 směr NY_2017	44	4,928279	-12,2559
14_43_471060 směr KO_2017	39	10,19271	-16,9217

Záznam	Rychlost	Y max	Y min
	km/h	kN	kN
15_34 - Metranz, 386016	36	17,99252	-20,3199
16_00_730_730_podbíječka_pušl_podbíječka	50	11,61006	-24,8624
Průměr		12,55049	-21,6377
Medián		10,19271	-18,5768
Max		24,18131	-42,3724

Po přepočtu zatížení na působící sílu byly hodnoty Y zjištěny v rozmezí -42 kN až 24 kN. Tyto hodnoty jsou v souladu s [27]. Stejně jako u hodnocení napětí je patrné, že u řady vozidel 471 mělo na výsledek vliv také umístění hnacího vozidla. Když bylo hnací vozidlo umístěno vzadu, bylo dosahováno vyšších hodnot zatížení na svěrku.

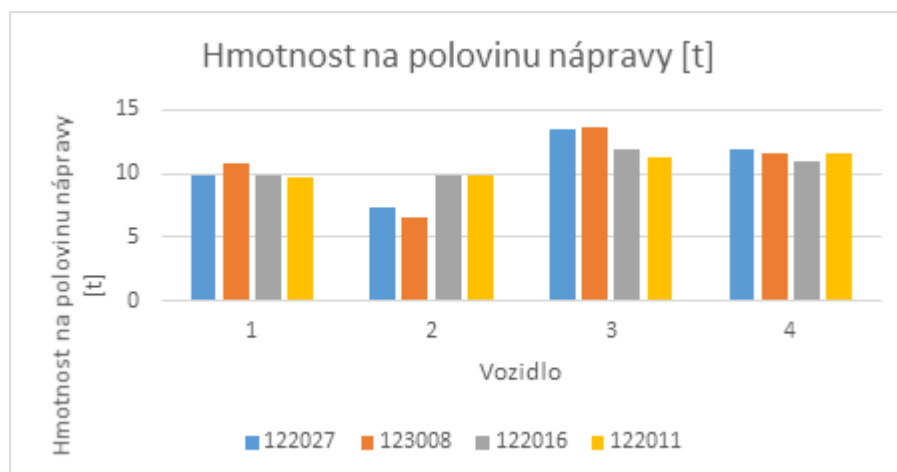
Měření svislé síly Q

Vzhledem k faktu, že v rámci měření nebylo možné přesně identifikovat zatěžovací charakteristiku síly Q (podobně jako v případě vodící síly Y) prostřednictvím tárované zátěže, byla svislá síla hodnocena na základě záznamů odezvy na zatížení jednotlivých vlakových souprav a jejich vyhodnocení pomocí rozkmitů – viz Obr. 7-48.



Obr. 7-48: Příklad záznamu projíždějícího vozidla

Při měření byla změřena vozidla totožných řad (např. 122 a 123, 162 a 163, 730). Především řadu 122, resp. 123 bylo možné s výhodou využít, byly změřeny 4 průjezdy vozidel těchto řad. Záznamy jsou uvedeny v Příloze G. Tato vozidla mají obdobné hmotnosti na nápravu definované katalogovými listy vozidel. Proto byly vyhodnoceny rozkmity [mV/V] pod jednotlivými nápravami hnacích vozidel, výsledky byly porovnány a statisticky vyhodnoceny. Následně byly přiřazeny hmotnosti na nápravu v [t]. Z hmotnosti na nápravu byly následně stanoveny výsledné svislé síly Q – viz Obr. 7-49 a Tab. 7-13.



Obr. 7-49: Hmotnosti na nápravu hnacích vozidel

Tab. 7-13: Výpočet Q na základě rozkmitů

V	T	M	Vozidlo	A	B	C	Σ	%	D	C/D
30	12:46	42,5	122027	0,00022	-0,0352	0,0354	0,152	23,27	9,89	0,00358
			(jel do stanice)	-0,0017	-0,0278	0,02617		17,2	7,31	0,00358
				0,00912	-0,0389	0,04804		31,57	13,42	0,00358
				0,00681	-0,0357	0,04254		27,96	11,88	0,00358
27	16:10	42,5	123008	0,00362	-0,035	0,03858	0,152	25,3	10,75	0,00359
			(jel do stanice)	-0,0032	-0,0267	0,02353		15,43	6,56	0,00359
				0,01352	-0,0354	0,04892		32,09	13,64	0,00359
				0,00406	-0,0374	0,04144		27,18	11,55	0,00359
31	13:56	42,5	122 016	0,01012	-0,0286	0,03871	0,167	23,13	9,83	0,00394
				0,01396	-0,0249	0,03881		23,19	9,86	0,00394
				0,01737	-0,0295	0,04684		27,99	11,9	0,00394
				0,02111	-0,0219	0,04299		25,69	10,92	0,00394
40	16:14	42,5	122 011	0,00714	-0,0287	0,03584	0,158	22,7	9,65	0,00371
				0,01034	-0,0264	0,03673		23,26	9,89	0,00371
				0,01265	-0,0294	0,04201		26,61	11,31	0,00371
				0,02254	-0,0208	0,04332		27,44	11,66	0,00372
									Průměr	0,003705

Legenda tabulky:

- V – rychlost v km/h.
- T – čas průjezdu.
- M - Celková hmotnost [t] - polovina hmotnosti vozu.
- A - Hodnota Q pod nápravou [mV/V] – horní.
- B - Hodnota Q pod nápravou [mV/V] – spodní.
- C - rozkmit [mV/V].
- % - % rozložení hmotnosti.
- D - Hmotnost na nápravu - polovina nápravy [t].
- C/D – hodnota mV/V stanovená pro 1 t

Na základě statistického vyhodnocení uvedené tabulky lze určit vztažnou hodnotu mV/V a hmotností na kolo nápravy. Při uvažované celkové hmotnosti 85 t hnacích vozidel řady 122 a 123 odpovídá jedné tuně hmotnosti poloviny nápravy hodnota zesílení 0,003705 mV/V .

Další postup by byl analogický k postupu stanovení vodící síly Y .

Je třeba zdůraznit, že tento postup přináší pouze orientační výsledky hmotností na nápravu, výsledky nelze brát jako absolutní hodnoty hmotností na nápravu, ale slouží jako porovnání mezi jednotlivými vozidly. Proto byly v úvahách interpretace výsledků a vlivu svislé síly Q uvažovány přednostně údaje o hmotnostech na nápravu uvedené v katalogových listech vozidel.

7.4.3 Identifikace svislých a příčných posunů

Podobně jako měření svislých a příčných sil (kap. 0) může měření svislých a příčných posunů v návaznosti na metodiku hodnocení (kap. 6.1.4) směřovat ke stanovení napětí ve svěrkách (na základě vnesení těchto posunů do modelu upevnění MKP a zjištění následné odezvy). Tento způsob je však obdobně komplikovaný jako vnášení svislých a příčných sil do modelu (podobně jako v předchozím případě je stanovení napětí na svěrci výhodnější pomocí měřících svěrek).

Vzhledem k faktu, že jsou stanoveny limitní posuny (v příčném a svislém směru), lze toto měření přímo použít jako okrajové kritérium únavy.

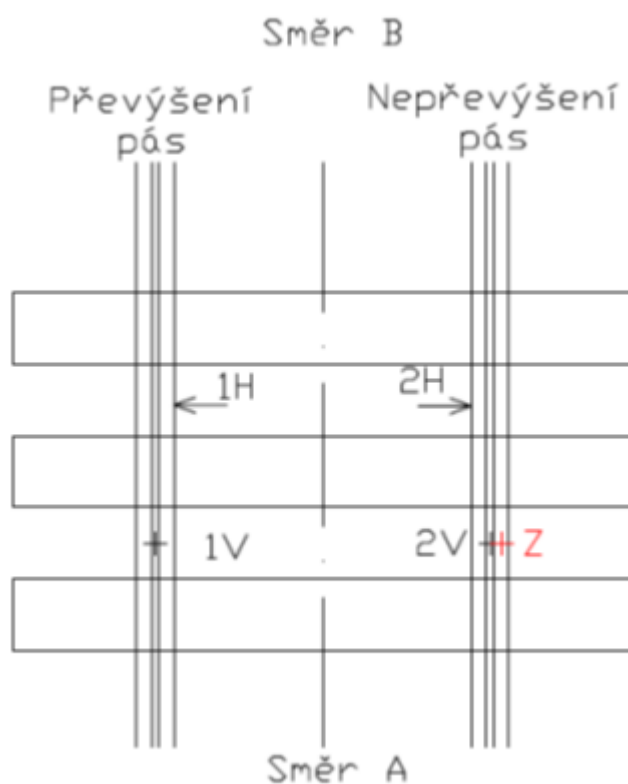
7.4.3.1 Realizace měření

K měření posunů kolejnice na pražci byly použity celkem čtyři odporové snímače posunů Novotechnik TR50, dva pro měření svislých pohybů, dva pro měření příčných pohybů. Měření bylo jak nepřevýšený, tak převýšený kolejnicový pás v těsné blízkosti k měřícím svěrkám (kap. 0) – viz Obr. 7-50 až Obr. 7-52. Měření bylo provedeno v červnu 2018 a říjnu 2018.

Snímače byly připojeny na měřicí zesilovač HBM DMC Plus. Digitalizované záznamy napětí byly registrovány do PC prostřednictvím vhodného SW. Vzorkovací frekvence pro měření byla 600 Hz.

Označení snímačů:

- 1H – příčný posun kolejnice.
- 2H – příčný posun kolejnice.
- 1V – svislý posun kolejnice.
- 2V – svislý posun kolejnice.
- Z – snímač zrychlení na patě kolejnice.



Obr. 7-50: Umístění snímačů v koleji



Obr. 7-51: Umístění snímačů posunu



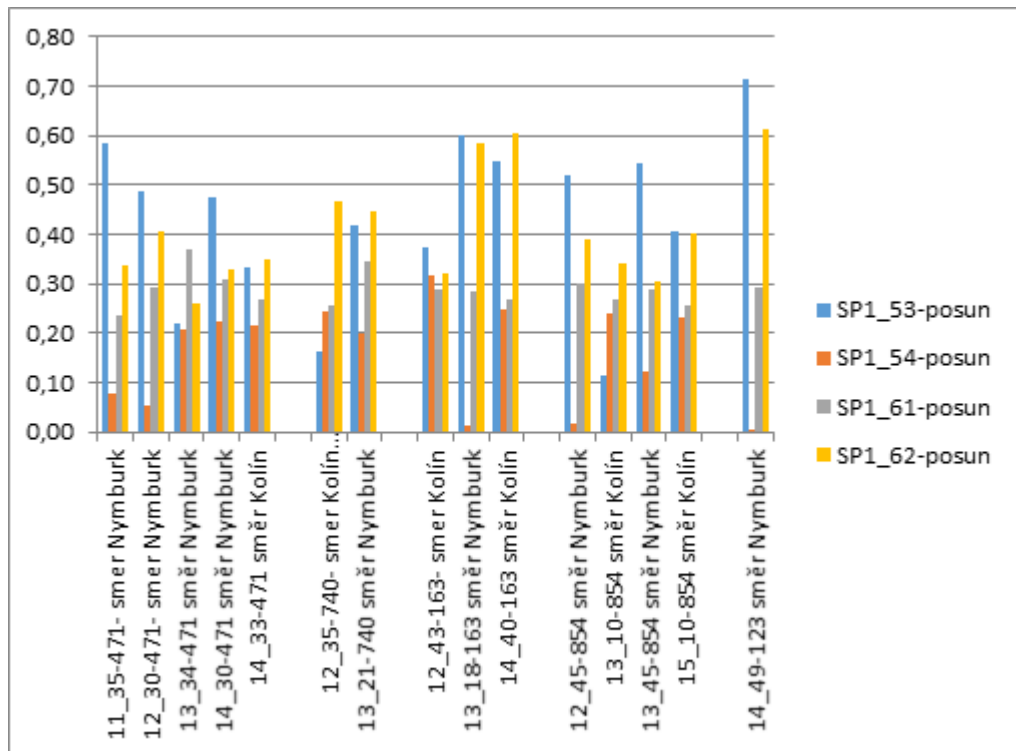
Obr. 7-52: Detail umístění snímačů posunu

Maximální hodnoty příčných posunů dosahovaly 0 mm až 0,71 mm, maximální hodnoty svislých posunů dosahovaly 0,24 mm až 0,61 mm – viz Obr. 7-53.

Popis os:

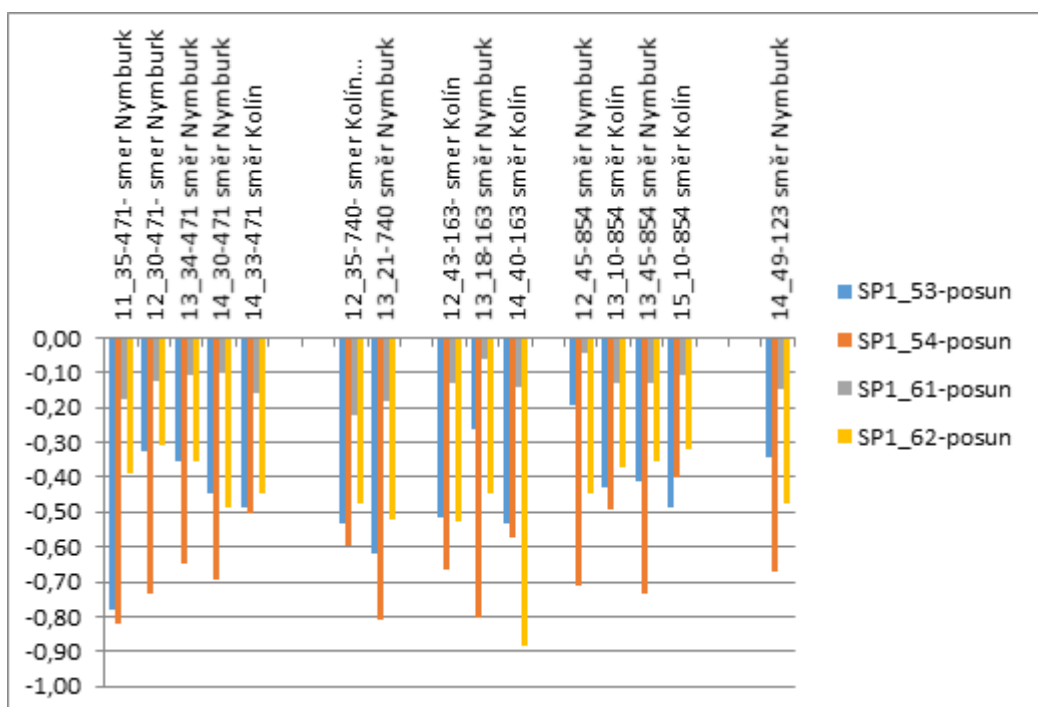
Osa x – vozidlo

Osa y – posun [mm]



Obr. 7-53: Změřené maximální hodnoty svislých posunů kolejnice

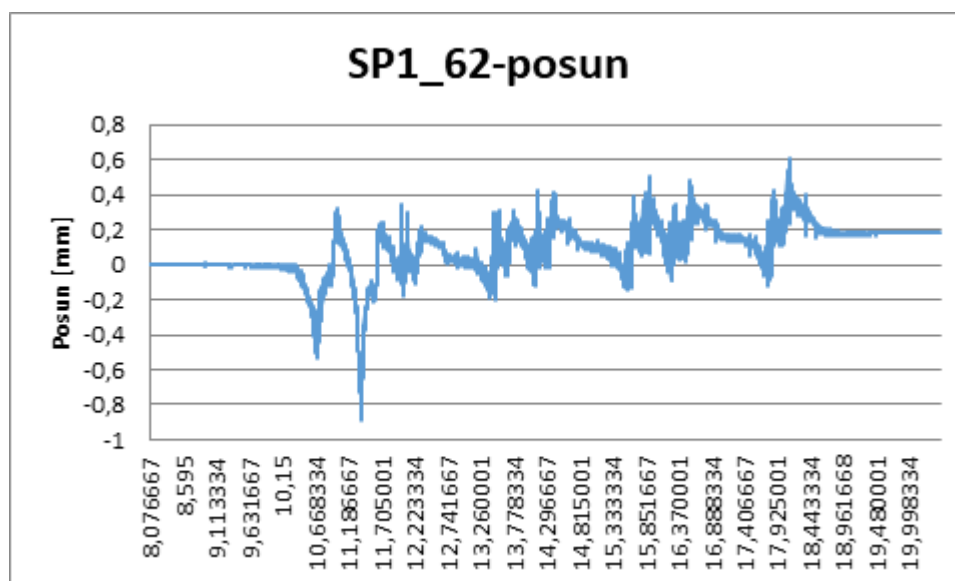
Minimální hodnoty příčných posunů dosahovaly -0,19 mm až -0,82 mm, minimální hodnoty svislých posunů pak byly -0,04 mm až -0,88 mm – viz Obr. 7-54.



Obr. 7-54: Změřené maximální hodnoty svislých posunů kolejnice

Únavový limit svěrek Skl14 ve svislém směru činí ± 1 mm [28], [3]. Maximální rozkmit svislého posunu kolejnice na pražci byl zjištěn 1,2 mm – viz Obr. 7-55, a to u vozidla řady 163, který

projížděl v 14:40. Protože měřený rozkmit 1,2 mm je nižší než definovaný únavový rozkmit 2 mm, můžeme konstatovat, že z pohledu svislých posunů není definovaný únavový limit svěrek Skl14 překračován.

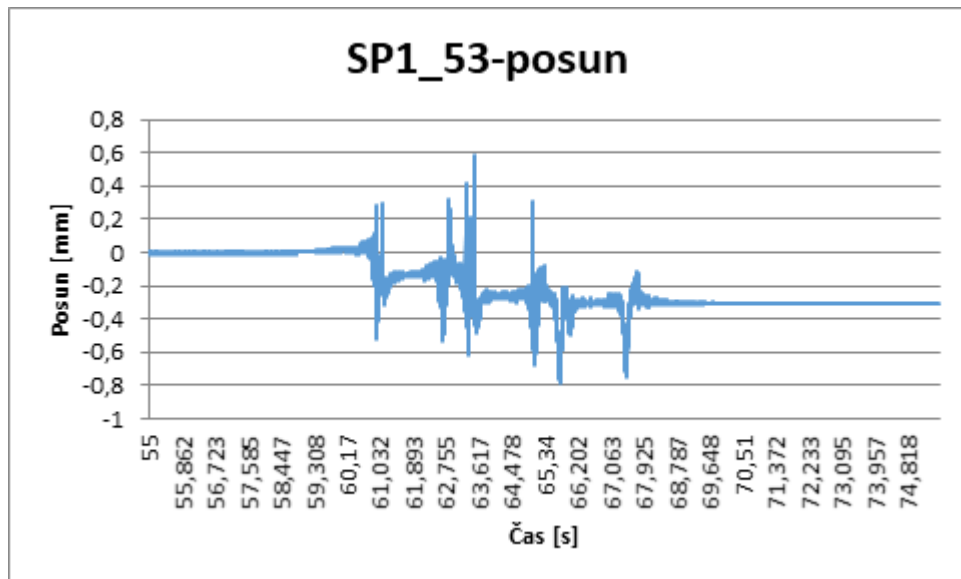


Obr. 7-55: Svislé posuny kolejnice – nepřevyšovaný pás; vozidlo 163, 14:40

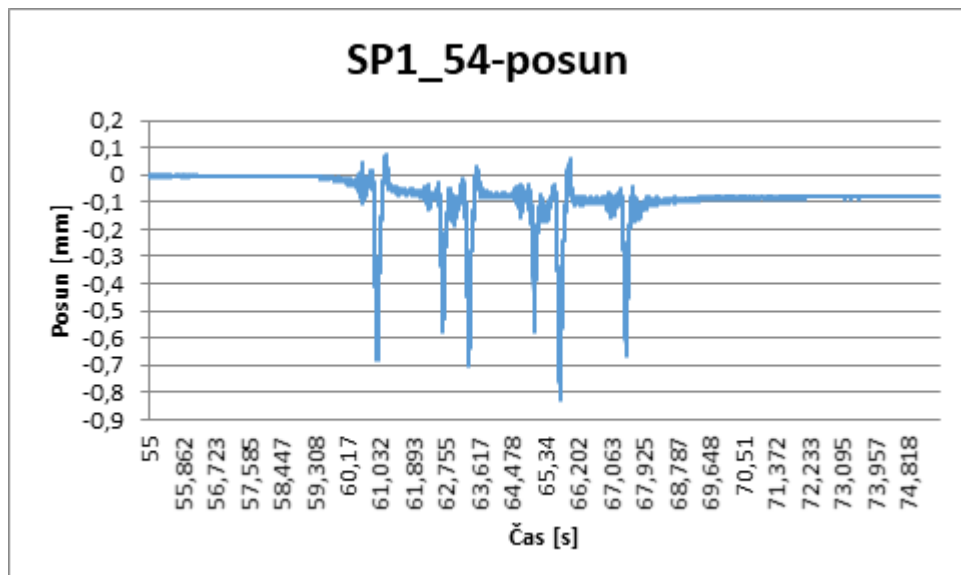
Příčný únavový limit není jednoznačně stanoven [3], [4]. Dle [3] se svěrky zkouší dlouhodobou zkouškou pevnosti při horizontálním namáhání. Amplituda zatěžování je $+0,6/-0,2$ mm při zkušební frekvenci 7 – 9 Hz a po 3 mil. cyklech nesmí svěrka vykazovat žádná poškození. Vzhledem k výsledkům MKP a zjištění v trati je třeba tento limit stanovit a mít ho jasně požadovaný. Autor práce diskutoval zjištění s výrobcem [44]. Výrobce stanovuje požadavek na maximální příčný únavový limit $\pm 0,4$ mm. Porovná-li se rozkmit signálu příčných posunů kolejnice (viz Příloha H) s hodnotami uvedenými výrobcem ($\pm 0,4$ mm, případně hodnotami dle [3], Stejně tak jsou $+0,6/-0,2$ mm.), pak jsou tyto limity překračovány. Příčný únavový limit není splněn!

Vzhledem k faktu, že v daném měřeném úseku se nacházejí svěrky s lomy ramen, je překročení příčného únavového limitu významnou indikací nadměrného zatěžování svěrek! Zároveň je toto tvrzení v souladu s výsledky fraktografické analýzy dle kap. 7.2.

Maximální hodnota byla zjištěna u vozidla 471, který projížděl v 11:35 – viz Obr. 7-56 a Obr. 7-57.



Obr. 7-56: Příčné posuny kolejnice – nepřevýšený pás; vozidlo 471, 11:35



Obr. 7-57: Příčné posuny kolejnice – převýšený pás; vozidlo 471, 11:35

Výše uvedený fakt je podmíněn shodným příčným posunem měřené kolejnice a kontaktu ramene svěrky. Z analýzy poškozených svěrek – viz Obr. 7-58 až Obr. 7-60 je však patrné, že se rameno svěrky zatlačí do paty kolejnice, takže pohyb vnějšího ramene kopíruje pohyb paty kolejnice. K fixaci kontaktu dále přispívá korozní napadení svěrky a kolejnice.

Na níže uvedených obrázcích je znázorněn otisk po zatlačení vnějšího ramene svěrky do paty kolejnice, dále lomová plocha, na které je patrné místo iniciace, místo dolomení a klasický únavový průběh poškození. Místem iniciace je spodní strana svěrky. Jedná se o typické poškození svěrek v oblouku u žst. Kolín.



Obr. 7-58: Otisk po zatlačení vnějšího ramene svěrky v patě kolejnice



Obr. 7-59: Detail poškození vnějšího ramene svěrky



Obr. 7-60: Počátek vývoje vady na vnějším rameni svěrky

Tabulkové shrnutí hodnot je uvedeno v Tab. 7-14 a Tab. 7-15.

Tab. 7-14: Maximální hodnoty posunů (nevyhovující označeny červeně)

Záznam	SP1_53- příčný posun	SP1_54- příčný posun	SP1_61- svislý posun	SP1_62- svislý posun	Rychlost
	mm	mm	mm	mm	km/h
11_35-471- smer Nymburk	0,59	0,08	0,24	0,34	39
12_30-471- smer Nymburk	0,49	0,05	0,29	0,41	48
13_34-471 směr Nymburk	0,22	0,21	0,37	0,26	29
14_30-471 směr Nymburk	0,48	0,23	0,31	0,33	39
14_33-471 směr Kolín	0,33	0,22	0,27	0,35	49
12_35-740- smer Kolín, následně 123 druhá kolej	0,17	0,24	0,26	0,47	25
13_21-740 směr Nymburk	0,42	0,20	0,34	0,45	33
12_43-163- smer Kolín	0,37	0,32	0,29	0,32	39
13_18-163 směr Nymburk	0,60	0,01	0,28	0,59	46
14_40-163 směr Kolín	0,55	0,25	0,27	0,61	36
12_45-854 směr Nymburk	0,52	0,02	0,30	0,39	33
13_10-854 směr Kolín	0,12	0,24	0,27	0,34	33
13_45-854 směr Nymburk	0,54	0,12	0,29	0,31	39
15_10-854 směr Kolín	0,41	0,23	0,26	0,40	41
14_49-123 směr Nymburk	0,71	0,00	0,29	0,61	28
Maximum	0,71	0,32	0,37	0,61	

Tab. 7-15: Minimální hodnoty posunů (nevyhovující označeny červeně)

Záznam	SP1_53- příčný posun	SP1_54- příčný posun	SP1_61- svislý posun	SP1_62- svislý posun	Rychlost
	mm	mm	mm	mm	km/h
11_35-471- smer Nymburk	-0,78	-0,82	-0,17	-0,39	39
12_30-471- smer Nymburk	-0,33	-0,74	-0,13	-0,31	48
13_34-471 směr Nymburk	-0,35	-0,65	-0,11	-0,35	29
14_30-471 směr Nymburk	-0,45	-0,69	-0,10	-0,48	39
14_33-471 směr Kolín	-0,48	-0,51	-0,16	-0,45	49

Záznam	SP1_53- příčný posun	SP1_54- příčný posun	SP1_61- svislý posun	SP1_62- svislý posun	Rychlost
	mm	mm	mm	mm	km/h
12_35-740- smer Kolín, následně 123 druhá kolej	-0,53	-0,60	-0,22	-0,48	25
13_21-740 směr Nymburk	-0,62	-0,81	-0,18	-0,52	33
12_43-163- smer Kolín	-0,51	-0,66	-0,13	-0,53	43
13_18-163 směr Nymburk	-0,26	-0,80	-0,06	-0,45	44
14_40-163 směr Kolín	-0,53	-0,57	-0,14	-0,88	43
12_45-854 směr Nymburk	-0,19	-0,71	-0,04	-0,44	33
13_10-854 směr Kolín	-0,43	-0,50	-0,13	-0,37	33
13_45-854 směr Nymburk	-0,41	-0,73	-0,13	-0,35	39
15_10-854 směr Kolín	-0,49	-0,40	-0,11	-0,32	44
14_49-123 směr Nymburk	-0,34	-0,67	-0,15	-0,48	28
Minimum	-0,78	-0,82	-0,22	-0,88	

Pozn.: Červeně označena překročení příčného únavového limitu $\pm 0,4$ mm, případně svislého únavového limitu ± 1 mm (nenastalo). Je zřejmé, že limity dle [3], $+0,6/-0,2$ mm jsou také překračovány.

7.4.4 Hodnocení únavového poškození

Hodnocení únavového poškození je demonstrováno na základě experimentálního měření napětí na měrných svěrkách umístěných v ŽST Kolín (říjen 2016). V rámci měření byl identifikován průjezd 19 zatěžovacích souprav. Měření se uskutečnilo v časovém rozmezí 4 hodin (12:30-16:30). Podkladem pro hodnocení únavového poškození/životnosti byly v souladu s metodikou (Kap. 6.1.4) záznamy napětí na měrných svěrkách od zatížení vlakovými soupravami (považované za reprezentativní) transformované dle HMM hypotézy na redukované napětí, hodnoty statického předpětí dané utahováním svěrky a únavová křivka (Kap. 4.2).

Hodnocení na únavu probíhalo v následujících krocích:

- 1) Identifikace statického předpětí a úprava záznamů napětí od zatěžovacích souprav o toto statické předpětí.
- 2) Vyhodnocení transformovaných záznamů napětí pomocí metody dvouparametrického stékání deště RF 2D.
- 3) Transformace matice RF 2D pomocí Goodmanova kritéria na 1D histogram s nulovou střední hodnotou.
- 4) Stanovení dílčích poškození jednotlivých souprav.

5) Hodnocení životnosti pro referenční dobu měření.

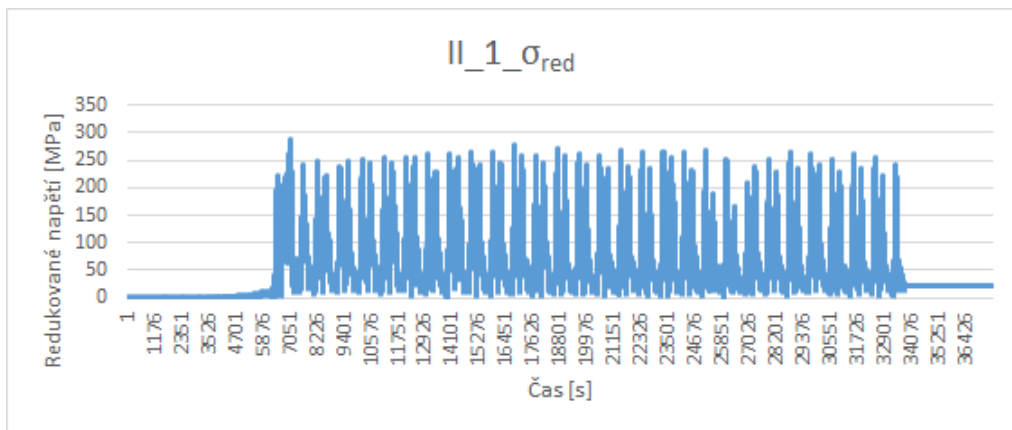
Uvedený postup lze demonstrovat na záznamu průjezdu nákladní soupravy v čase 12:46, lokomotiva 122 027, 28 ložených vozů. Místem měření byla měrná svěrka II_1.

7.4.4.1 Identifikace statického předpětí a úprava záznamu napětí

Hodnota statického předpětí byla převzata z měření uvedeném v Kap. 7.3.2.

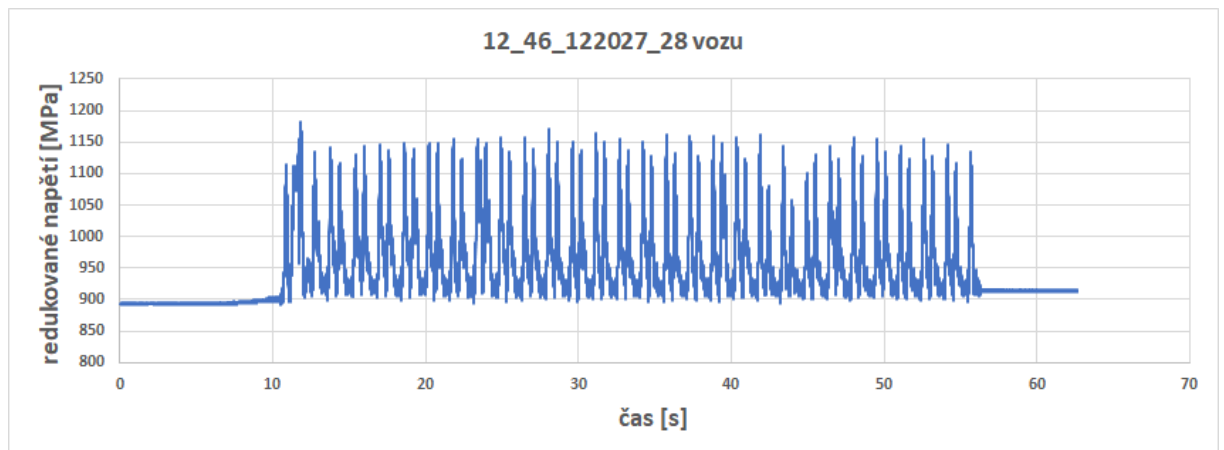
$$(887,014 + 899,254)/2 = 893,134 \text{ MPa}$$

Původní záznam:



Obr. 7-61: Původní záznam redukovaného napětí při průjezdu soupravy

Upravený záznam:

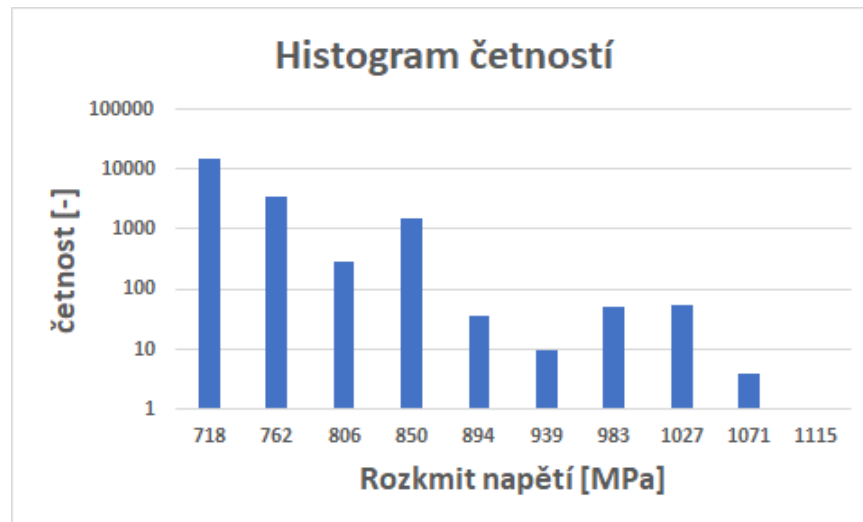


Obr. 7-62: Upravený záznam redukovaného napětí při průjezdu soupravy o statické předpětí svěrky

7.4.4.2 Hodnocení záznamu pomocí dvouparametrické metody stékání deště RF 2D

K hodnocení byl použit specializovaný SW [57] umožňující identifikovat jednotlivé střední hodnoty rozkmitů a ty dle metody Stékání deště zařadit do jednotlivých buněk matice.

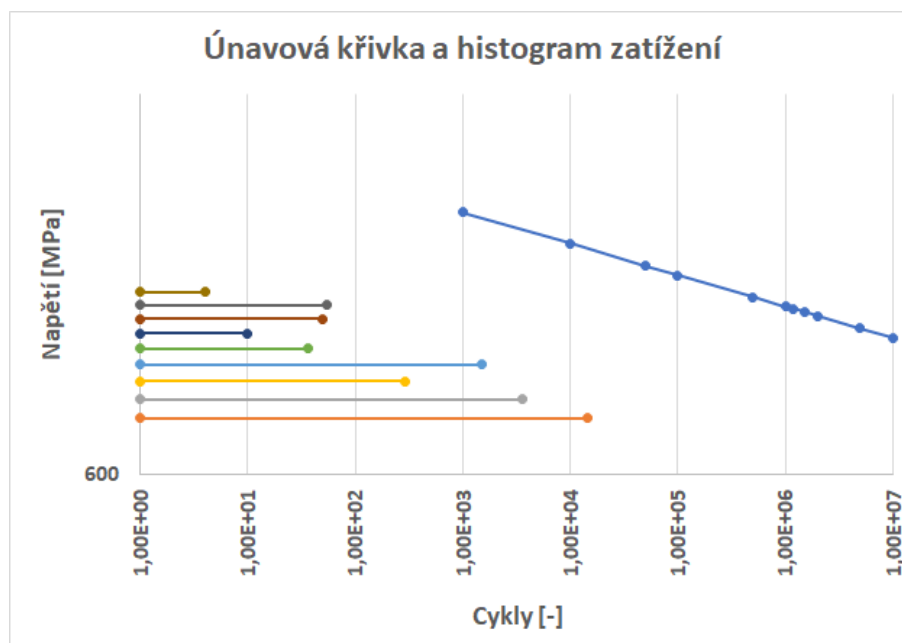
Nastavení matice bylo voleno s ohledem na výpočtové a časové možnosti autora práce:



Obr. 7-64: Jednparametrický histogram

7.4.4.4 Stanovení dílčích poškození jednotlivých souprav

Hodnota dílčeho poškození vychází v souladu s metodikou z hypotézy Palmgren-Minerovi, popsána např. v [54]. Hypotéza definuje poškození jako poměr mezi skutečným počtem cyklů na daném rozkmitu namáhání a počtem cyklů do lomu (reprezentuje únavová křivka) na daném rozkmitu napětí. Uvedené je demonstrováno na Obr. 7-65.



Obr. 7-65: Únavová křivka a histogram zatížení

Hodnota dílčeho poškození byla stanovena na $1,247668013111E-04$. Obdobným způsobem lze přistupovat i k ostatním 18 vlakovým soupravám. Hodnoty dílčích poškození shrnuje následující tabulka:

Tab. 7-16: Hodnoty dílčích poškození jednotlivých souprav

Souprava	dílčí poškození
12_46_122027_28 vozu	1,24766801311E-04
12_48_854213_2 vozy	1,99087492635E-06
13_10_854_954	2,43066270272E-06
13_16_162_2 vozy	3,11289522493E-06
13_30_471_071_971	3,30882980439E-06
13_39_854_2 vozy	2,15932316090E-06
13_45_130025_23_autovozů_prázdné	1,72852954480E-05
13_56_122016_3a18_vozy	1,08936176345E-05
14_22_854019_954	3,09946765761E-06
14_30_471007_vuz_971	2,99559870816E-06
14_43_854019_řídící vůz	1,39802015085E-06
15_16_163073_3_vozy	2,58412925797E-06
15_30_971043_vuz_471043	2,68359992031E-06
15_34 - Metranz, 386016	1,50651519748E-05
15_41_854016_řídící vůz	2,68478166189E-06
16_00_730_730_podbíječka_pušl_podbíječka	4,28327835016E-06
16_10_123008_30EAS - ložené, uhlí	4,82751413892E-05
16_14_122011_30_vozůEAS_prázdné	8,98807165129E-06
16_31_971_471	2,52440191079E-06

7.4.4.5 Hodnocení životnosti pro referenční dobu měření

Celková životnost svěrky je dáno součtem všech dílčích poškození a časovým intervalem, během kterého byly záznamy napětí získány (v tomto případě 4 h).

Tab. 7-17: Celková životnost svěrky

Celkové poškození	2,60529942845E-04
Celková životnost v hodinách	15353
Celková životnost v letech	1,75

Celková životnost svěrky byla na základě uvedených výpočtů stanovena na 1,75 roků. To velmi dobře koreluje se skutečnou životností svěrek v daném místě (cca 2,5 roků).

7.5 Hodnocení zrychlení

Měření bylo realizováno společně s měřením posunů paty kolejnice (říjen 2018). Pro měření byl použit indukční snímač zrychlení HBM B12/500. Snímač zrychlení byl přichycen na patu kolejnice (nepřevýšený kolejnicový pás), co možná nejbližší místům s měřicími svěrkami (bod měření napětí na svěrkách při průjezdech železničních vozidel) – viz Obr. 7-66 a Obr. 7-67. Snímače byly připojeny na měřicí zesilovač HBM DMC Plus. Digitalizované záznamy napětí registrovány do PC prostřednictvím SW Catman. Vzorkovací frekvence pro měření byla 600 Hz.



Obr. 7-66: Pohled na měřicí místo



Obr. 7-67: Detail umístění snímače zrychlení

Záznamy z měření jsou uvedeny v Příloze I. Maximální a minimální hodnoty zrychlení jsou shrnuty do Tab. 7-18 a Tab. 7-19. V tabulkách jsou uvedeny rovněž vyhodnocené maximální a minimální efektivní hodnoty zrychlení RMS.

Tab. 7-18: Maximální hodnoty zrychlení

Záznam	B12_500- zrychlení	B12_500-zrychlení RMS	Rychlost
	g	g	km/h
11_35-471- smer Nymburk	neměřeno	neměřeno	39
12_30-471- smer Nymburk	16,78	3,63	48
13_34-471 směr Nymburk	10,89	2,33	29
14_30-471 směr Nymburk	16,85	3,44	39
14_33-471 směr Kolín	20,73	4,01	49
12_35-740- smer Kolín, následně 123 druhá kolej	9,96	2,73	25
13_21-740 směr Nymburk	11,33	2,82	33
12_43-163- smer Kolín	19,09	4,08	39
13_18-163 směr Nymburk	19,53	3,81	46
14_40-163 směr Kolín	20,32	4,59	36
12_45-854 směr Nymburk	16,75	3,26	33
13_10-854 směr Kolín	11,21	3,13	33
13_45-854 směr Nymburk	21,53	4,44	39
15_10-854 směr Kolín	19,08	4,95	41
14_49-123 směr Nymburk	11,22	3,39	28

Záznam	B12_500- zrychlení	B12_500-zrychlení RMS	Rychlost
	g	g	km/h
Maximum	21,53	4,95	

Tab. 7-19: Minimální hodnoty zrychlení

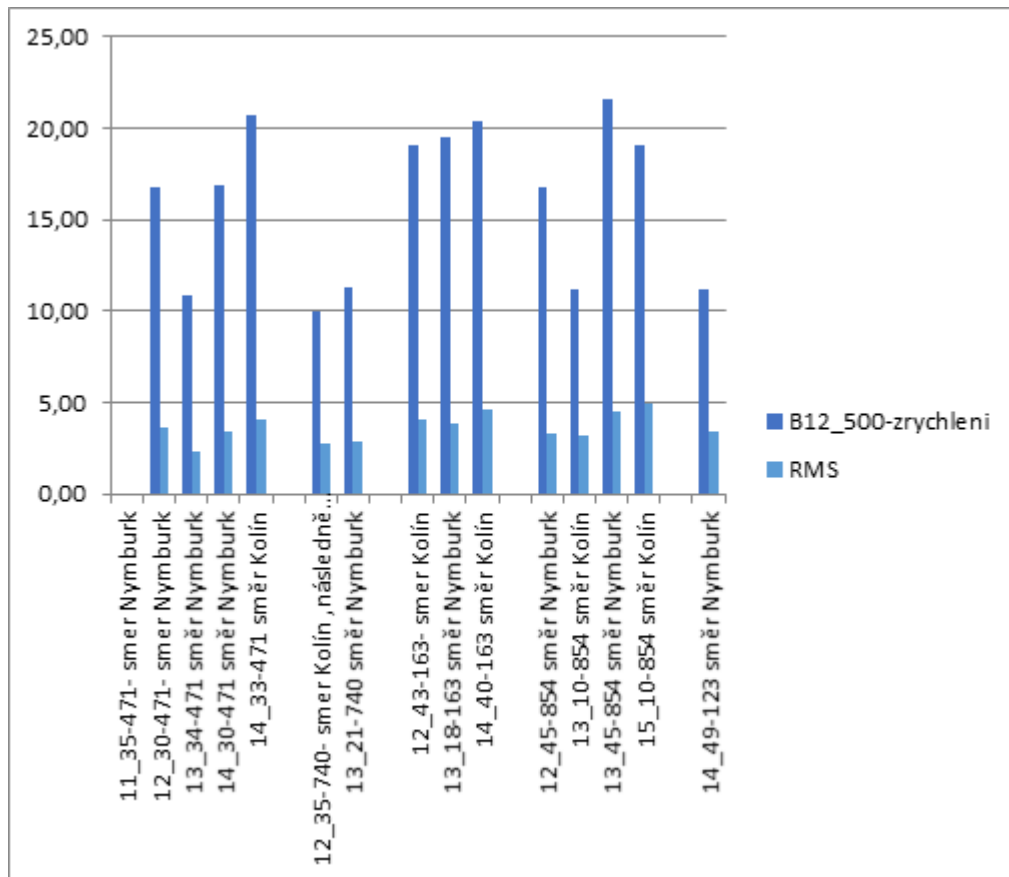
Záznam	B12_500- zrychlení	B12_500-zrychlení RMS	Rychlost
	g	g	km/h
11_35-471- smer Nymburk	neměřeno	neměřeno	39
12_30-471- smer Nymburk	-22,49	1,28	48
13_34-471 směr Nymburk	-9,26	0,56	29
14_30-471 směr Nymburk	-17,77	1,05	39
14_33-471 směr Kolín	-25,34	1,61	49
12_35-740- smer Kolín, následně 123 druhá kolej	-11,47	1,37	25
13_21-740 směr Nymburk	-11,87	1,82	33
12_43-163- smer Kolín	-21,84	1,17	43
13_18-163 směr Nymburk	-19,27	1,97	44
14_40-163 směr Kolín	-24,23	2,25	43
12_45-854 směr Nymburk	-14,92	0,38	33
13_10-854 směr Kolín	-12,91	0,64	33
13_45-854 směr Nymburk	-16,64	0,68	39
15_10-854 směr Kolín	-24,28	1,04	44
14_49-123 směr Nymburk	-21,53	1,18	28
Minimum	-25,34	0,38	

Změřené maximální a minimální hodnoty zrychlení jsou graficky uvedeny v Obr. 7-68 a Obr. 7-69. Maximální hodnota byla změřena 21,53 g, minimální hodnota pak byla změřena -25,34 g. Zrychlení jsou srovnatelná s výsledky, který bylo dosaženo v dizertační práci [29] pro stejný typ upevnění, tedy W14.

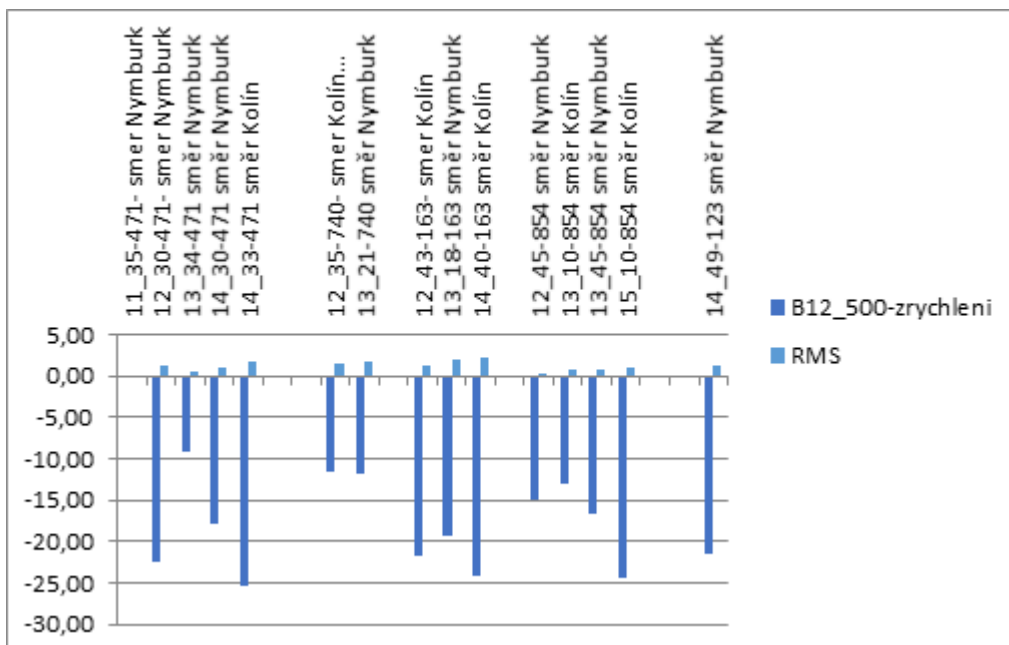
Popis os:

Osa x – vozidlo

Osa y – zrychlení [g]



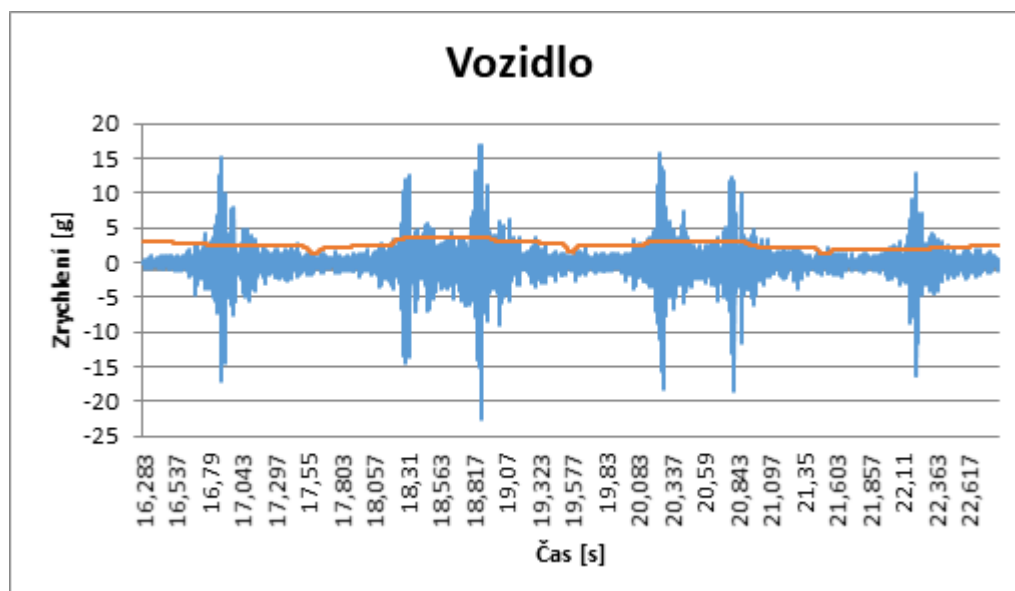
Obr. 7-68: Maximální hodnoty zrychlení na kolejnici, včetně RMS



Obr. 7-69: Minimální hodnoty zrychlení na kolejnici, včetně RMS

Výpočet RMS byl proveden v programu NI Diadem 2014. Vyhodnocené hodnoty RMS jsou součástí jednotlivých záznamů zrychlení uvedených v Příloze I. Příklad záznamu je zobrazen v Obr. 7-70.

Maximální hodnota RMS byla spočítána na 4,95 g a minimální hodnota 0,38 g. Výsledky byly zaznamenány graficky – viz Obr. 7-68 a Obr. 7-69.



Obr. 7-70: Záznam zrychlení se zobrazením efektivní hodnoty zrychlení RMS (červeně)

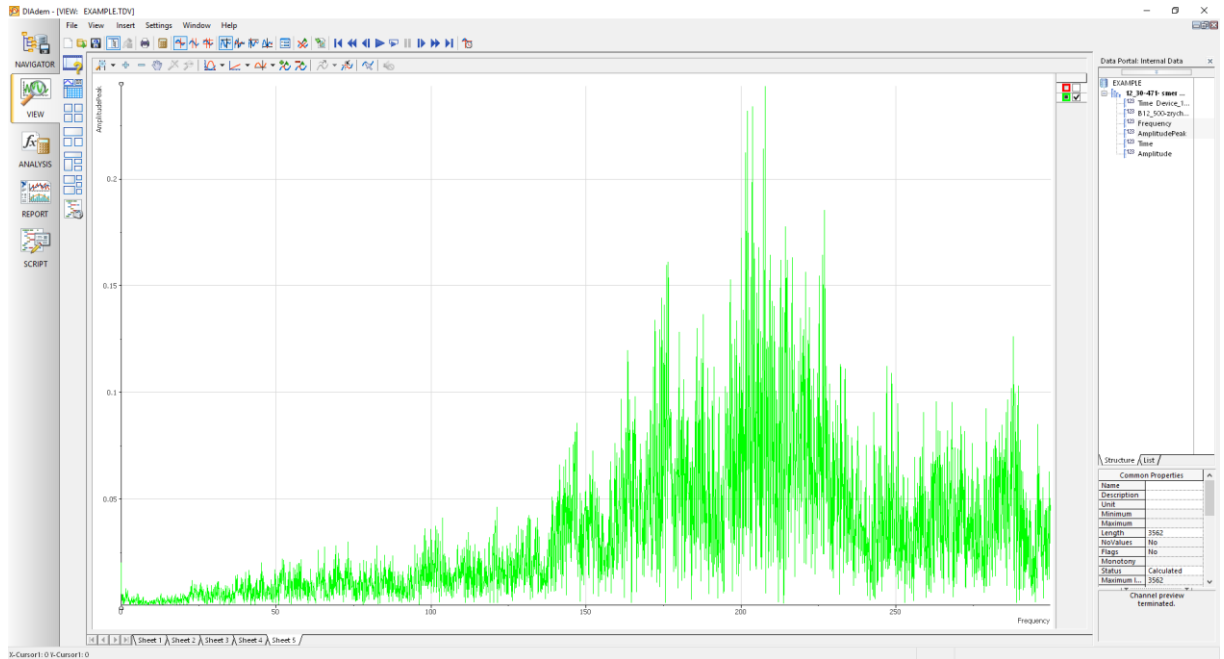
Na základě porovnání s tabulkou dle [30], uvedenou v metodice hodnocení, kde je limitní hodnota efektivního zrychlení ve svislém směru na kolejnici stanovena 280 m/s^2 lze konstatovat, že změřená zrychlení uvedenou hodnotu nepřekračovala.

Dále byly záznamy z časové oblasti převedeny do oblasti frekvenční. Použita byla FFT, převedení signálu bylo opět realizováno v programu NI DIAdem 2014. Výsledky jsou uvedeny v Příloze I a vzorový výsledek je uveden v Obr. 7-71. Na první pohled je patrné, že čím vyšší rychlost, tím se posouvají maximální hodnoty do vyšších frekvenčních spekter. Cílem tohoto vyhodnocení je určení frekvenčních pásem skluzových vln, případně odhalení indikace možných poruch.

Popis os:

Osa x – amplituda [g]

Osa y – frekvence [Hz]



Obr. 7-71: Výsledek FFT analýzy záznamu zrychlení při průjezdu vozidla

V oblouku byly zjištěny skluzové vlny, a to ve vzdálenostech jednotlivých vln cca 6 – 8 cm – viz Obr. 7-72.



Obr. 7-72: Skluzové vlny na kolejnici

Ze znalosti vzdálenosti jednotlivých vln a rychlosti vozidel byla spočítána frekvenční pásma skluzových vln. Výpočet uvažující jisté zjednodušení v podobě rovnoměrného pohybu byl použit také v [29]:

$$v = \frac{s}{t} \rightarrow t = \frac{s}{v} \rightarrow f = \frac{1}{t} \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

Kde v je rychlost vozidel a s je vlnová délka vady.

Pro modelový příklad z Obr. 7-71 je výpočet následující:

Rychlost vozidla $v = 48 \text{ km/h}$, což je $13,33 \text{ m/s}$.

Vzdálenost skluzových vln $0,06$ až $0,08 \text{ m}$.

$$f = \frac{1}{t} = \frac{1}{\frac{0,06}{13,33}} = 222,22 \text{ Hz}$$

a

$$f = \frac{1}{t} = \frac{1}{\frac{0,08}{13,33}} = 166,67 \text{ Hz}$$

Pásmo skluzových vln je tedy v rozmezí $166,67 \text{ Hz}$ až $222,22 \text{ Hz}$, což se poměrně dobře shoduje se záznamem.

Všechny výsledky jsou uvedeny v Příloze I a je z nich patrné, že špičkové hodnoty se shodují s tímto odhadem, vliv skluzových vln je tedy jasně patrný na záznamu zrychlení ve frekvenční oblasti.

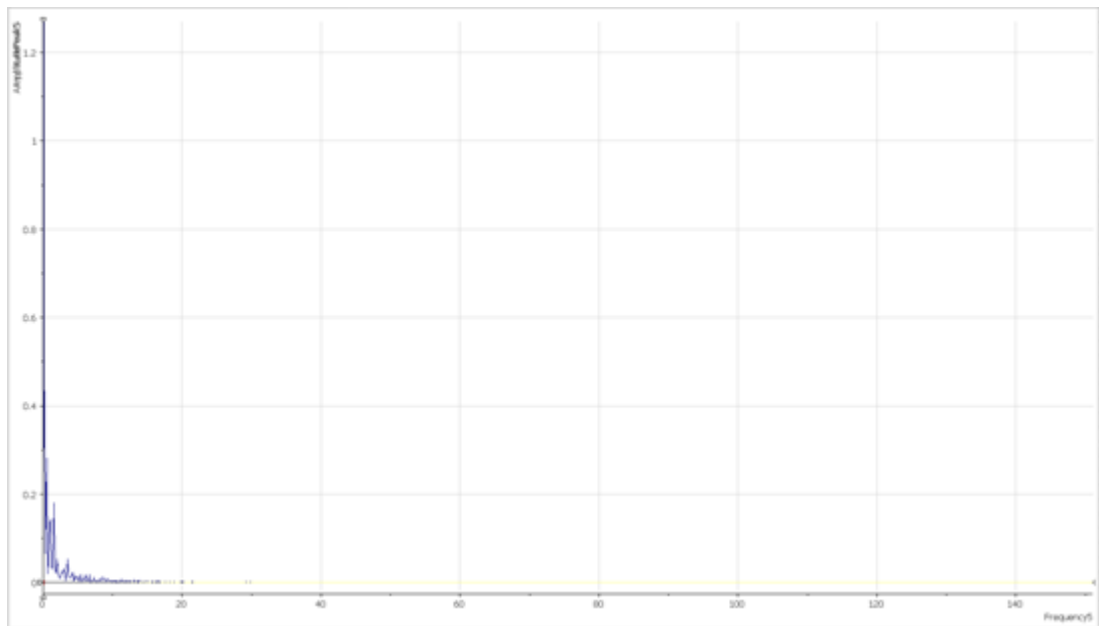
V [30] je uvedeno: "Aby se stanovil standard pro všechny země, byly z mnoha měření provedených v různých umístěních odvozeny grafy uvedené v příloze C, které se vztahují na všechny aplikace – viz Obr. 7-74. V příloze C jsou znázorněny křivky spektrální hustoty energie; tabulka 5 uvádí efektivní hodnoty zrychlení příslušné k těmto křivkám, vypočtené pro rozsah od 5 Hz do 2000 Hz ".

Pro porovnání hodnot byla vypočítána efektivní výkonová hustota zrychlení RMS a z té byla následně provedena FFT analýza. Oba kroky byly realizovány pomocí programu NI DIAdem 2014 a výsledky jsou uvedeny v Příloze J a příklad je zobrazen na Obr. 7-73. Porovná-li se hodnoty uvedené v [30], příloze C s hodnotami zjištěnými, jsou zjištěné hodnoty nižší než hodnoty požadované v normě.

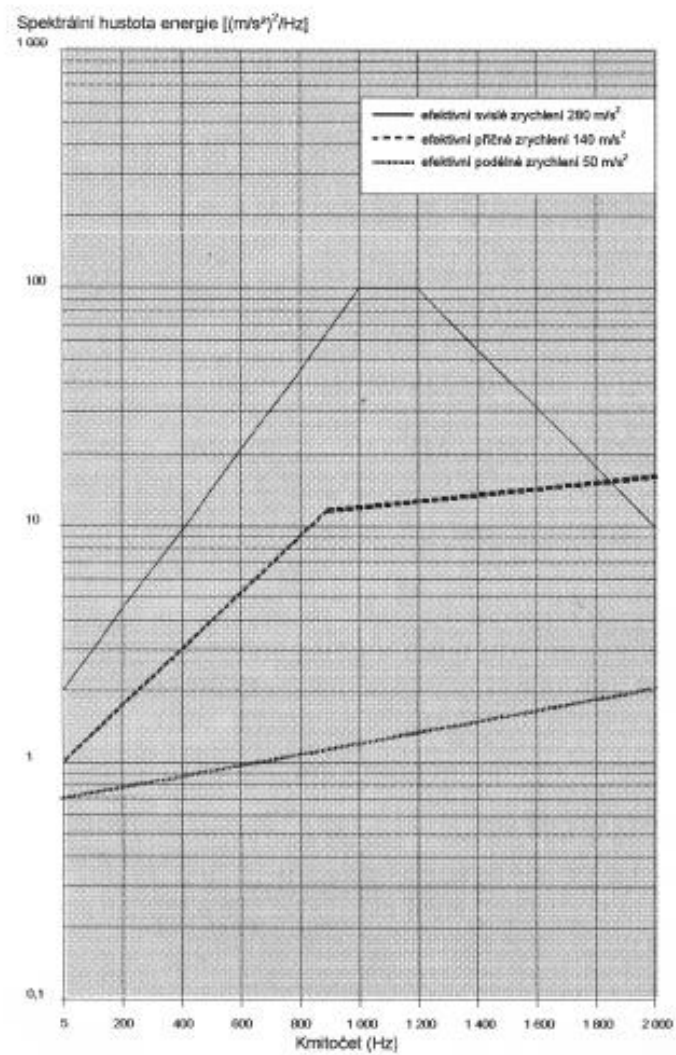
Popis os:

Osa x – amplituda [g]

Osa y – frekvence [Hz]



Obr. 7-73: FFT analýza efektivních výkonové hustoty zrychlení RMS



Obr. 7-74: Spektrální hustota energie vibrací na kolejnici [30]

7.6 Shrnutí výsledků ověření metodiky

Ověření metodiky vedlo k zjištění příčin praskání svěrek v oblouku v žst. Kolín, které je dáno především velkým příčným posunem vnějších ramen pružných svěrek, kdy je překračován jejich příčný únavový limit.

Doporučení, které by bylo vhodné aplikovat:

- Měřením v trati a MKP výpočtem byly zjištěny vysoké hodnoty redukováných napětí, ale pouze v povrchové vrstvě svěrek. Čím blíže ke středu svěrky, tím menší jsou hodnoty napětí. Tímto je možné vysvětlit fakt, že svěrky nepraskají již při pouhém utažení svěrek. Vysoké povrchové hodnoty napětí mají negativní vliv na vady vznikající na povrchu, jako je únava, případně koroze.
- Je třeba doplnit jednoznačné požadavky na příčný únavový limit do legislativy – TPD, OTP, atd., resp. na kombinovaný únavový limit, což je kombinace příčného a svislého pohybu vnějších ramen pružných svěrek. Stejně tak by tam bylo vhodné doplnit i požadavky na jeho zkoušení a prokazování. Výrobce svěrek Vossloh zkouší svěrky na kombinovaný únavový limit, tato zkouška se tedy jeví jako vhodná pro prokazování únavového příčného limitu a bylo by ji vhodné zavést do české legislativy.
- Do oblouků s výrazným příčným pohybem kolejnice a zároveň tedy s příčným pohybem vnějších ramen, nejsou svěrky Skl 14 vhodné. Na tato místa je třeba osazovat svěrky s vyšším příčným únavovým limitem.
- Není vhodné navrhovat oblouky malých poloměrů do hodně zatížených tratí.
- Je třeba předcházet skluzovým vlnám vhodnou preventivní údržbou, tím eliminovat nežádoucí přídavné zatížení železničního svršku. Jako možné řešení příčin skluzových vln se jeví volba vhodného typu upevnění [29], nebo případně použití podpražcových podložek, které by měly mít na vývoj kolejnicových vad také pozitivní vliv (např. [32]).
- Je nutné provádět vhodnou a včasnou údržbu železničního svršku, což znamená m. j. správné podbití koleje, a udržovat svršek ve stavu odpovídajícím předpisům. Vliv správně podbité koleje a nesprávně podbité koleje je řešen v [29].
- Zjistit, jaké jsou přesně důsledky vlnovitosti (skluzových vln) na železniční svršek.
- Aplikovat do legislativy metodiku navrženou v Kapitole 6 společně s postupem uvedeným v [29].

Velmi důležitým faktorem pro vznik problémů v koleji je již samotný návrh koleje, kam je možné zařadit např. vhodné kombinace poloměrů oblouků, rychlosti a převýšení a dále dostatečná preventivní údržba koleje, která eliminuje rozvoj následných poruch. Je třeba vyvarovat se malých poloměrů oblouků u zatížených tratí.

8 Závěr

Hlavním cílem práce bylo vytvoření a ověření metodiky hodnocení stavu svěrek Skl14 v provozovaných tratích, která definuje různá hodnotící kritéria a určuje způsob jejich ověření. Práce byla rozdělena na části řešící ověření vlastností svěrek, MKP analýzu, návrh metodiky a její ověření.

Vstupním údajem byla identifikace problematických traťových úseků s vyšší mírou poškození pružných svěrek v provozované železniční síti a analýza faktorů vedoucích k těmto poškozením. Mezi identifikované problematické úseky, byly zařazeny železniční přejezdy s celopryžovými konstrukcemi, úseky s oblouky malých poloměrů ($R < 400$ m) a vybrané železniční tunely.

8.1 Ověření vlastnosti svěrek Skl14

- Tahovou zkouškou byla zjištěna mez kluzu 1289 až 1376 MPa a mez pevnosti 1392 až 1492 MPa. Zjištěné hodnoty jsou v souladu s [18] pro typ oceli 38Si7, ze které jsou svěrky vyrobeny.
- Testem na únavu na vzorku vyrobeném z materiálu pružných svěrek byla zjištěna únavová křivka s charakteristikami $m = 23,181$, $\log c = 75,765$. Smluvní mez únavy při nulové střední hodnotě byla zjištěna 997,56 MPa.
- Svěrky byly podrobeny metalografickému zkoumání. Řez svěrky byl zkoumán elektronovým a světelným mikroskopem, byla měřena tvrdost, která byla zjištěna v rozmezí 434 až 455 HV30. Svěrka splnila požadavky [3], a to ve všech zkoumaných parametrech. Byly zjištěny efekty snižující korozní a únavovou odolnost (oduhličení povrchové vrstvy na karbid), ovšem v dovoleném rozsahu pro daný výrobek.
- Korozní odolnost pružných svěrek bez antikorozní úpravy a s antikorozní úpravou KTL byla ověřena zkouškou neutrální solnou mlhou dle ČSN EN ISO 9227 a ponornou zkouškou v roztoku elektrolytu. Jak svěrky bez antikorozní úpravy, tak svěrky s antikorozní úpravou vykazovaly dobré antikorozní vlastnosti, lepších výsledků dosahovaly svěrky s antikorozní povrchovou úpravou, cca 11x.
- U svěrek byla ověřena svěrná síla, a to měřením přípravkem Vosslohu s výsledky 10,01 kN a 10,56 kN pro jednu svěrku a normovým postupem dle [35] s výsledkem 17,78 kN pro uzel upevnění. Hodnoty změřené přípravkem Vosslohu odpovídají požadavkům [3] pro jednu svěrku, hodnoty zjištěné normovaným postupem tuto hodnotu nesplňovaly, požadavky dle [4] splněny byly v obou případech.

8.2 MKP analýza napětí pružné svěrky Skl14

- MKP analýzou zjištěny hodnoty statického předpětí svěrky po utažení. Modelováno utažení s hodnotami posunů 12,6 mm, 12,8 mm, 13 mm (teoretická hodnota zdvihu), 13,2 mm a 13,4 mm. Se zvyšujícími hodnotami posunů stoupá také napětí na svěrce. Na rameni bylo na povrchu svěrky zjištěna napětí von Mises až 1902 MPa, které je vyšší než

ve středu svěrky (cca 10x). Domnívám se, že vysoké napětí v povrchové vrstvě snižuje korozní či únavovou odolnost svěrky. Hodnoty byly porovnávány s výsledky tenzometrického měření v koleji v místech umístění tenzometrů a lze konstatovat, že odchylka byla cca 20 %.

- Dále bylo modelováno kombinované příčné a svislé zatížení svěrky způsobené železničním provozem. Z výsledků bylo patrné, že vysokých hodnot je dosahováno na povrchu svěrky a směrem ke středu svěrky hodnoty pozvolna klesají. Bylo zjištěno, že čím větší je velikost příčného zatížení, tím více se posouvá hodnota maximálního napětí směrem od úhlové vodicí vložky ke středu vnějšího ramene pružné svěrky.

8.3 Metodika hodnocení stavu pružných svěrek Skl14 v provozovaných tratích

Metodika hodnocení stavu pružných svěrek SKL14 v provozovaných tratích je zaměřena na stěžejní problematiku poruch. Vzhledem k faktu, že poruchy jsou vyvolány různými faktory (geometrie, struktura, statické předpětí, dynamické zatížení, koroze), je metodiky členěna dle těchto faktorů:

1) Hodnocení odezvy na statické předpětí

- Po dotažení svěrky (její stlačení/zdvih) předepsaným momentem působení přitlačnou silou, to vyvolá ve svěrce vnitřní pnutí. Mezi tímto pnutím a svěrnou silou je přímá závislost, lze veličiny hodnotit odděleně a zbývající dopočítat pomocí MKP.
- **Hodnocení zdvihu** - teoretická hodnota zdvihu 13 mm (překročení, nedosažení), statické předpětí svěrky po utažení.
- **Hodnocení napětí** - MKP model (charakteristická hodnota napětí v kritických místech svěrek), lze měřit povrchové napětí pomocí tenzometrického měření.
- **Hodnocení svěrné síly** - měření dle ČSN EN 13146-7 nebo přípravkem Vosslohu, porovnání změřených hodnot s TPD, OTP.

2) Hodnocení lomu svěrky

- **Fraktografické analýza** - identifikace způsobu porušení, místa iniciace trhliny.

3) Hodnocení koroze

- Přímý vliv na velikost svěrné síly, významný vliv na dynamické chování (snižuje únavovou pevnost svěrky).
- **Hodnocení procentuálního úbytku hmotnosti** - hodnotícím kritériem je limitní úbytek hmotnosti vlivem koroze, kdy svěrná síla poklesne pod 8 kN na svěrce se zohledněním tolerance $\pm 0,5$ kN. Na základě experimentu byla zjištěna hodnota limitní hmotnosti svěrky vlivem koroze 470 g.
- **Hodnocení zbývajícího průměru drátu** - na základě provedeného experimentu je přípustný úbytek průměru 1 mm. Při průměru menším než 12 mm klesá svěrná síla pod 8 kN se zohledněním tolerance $\pm 0,5$ kN.

4) Hodnocení odezvy na dynamické zatížení

- Zásadní vliv na únavovou životnost svěrky. Pokud je fraktografickou analýzou zjištěno únavové poškození, pak je třeba provést posouzení na únavu, jehož základem je spektrum napětí odpovídající reprezentativnímu zatížení a únavová křivka. Reprezentativní spektrum lze získat pomocí:
 - měření svislých a příčných posunů kolejnice a následného využití MKP pro stanovení napětí,
 - měření svislé kolové a příčné vodící síly působící na kolejnici a následného využití MKP pro stanovení napětí.
- **Identifikace povrchového napětí na svěrci od provozu** - tenzometrické měření na ramenech svěrky prostřednictvím tenzometrických ružic. Srovnávacím/nosným kritériem je ekvivalentní napětí (HMH/Von Mises).
- **Identifikace svislých kolových a příčných vodících sil** - tenzometrické měření deformace stojiny kolejnice. Doplnující měření.
- **Identifikace svislých a příčných posunů** - na základě identifikace/měření posunů paty kolejnice a přepočtových tabulek MKP lze generovat modifikovaný záznam napětí na svěrci. Hodnotícím kritériem je únavový limit ve svislém (± 1 mm) a příčném (+0,6/-0,2) směru.
- **Hodnocení únavového poškození.**
 - Založeno na Palmgren-Minerově hypotéze kumulace únavového poškození.
 - Podklad – časový záznam redukovaného napětí na svěrci odpovídající charakteristické hodnotě napětí svěrky (modifikace tenzometricky zjištěného napětí koeficientem zohledňujícím změnu napětí po průřezu svěrky), definovaná únavová křivka a definovaná historie zatěžování svěrky.
 - Je třeba získat reprezentativní záznam napětí na svěrci, tento záznam dále transformovat tak, aby vyjadřoval redukované napětí dle HMH hypotézy. Vzhledem ke způsobu realizace tenzometrického měření dynamické složky (neobsahuje statické předpětí) je také k záznamu připočteno konstantní napětí od dotahování svěrky. Finálně upravený záznam se následně vyhodnotí třídící dvouparametrickou metodou Rain Flow. Dvouparametrická matice se transformuje na jednoparametrickou (možno bez vlivu střední hodnoty nebo se zahrnutím vlivu střední hodnoty (transformace pomocí Smithova nebo Haighova diagramu). Určí se únavová životnost s ohledem na volbu reprezentativního záznamu. Pokud je známá provozní historie svěrky, lze odhadnout zbytkovou životnost.

5) Hodnocení zrychlení

- **Hodnocení efektivní hodnoty zrychlení (RMS).**
 - Měření zrychlení paty kolejnice ve svislém směru je určující pro stanovení srovnávacích energetických parametrů RMS (efektivní hodnota zrychlení) a identifikace frekvence způsobující tzv. vlnkovitost.

- Lze identifikovat lokální maxima a minima zrychlení a tím i případný poškozující účinek jednotlivých náprav na upevnění.
- **Hodnocení skluzových vln** - stanovení frekvenční hodnoty výskytu vlnkovitosti při provozním zatížení v kontextu s jednotlivými průjezdy zatěžovacích souprav může být doplňujícím údajem k celkovému hodnocení svěrek Skl14.

Vzhledem k navrženým kritériím (geometrické, materiálové), je třeba tato kritéria chápat komplexně, nikoli samostatně např. korozní úbytek má vliv na tuhost svěrky (snížení předpínací síly, snížení únavové pevnosti, apod.).

Volba způsobu hodnocení by vždy měla odpovídat příznakům provázejících vady upevnění. Příznaky lze charakterizovat jako zřejmé defekty, jako jsou lomy ramen svěrek, nadměrný korozní úbytek, vada GPK, skluzové vlny, otlak svěrky v kolejnici či úhlové vložce, atp.

8.4 Ověření metodiky

Měřicím místem pro ověření metodiky byl zvolen oblouk o poloměru 190 m s převýšením 56 mm a rychlostí 50 km/h nacházející se na trati 502A Kolín - Nymburk. Místo bylo vybráno vzhledem k poruchám, které v daném místě vznikají (skluzové vlny, praskání svěrek, apod.). V rámci ověření byla realizována hodnocení dle navržené metodiky (kap. 6).

- **Fraktografická analýza**
V měřeném úseku byly nalezeny svěrky s lomy ramen. Na lomu svěrky bylo prokázáno únavové porušení s více místy iniciace.
- **Hodnocení zdvihu**
Při hodnotách utahovacích momentů 220 Nm (horní hranice předepsaného utahovacího momentu) dosahovaly hodnoty zdvihu 13,5 – 13,7 mm, teoretickou hodnotu zdvihu tak překračovaly o 5,38 %, při utažení na 200 Nm se hodnota zdvihu snížila na 13,4 -13,5 (3,84 %). Je předpoklad, že při snížení utahovacího momentu na spodní hranici 180 Nm by se měřená hodnota zdvihu blížila teoretické.
Na základě porovnání tabulkových hodnot MKP výpočtu (dle kap. 5.1.6) činila max. hodnota napětí (von Mises) při zdvihu 13,7 mm 1924 MPa. Proti napětí při teoretickém zdvihu 13 mm byla hodnota vyšší o 113 MPa.
- **Hodnocení napětí**
Byla změřena hodnota ekvivalentního napětí na povrchu svěrky při utažení předepsaným utahovacím momentem, a to 1794,91 - 2137,03 MPa (střední část svěrky). Porovnání s výpočty MKP, kde při zdvihu 13,7 mm ekvivalentní napětí činilo 1924 MPa, vykazovalo velmi dobrou shodu.

- **Hodnocení svěrné síly**

Svěrná síla byla hodnocena s ohledem na napadení svěrek korozí. Limitní hodnota svěrné síly byla stanovena na 8 kN/svěrku s tolerancí $\pm 0,5$ kN při užití měřícího přípravku Vossloh.

Danému kritériu nevyhověly svěrky se zbývajícím průměrem drátu nižším než 12 mm (původní průměr drátu činil 13 mm) a hmotností menší než 470 g.

Zvláštní pozornost je třeba věnovat svěrkám vyjmutým z velmi zatížených tratí. Na svěrnou sílu v tomto případě nemá dominantní vliv korozní úbytek materiálu pružných svěrek, ale vliv opakovaného zatížení. Pokud tento případ nastane, je třeba svěrky posoudit z hlediska únavového poškození a stanovit zbytkovou životnost (kap. 7.4.4).

- **Identifikace povrchového napětí na svěrci od provozu**

V rámci měření bylo identifikováno maximální ekvivalentní napětí na povrchu svěrky. Maximální hodnota na vnějším rameni svěrky byly zjištěna 288,43 MPa, ve střední části svěrka činila 159,92 MPa.

- **Identifikace svislých a příčných sil**

Tenzometrické měření svislé Q síly a vodící Y síly prokázalo možnost identifikace těchto sil. V ŽST Kolín byly zjištěny vodící síly -42 kN až 24 kN. V rámci stanovení svislé síly Q bylo určeno zesílení 0,003705 mV/V pro zátěž 1 t. Následná transformace záznamu nebyla provedena.

- **Identifikace svislých a příčných sil**

Měřený maximální rozkmit svislého posunu 1,2 mm byl nižší než limitní únavový rozkmit 2 mm. V příčném směru byl doporučený rozkmit posunu $\pm 0,4$ mm (případně +0,6/-0,2 mm) významně překročen. Příčný posun byl výrazně jednostranný vzhledem k neutrální poloze svěrky při utažení, dosahoval hodnot 0,8 mm proti uvedenému limitu 0,4 mm (případně 0,6 mm).

- **Hodnocení únavového poškození**

Celková životnost svěrky byla na základě výpočtů stanovena na 1,75 roků. To velmi dobře koreluje se skutečnou životností svěrek v daném místě (cca 2,5 roků).

- **Hodnocení zrychlení**

Měřená zrychlení na patě kolejnice, resp. jejich vyhodnocení pomocí RMS nepřekračovala limitní hodnoty efektivního zrychlení ve svislém směru na kolejnici 280 m/s². Byla identifikována frekvenční pásma skluzových vln.

Summary

The thesis analyses problems related to tension clamps Skl14, especially corrosive losses of tension clamps material at railway crossings or in tunnels and their influence on the clamping force. The aim of this work is to find a methodology that would lead to a clear decision about replacement, eventually leaving flexible clamps in the track and analysing the causes of problems.

The thesis is divided into four main parts. In the first part **the checking of the features of tension clamps** Skl14 in comparison with the requirements was done. Namely

- Tensile test ($f_y = 1289 - 1376$ MPa; $f_u = 1392 - 1492$ MPa).
- Fatigue test of the material of the tension clamp (parameters of fatigue curve $m = 23181$, $\log c = 75,765$; contractual fatigue limit $997,56$ MPa).
- Metallography (decarburization of the surface of the tension clamp was found), measurement of hardness ($434 - 455$ HV30).
- Corrosion features – comparison of the tension clamp without special anticorrosion surface and with anticorrosion surface KTL (ca 11x better results).
- Measurement of the clamping force – with the special equipment from Vossloh ($10,01$ kN a $10,56$ kN for one tension clamp), according to ČSN EN 13146-7 ($17,78$ kN for two tension clamps). The requirements of [3] were not fulfilled in case of EN standard measurement. The requirements of [4] were fulfilled in both cases.

Generally – the requirements given for the tension clamps were mostly fulfilled.

MKP analysis of the tension clamps

- The values of the statical preload were found by using different shifts - $12,6$ mm, $12,8$ mm, 13 mm (theoretical shift value), $13,2$ mm a $13,4$ mm. On the surface of the tension clamp von Mises stress 1902 MPa was identified. On the surface the value of von Mises stress was ca 10x higher than in the middle of the tension clamp.
- Combination of vertical and horizontal load of tension clamp was analysed. It has been found that the larger the amount of the horizontal load, the more the value of the maximum stress shifts from the angular guide insert to the center of the outer arm of the flexible clamp.

Methodology for evaluating the condition of flexible clamps Skl14 in operated lines

- 1) Assessment of the response on the statical preload
 - Assessment of the shift.
 - Assessment of the stress.
 - Assessment of the clamping force
- 2) Assessment of the cracking of the tension clamp
 - Fractography analysis.
- 3) Assessment of corrosion.

- Evaluation of percentage weight loss.
 - Evaluation of the remaining wire diameter.
- 4) Assessment of the response on dynamical loading
- Identification of surface stress on the tension clamp caused by traffic.
 - Identification of vertical and horizontal forces caused by railway vehicles.
 - Identification of vertical and horizontal movements.
 - Assessment of fatigue damage.
- 5) Assessment of acceleration
- Assessment of RMS.
 - Assessment of corrugation.

Verification of methodology

All the above mentioned measurements were performed in the curve with radius 190 m (D=56 m, V=50 km/h) on the track 502A Kolín – Nymburk.

Fractography identified that fatigue damage was a main cause for the cracking of the tension clamp. Strain gauges were used for the measurement of stresses on the tension clamps. Static preload (von Mises stress) was identified with a value of 1794,91 - 2137,03 MPa (middle part of the tension clamp). Maximum Von Mises stress from the passing railway vehicles was identified with a value of 288,43 MPa (outer spring arm) and 159,92 MPa (middle part of the tension clamp). These measurements were used for the assessment of fatigue damage. The total service life of the clamp was set at 1.75 years based on calculations. This correlates very well with the actual service life of the clamps in the given place (approx. 2.5 years). Measurement of vertical and horizontal movements of rails identified the higher movements in horizontal direction than are allowed for the tension clamp. Assessment of acceleration clearly identified that the highest values of acceleration are caused by corrugation.

The clamping force was evaluated with respect to corrosion attack of the clamps. The clamping force limit value was set at 8 kN / clamp with a tolerance of ± 0.5 kN using the measuring device Vossloh. Clamps with a remaining wire diameter of less than 12 mm (the original wire diameter was 13 mm) and a weight of less than 470 g did not meet this criterion. Special attention should be paid to clamps removed from heavily loaded tracks. In this case, the clamping force is not dominated by the corrosion loss of the material of the flexible clamps, but by the effect of repeated loading. If this occurs, the clamps must be assessed for fatigue damage and the residual service life determined (Chapter 7.4.4).

Literatura

- [1] ČSD S4/3, Předpis pro správu a udržování železničních přejezdů a přechodů, účinnost od 1. 9. 1987.
- [2] Vyhláška č. 104/1997 Sb. Ministerstva dopravy a spojů ze dne 23. dubna 1997, kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích v platném znění.
- [3] Technické podmínky dodací č. 1/SŽDC/07 pro pružné svěrky Vossloh. 1.1.2008.
- [4] České dráhy, s. o., divize dopravní cesty, o. z., Obecné technické podmínky pro pružné svěrky a spony, č. j. 60 788 / 99 – 013. 2000.
- [5] ČSN EN 13481-2 + A1. Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění: Část 2: Systémy upevnění pro betonové pražce. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [6] ČSN EN 13146-4 + A1. Železniční aplikace – Kolej – Metody zkoušení systémů upevnění: Část 4: Účinek opakovaného zatížení. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [7] ČSN EN 13146-6. Železniční aplikace – Kolej – Metody zkoušení systémů upevnění: Část 6: Vliv nepříznivých vnějších podmínek. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [8] ČSN EN 13146-8. Železniční aplikace – Kolej – Metody zkoušení systémů upevnění: Část 8: Provozní ověřování. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [9] ČSN EN 13146-9+A1. Železniční aplikace – Kolej – Metody zkoušení systému upevnění: Část 9: Stanovení tuhosti. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [10] ČSN EN ISO 9227. Korozní zkoušky v umělých atmosférách: Zkoušky solnou mlhou. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [11] STRAIL. STRAIL [online]. 2014 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://www.strail.cz/produkty-strail-detail-8>.
- [12] Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, SŽDC S3, Železniční svršek, účinnost od 1. října 2008 ve znění změny č. 1 (účinnost od 1. října 2011), změny č. 2 (účinnost od 1. října 2014), změny č. 3 (účinnost od 1. března 2019).
- [13] UNIS. UNIS [online]. 2014 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: http://www.prejedyunis.maxtron.cz/soubory/katalog_dilcu.pdf
- [14] BRENS. BRENS [online]. 2014 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://www.brens.cz/products.htm>
- [15] ŽPSV. ŽPSV [online]. 2014 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://www.zpsv.cz/Produkt.aspx?lang=cz&cat=KP&sku=dopr-stavby&skup=prefabrikaty-pro-zeleznicni-prejedy-zadlazby-a-zakryty&prod=prejedy-panel-brens-vnejsi-100>

- [16] ŽPSV. ŽPSV [online]. 2014 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://www.zpsv.cz/Produkt.aspx?lang=cz&cat=KZ&sku=pozemni-stavby&skup=pruzkum-trhu&prod=zeleznicni-prejezd-brens>
- [17] VOSSLOH. VOSSLOH [online]. 2014 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: http://www.vossloh-fastening-systems.com/en/produkte_2010/betonschwellen/w_14/w_14.html.
- [18] ČSN EN 10089. Oceli válcované za tepla na zušlechtněné pružiny: Technické podmínky dodací. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [19] Materiál od Ing. Dubského (Vossloh). Praha, 2014 - 2015.
- [20] ŠEBESTOVÁ, Hana. Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii [online]. 1. -: -, 2012 [cit. 2019-07-02]. ISBN -. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
- [21] KALENDOVÁ, Andrea. Metody testování vlastností organických povlaků díl 1.: Korozně-inhibiční účinnost organických povlaků. Univerzita Pardubice: Fakulta chemicko-technologická Ústav polymerních materiálů, 2001. ISBN 80-7194-398-3.
- [22] D. Veselý, A. Kalendová: Anticorrosion efficiency of Zn_xMg_yAl₂O₄ core-shell spinels in organic coatings, Progress in Organic Coatings, Volume 62, Issue 1, March 2008, Pages 5–20.
- [23] Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, Praha; ČSN 03 8102: Vyhodnocování korozních zkoušek podle korozních úbytků; 21. 5. 1986., zrušena 1. 1. 1995.
- [24] Strain Gauges [online]. HBM [cit. 2017-11-30]. Dostupné z: <http://www.hbm.cz/wp-content/uploads/s3996.pdf>
- [25]: KREJČÍŘÍKOVÁ, Hana. Železniční stavby - výpočtové modely železničního svršku: doplňkové skriptum. Vyd. 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1991, 58 s. ISBN 80-010-0711-1.
- [26]: DANILENKO, FROLOV, ROMANOV a MORAS. Über das Messen der Horizontalkräfte an der Schiene. DEF - Die Eisenbahntechnik. 1979, č. 27.
- [27] Plášek, Zvěřina, Svoboda, Mockovčiak; Železniční stavby. Železniční svršek a spodek, CERM, 2004.
- [28] VOSSLOH. VOSSLOH [online]. 2019 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: https://www.vossloh.com/01_product_finder/VFS/System-W-14/Vos_Prodktbroschuere_W14_EN.pdf
- [29] Ing. Vladimír Tomandl: Experimentální analýza vybraných systémů kolejnicových upevnění. Brno. 2016. 240 s., 180 s. příl. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
- [30] ČSN EN 50125-3: Drážní zařízení - Podmínky prostředí pro zařízení - Část 3: Zabezpečovací a sdělovací zařízení. -. Praha: Český normalizační institut, 2003.

- [31] Valehrach, Plášek; Vlnkovitost kolejnic; Sborník přednášek semináře pořádaného VOŠ a SPŠ Děčín ve dnech 20. a 21. února 2019; ISBN 978-80-905733-6-9.
- [32] Adamek; Podložky pod ložnou plochou pražce a jejich pozitivní vliv na geometrickou polohu koleje; VTS ČD č. 21/2006
- [33] Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, Pozastavení vkládání upevnění W 14NT, 10.09.2018.
- [34] Experimentální mechanika [online]. 2003 [cit. 2014-10-02]. ISBN -. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/_studium_/opory/Experimentalni_mechanika.pdf.
- [35] ČSN EN 13146-7: Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 7: Stanovení svěrné síly. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [36] AUER, Florian, Rodolphe POTVIN, Otto PLÁŠEK a Miroslava HRUZÍKOVÁ. Podpražcové podložky v koleji. NŽT - Nová železniční technika. 2015, 2015(1), 21 - 28.
- [37] Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb, 2002, závěrečná zpráva (neveřejná), Namáhání železničního svršku při $V = 200 \text{ km.h}^{-1}$.
- [38] Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb, 2004, závěrečná zpráva (neveřejná), Namáhání železničního svršku při rychlosti 230 km.h^{-1} .
- [39] Hruzíková; Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb, 2012, dizertační práce; Vliv podpražcových podložek na kvalitu kolejové jízdní dráhy.
- [40] Volf; ČVUT, Fakulta dopravní, 2012, bakalářská práce, Výpočtové modelové chování pružné spony upevnění kolejnice.
- [41] Volf; ČVUT, Fakulta dopravní, 2014, diplomová práce, Numerická studie chování pružného upevnění kolejnice k pražci.
- [42] KESHAVARZIAN, Hasan, Sodayf AHADI a Saeed MOHAMMADZADEH. Assessment of fracture reliability analysis of crack growth in spring clip type Vossloh SKL14. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O Journal of Risk and Reliability* · March 2014. 2014.
- [43] FERRENO, Diego, José Antonio CASADO, Isidro Alfonso CARRASCAL, Soraya DIEGO, Estela RUIZ, María SAIZ, José Adolfo SAINZ-AJA a Ana Sabel CIMENTADA. Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system. In: *Engineers Structures*. Elsevier, 2019, s. 553-563.
- [44] A. Bednarczyk, Head of Research & Development, email z 17.01.2019.
- [45] A. Wroblewski, Vossloh, Sales Director Eastern Europe, email z 10.01.2019.

- [46] ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [47] ASTM G85-11, Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.
- [48] ZČU v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.kme.zcu.cz/kmet/ppe/teorie/12_natp_02.pdf
- [49] ČSN EN 1993-1-9 ed. 2: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-9: Únava. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [50] Culek; Univerzita Pardubice, DFJP, Katedra dopravní infrastruktury, 2002, dizertační práce; Hodnocení únavové životnosti ocelových konstrukcí při složitém namáhání.
- [51] Kohout; Univerzita Pardubice, DFJP, 2009, dizertační práce; Výzkum kontaktní geometrie dvoukolí-kolej při průjezdu vozidel oblouky malých poloměrů.
- [52] Mapy.cz [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: www.mapy.cz
- [53] ČSN EN 13674-1+A1: Železniční aplikace - Kolej - Kolejnice - Část 1: Vignolovy železniční kolejnice o hmotnosti 46 kg/m a větší. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [54] Culek; Univerzita Pardubice, DFJP, 1998, diplomová práce; Analýza přesnosti predikce únavové životnosti ocelových železničních mostů.
- [55] ENGINEERING ARCHIVES® [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: http://www.engineeringarchives.com/les_fatigue_meanstressequations.html
- [56] Goodman, J., Mechanics Applied to Engineering, Longman, Green & Company, London, 1899.
- [57] Culek; Univerzita Pardubice, ČVUT, 2007, habilitační práce, Vliv teploty a vlastní tíhy na únavovou životnost ocelového mostu s prvkovou mostovkou

Vlastní publikace

8.5 Publikační činnost doktoranda související s tématem dizertační práce

PĚTIOKÝ, Marek, Eva SCHMIDOVÁ, Petr HANUS a Bohumil CULEK. METALOGRAFIE PRUŽNÉ SVĚRKY SKL14. Hradec Králové: ISBN 978-80-87952-07-8, 2014.

PĚTIOKÝ, Marek, Eva SCHMIDOVÁ, Bohumil CULEK a Petr HANUS. Problems of the level crossings. In: International Congeres on Advanced Railway Engineerings: Proceedings. Istanbul: -, 2015, s. 102-106.

PĚTIOKÝ, Marek, Culek BOHUMIL, Kalendová ANDRÉA a Kohl MIROSLAV. Zkoumání korozní odolnosti pružných svěrek Skl14. In: SEMDOK2015. Žilina: Žilinská univerzita / EDIS, 2015, 157 - 160. ISBN 978-80-554-0981-8.

PĚTIOKÝ, Marek, Schmidová EVA, Hanus PETR a BOHUMIL. Fraktografie pružné svěrky Skl14. In: JUNIORSTAV 2015. Brno: VUT v Brně, 2015, s. 183. ISBN 978-80-214-5091-2.

PĚTIOKÝ, Marek, Bohumil CULEK, Andréa KALEDOVÁ a Miroslav KOHL. The Investigation of the Corrosion Resistance of the Tension Clamps Skl14. In: Materiálové inžinierstvo: Materials engineering : The Scientific Journal of the Faculty of Mechanical Engineering University of Žilina, Slovak Republic. Žilina: Žilinská univerzita, Strojnická fakulta, 2015, s. 95-100. ISSN 1335-0803. Dostupné také z: <http://ojs.mateng.sk/index.php/Mateng/article/view/168>.

PĚTIOKÝ, Marek, Bohumil CULEK, Petr Vnenk. Měření napjatosti pružných svěrek v provozu. Brno: VUT Brno, 2018.

8.6 Publikační činnost doktoranda související nepřímo s tématem dizertační práce

Pětioký, Jirků; Legislativa vztahující se k interoperabilitě a připravované změny technických specifikací pro interoperabilitu subsystému infrastruktura; 10. Fórum koľajovej dopravy; Bratislava; 03/2014

Pětioký, Čech, Souček, Tomandl; Požadavky TSI týkající se mostů a tunelů a zkušenosti z posuzování železničních mostů a tunelů na požadavky interoperability; Železniční mosty a tunely 2014; 23. 1. 2014; sborník str. 63 – 68.

Tomandl, Pětioký, Felgr, Jirků, Posuzování subsystému Infrastruktura dle TSI ve fázi projektu, Vědeckotechnický sborník ČD č. 35/2013.

Felgr, Jirků, Tomandl, Pětioký, Zkušenosti z posuzování interoperability významných staveb železniční infrastruktury, Železnice 2012, 29. 11. 2012.

PĚTIOKÝ, Marek (spoluautor). Autor pasáží věnovaných železničním svršku a spodku VZO a MZO, Y/Q TEST. 2013, č. 0.

PĚTIOKÝ, Marek. Posuzování stavby Elektrizace trati Zábřeh na Moravě - Šumperk. Y/Q TEST. 2014, č. 1.

Seznam příloh

- Příloha A** Grafické výsledky tahové zkoušky
- Příloha B** Sledování průběhu koroze vzorků při zkoušce neutrální solnou mlhou dle ČSN EN ISO 9227
- Příloha C** Sledování průběhu koroze vzorků při ponorové zkoušce v roztoku elektrolytu
- Příloha D** Hlavní napětí na svěrkách zjištěná při utahování
- Příloha E** Přehled změřených vozidel
- Příloha F** Průběhy hlavních napětí na svěrkách, Y a Q při průjezdech železničních vozidel
- Příloha G** Záznamy pro výpočet Q
- Příloha H** Záznamy příčných a svislých posunů kolejnice
- Příloha I** Záznamy zrychlení v časové a frekvenční oblasti
- Příloha J** FFT analýza z efektivních hodnot zrychlení RMS
- Příloha K** Fotografie zkoušených svěrek pro zkoušku svěrné síly