

**Ministerstvo dopravy a výstavby SR
Sekcia cestnej dopravy a pozemných komunikácií**

**ANALÝZA VYUŽITEĽNOSTI NEDEŠTRUKTÍVNYCH
MAGNETICKÝCH METÓD PRE MONITOROVANIE STAVU
CESTNÝCH ZVODIDIEL S OHĽADOM NA ICH FUNKČNÉ
VLASTNOSTI**

ROZBOROVÁ ÚLOHA

2022

OBSAH

1	Všeobecné údaje	3
2	Cieľ rozborovej úlohy (RÚ)	3
2.1	Distribúcia RÚ	3
2.2	Súvisiace a citované právne predpisy	3
2.3	Súvisiace a citované normy	3
2.4	Súvisiace a citované Technické predpisy rezortu	4
2.5	Použité skratky	4
3	Úvod	5
4	Analýza stavu koróznej ochrany (hrúbky Zn vrstvy) cestných zvodidiel - povlak	5
4.1	Analýza skutkového stavu koróznej ochrany	6
4.2	Teória Barkhausenovho šumu	10
4.3	Praktické meranie – protikorózna ochrana	10
4.4	Záver posúdenie stavu koróznej ochrany (hrúbky Zn vrstvy) cestných zvodidiel	15
5	Posúdenie stupňa plastického pretvorenia cestných zvodidiel – deformácia	15
5.1	Analýza testovaných vzoriek cestných zvodidiel pre deformáciu	15
5.2	Praktické meranie – deformácia	16
5.3	Záver posúdenia stupňa plastického pretvorenia cestných zvodidiel - deformácia	28
6	Problematika a charakteristika cestných zvodidiel	28
6.1	Porovnanie rozmerov, hmotnosti a profilov zvodidiel	28
6.2	Chemické zloženie, tvrdosť a mikroštruktúra	31
6.3	Hrúbka Zn ochrannnej vrstvy	32
6.4	Mechanické vlastnosti	34
6.5	Ohyb zvodnice	38
6.6	Barkhausenov šum	41
7	Analýza využiteľnosti Barkhausenovho šumu na monitorovanie stavu zvodníc po deformáciách získaných z reálnej praxe – overovacia fáza využiteľnosti MBN	43
7.1	Záver overovacej fázy využiteľnosti MBN na monitorovanie stavu zvodníc po deformáciách získaných z reálnej praxe	48
8	Definovanie prahových hodnôt vybraných magnetických parametrov rozhodujúcich pre opätovné použitie zvodnice	48
9	Záver	49

1 Všeobecné údaje

Objednávateľ:	Slovenská správa ciest
Zhotoviteľ:	Žilinská univerzita v Žiline - Stavebná fakulta, Strojnícka fakulta, Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov, Výskumné centrum
Doba riešenia:	máj 2021 – október 2022
Riešiteľ:	prof. Ing. Miroslav Neslušan, PhD. doc. Ing. Martin Pitoňák, PhD. doc. Ing. Ján Ondruš, PhD. Ing. Lukáš Ďuriš

2 Cieľ rozborovej úlohy (RÚ)

Cieľom rozborovej úlohy (RÚ) je demonštrovať overenie využiteľnosti magnetických metód na posúdenie stavu koróznej ochrany (hrúbky Zn vrstvy) zvodidiel, t.j. povlaku. Ide o posúdenie heterogenity hrúbky Zn vrstvy na zvodidlách nedeštruktívnym spôsobom in situ.

Ďalším cieľom RÚ bol výskum zameraný na analýzu stupňa plastického pretvorenia cestných zvodidiel, t.j. ich deformácie. V laboratórnych podmienkach boli preskúmané zmeny magnetických parametrov, ak sú zvodidlá vystavené ťahu, ohybu a pod., s rôznym stupňom plastickej deformácie. Týmto sa fakticky modeluje stav, keď sú zvodidlá skutočne poškodené deformačným procesom v dôsledku dopravných nehôd. V zásade sa takto dá určiť miera energie uloženej v zvodnici v dôsledku jej plastického pretvorenia a s tým súvisiaca zostatková energia, ktorú je zvodnica schopná absorbovať s ohľadom na jej možné ďalšie využitie. Zo zistených magnetických signálov nakoniec urobiť kalibračnú závislosť s prahovými hodnotami, ktoré by určovali vyhovujúci a nevyhovujúci stav zvodidiel.

Pre účely rozborovej úlohy sa riešiteľský kolektív zaoberal aj používaním neoriginálnych prvkov zvodidlového systému, ktoré sa vyskytujú na stavbách v rámci Slovenska. V tejto časti rozborovej úlohy sme sa zamerali na porovnanie funkčných vlastností originálnej a neoriginálnej zvodnice s cieľom posúdiť, do akej miery použitie neoriginálneho prvku ovplyvní bezpečnosť. Tímu riešiteľov sa podarilo zabezpečiť z nemenovanej stavby na Slovensku originálnu a neoriginálnu zvodnicu.

2.1 Distribúcia RÚ

Elektronická verzia RÚ sa zverejní na webovom sídle SSC: www.ssc.sk

2.2 Súvisiace a citované právne predpisy

- [Z1] Zákon č. 133/2013 Z. z. o stavebných výrobkoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov;
- [Z2] Vyhláška MDVRR SR č. 162/2013 Z. z., ktorou sa ustanovuje zoznam skupín stavebných výrobkov a systémy posudzovania parametrov v znení neskorších predpisov;
- [Z3] Nariadenie Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) č. 305/2011 z 9. marca 2011, ktorým sa ustanovujú harmonizované podmienky uvádzania stavebných výrobkov na trh a ktorým sa ruší smernica Rady 89/106/EHS v platnom znení;
- [Z4] Zákon č. 135/1961 Zb. Zákon o pozemných komunikáciách (cestný zákon);
- [Z5] Zákon č. 8/2009 Z. z. o cestnej premávke a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov;
- [Z6] Vyhláška MV SR č. 9/2009 Z. z., ktorou sa vykonáva zákon o cestnej premávke a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov;

2.3 Súvisiace a citované normy

STN 73 6100	Názvoslovie pozemných komunikácií
STN 73 6101	Projektovanie ciest a diaľnic
STN 73 6110	Projektovanie miestnych komunikácií
STN EN 1317-1 (73 6030)	Záchytné bezpečnostné zariadenia na pozemných komunikáciách. Časť 1: Terminológia a všeobecné kritériá na skúšobné metódy

STN EN 1317-2 (73 6030)	Záchytné bezpečnostné zariadenia na pozemných komunikáciách. Časť 2: Výkonnostné triedy, preberacie kritériá na nárazové skúšky a skúšobné metódy pre zvodidlá vrátane zábradlových zvodidiel
STN EN 1317-3 (73 6030)	Záchytné bezpečnostné zariadenia na pozemných komunikáciách. Časť 3: Výkonnostné triedy, preberacie kritériá na nárazové skúšky a skúšobné metódy pre tlmiace bezpečnostné zariadenia
STN EN 1317-5+A2 (73 6030)	Záchytné bezpečnostné zariadenia na pozemných komunikáciách. Časť 5: Požiadavky na výrobky a hodnotenie zhody záchytných bezpečnostných zariadení pre vozidlá (Konsolidovaný text)
STN EN ISO 6892-1	Kovové materiály. Skúška ťahom. Časť 1: Skúška ťahom pri teplote okolia
STN EN ISO 6507-1	Kovové materiály. Vickersova skúška tvrdosti. Časť 1: Skúšobná metóda
STN 42 0469/b	Metalografické hodnotenie oceľových plechov a pásov.
STN EN ISO 148-1	Kovové materiály. Skúška rázovej húževnatosti podľa Charpyho. Časť 1: Skúšobné metódy
STN EN 60584-1	Termočlánky. Časť 1: Špecifikácie a tolerance elektromotorických napätí (EMF)

2.4 Súvisiace a citované Technické predpisy rezortu

[T1]	TP 010	Zvodidlá na pozemných komunikáciách
[T2]	TP 108	Zvodidlá na pozemných komunikáciách. Oceľové zvodidlá
[T3]	TKP 10	Záchytné bezpečnostné zariadenia
[T4]	TPV 167/SK/2020 + Dodatok č. 1/2021	Oceľové zvodidlá Liberty Ostrava
[T5]	TPV 1/2017	SVOM Oceľové zvodidlo AXIMUM

2.5 Použité skratky

Bulk	Materiál s pôvodnou matricou
C	Chemický prvok uhlík
Fe	Chemický prvok železo
FWHM	Full width at half maximum (Plná šírka na polovici výšky)
KCV	Vrubová húževnatosť pre vrub tvaru V
MBN	Magnetic Barkhausen noise (Barkhausenov šum)
PP	Peak position (Hodnota polohy maxima)
RD	Rolling direction (Pozdĺžny smer merania)
RMS	Efektívna hodnota signálu (Root mean square)
RÚ	Rozborová úloha
SR	Medza klzu (Strain rate)
STN	Slovenská technická norma
TD	Transversal direction (Kolmý smer merania)
TP	Technický predpis
TPV	Technické podmienky výrobcu
Zn	Chemický prvok zinok

3 Úvod

Cestné zvodidlá pomáhajú znižovať počet smrteľných a vážnych dopravných nehôd. Ich použitie je zadefinované príslušnými technickými predpismi (TPR), slovenskými technickými normami (STN) a použitie konkrétnych zvodidlových systémov je určené Technickými podmienkami výrobcu (TPV), ktoré schvaľuje v Slovenskej republike len MDV SR. Zvodidlové systémy sú navrhnuté tak, aby boli schopné pohltiť časť energie zachyteného vozidla a jeho vyvedenie späť do jazdného pruhu. V závislosti od požadovanej úrovne zadržania sú zvodidlové systémy testované pri rýchlostiach 65 – 110 km/h, s nárazovým uhlom 8°, 15° a 20°. [T 1].

Jedným z kľúčových prvkov zvodidiel, aby dokázali bezpečne plniť svoju funkciu, je ich schopnosť odolávať korózii vplyvom prostredia a pôsobením vonkajších vplyvov (mráz, teplo, pôsobenie chemických materiálov) a v neposlednom rade aj mechanickému poškodeniu. Pred týmito vplyvmi sú zvodidlové systémy zväčša chránené zinkovým povlakom.

Riešiteľský tím nemá vedomosti o existencii štúdie venovanej životnému cyklu zvodidiel, t.j., či zvodidlový systém, resp. jeho časti, dokážu plniť svoju bezpečnostnú funkciu aj po značnom časovom období, napr. po 10 - 20 rokoch. Taktiež nemáme vedomosť o existencii metódy na posúdenie kondície zvodidiel in situ.

V rámci predmetnej rozborovej úlohy sme sa snažili v laboratórnych podmienkach určiť hranicu plastickej deformácie zvodnice, pri ktorej dokáže stále bezpečne plniť svoju funkciu, a aké zmeny nastanú pri meraní Barkhausenovho šumu.

Vzhľadom na skutočnosť, že na slovenskom trhu sa vyskytuje viacero systémov bezpečnostných zachytých zariadení schválených pre použitie na pozemných komunikáciách v SR, bol pre účely skúmania zvolený historicky najpoužívanější systém, a to NH4. Tento typ zvodidiel sa na území SR používa historicky už niekoľko desiatok rokov, a i napriek určitým obmenám zvodidlových systémov na cestnej sieti za nové systémy iných typov v poslednej dekáde je typ NH4 najčastejšie sa vyskytujúcim zvodidlom. Preto aj v ďalších fázach rozborovej úlohy, kedy sa budú porovnávať materiálové charakteristiky reálne poškodených zvodidiel, resp. zvodidiel s veľmi dlhou dobou používania (20 rokov a viac), budú skúmané zvodidlá typu NH4.

Dá sa predpokladať, že pri overení použiteľnosti nedeštruktívnej magnetickej metódy na overenie stavu zvodidiel na systéme NH4 bude možné po vykonaní kalibračnej skúšky stanoviť závislosť s prahovými hodnotami aj na ostatné zvodidlové systémy

4 Analýza stavu koróznej ochrany (hrúbky Zn vrstvy) cestných zvodidiel – povlak

Pre analýzu stavu koróznej ochrany bola použitá zvodnica A-NH-94 od výrobcu Liberty Ostrava a.s. [T4]. Zvodnica bola na experimentálne účely poskytnutá jedným zo správcov pozemných komunikácií. Merania sa zameriavali na určenie vstupných hodnôt novej zvodnice pokiaľ ide o hrúbku protikoróznej ochrany, ako aj o magnetické vlastnosti pôvodného nového materiálu.

Merania sa uskutočnili v laboratóriu Výskumného centra Žilinskej univerzity v Žiline.



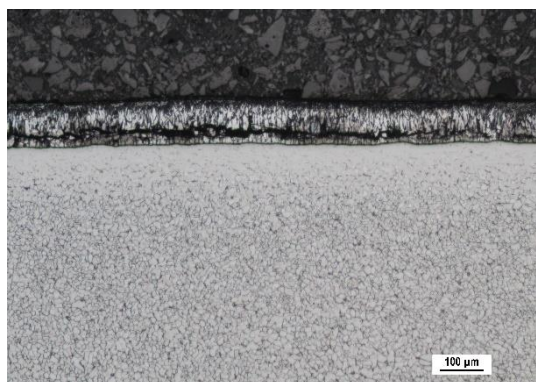
Obrázok 1 – Fotografia cestných zvodidiel, typ NH4 - zvodnica (experimentálna vzorka)

4.1 Analýza skutkového stavu korózneho ochrany

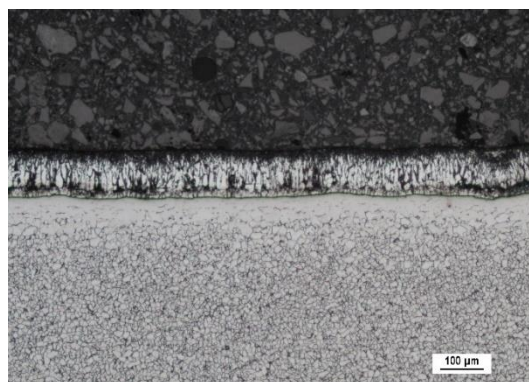
Variabilita (premenlivá hrúbka Zn vrstvy - ochrany) sa monitorovala prostredníctvom magnetických meraní tak, že na pásnici sa najskôr realizovalo meranie hrúbky Zn vrstvy prostredníctvom prístroja CM 8825FN, ktorý sa bežne využíva na meranie hrúbok vrstiev a povlakov (napr. na stavebných oceľových konštrukciách). Prístroj pracuje na princípe tzv. „magnetického odtrhu“. To znamená, že nemagnetická (rozumej neferomagnetická) vrstva leží na magnetickej (feromagnetickej) matrici. Prístroj využíva kontrast v rozhraní medzi materiálmi s výrazne odlišnými magnetickými vlastnosťami a je možné ho nakalibrovať prostredníctvom priložených kalibrov o známych hrúbkach.

Prvotné meranie s využitím tohto prístroja ukázalo, že hrúbka Zn vrstvy sa mení v rozsahu od cca 105 μm až do 235 μm . Hodnotu nad 180 μm je však možné namerať len na miestach, ktoré nie sú tvorené len Zn vrstvou pochádzajúcej z chemickej reakcie pri zinkovaní (vysvetlenie neskôr).

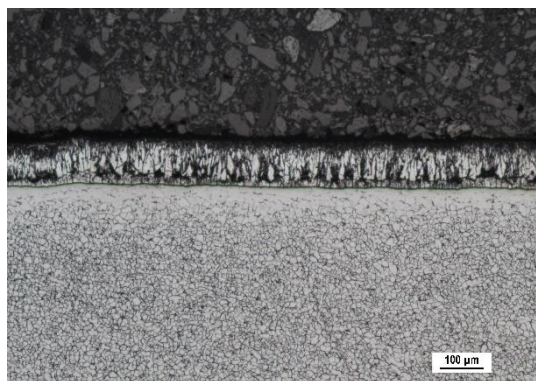
Hrúbka Zn vrstvy sa bežne pohybuje od 120 μm do 150 μm . V miestach rôznej hrúbky Zn vrstvy boli urobené priečne rezy (rezy sa robili na metalografickej píle Metalco). Výrezy boli robené v smere po dĺžke pásnice a ich rozmer bol cca 20 mm. Takto vyrezané vzorky sa za tepla zaliali do živice, následne brúsili, leštili a finálne leptali 1 % nitalom cca 5 sekúnd. Fotografie priečných rezov ukazuje Obrázok 2.



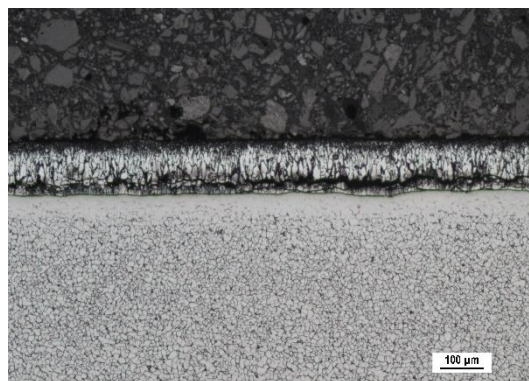
a) 106 μm



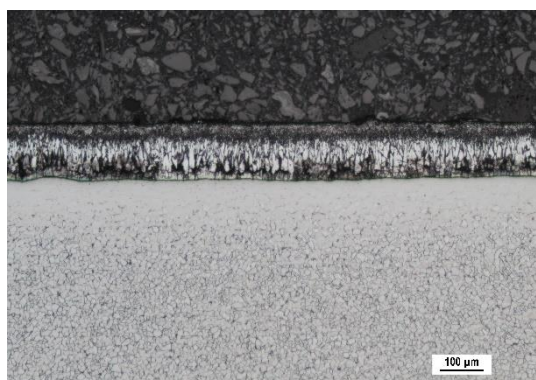
b) 122 μm



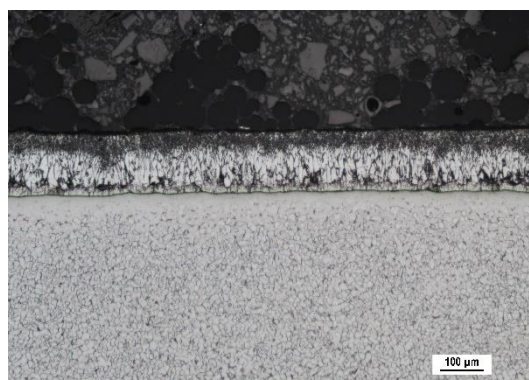
c) 135 μm



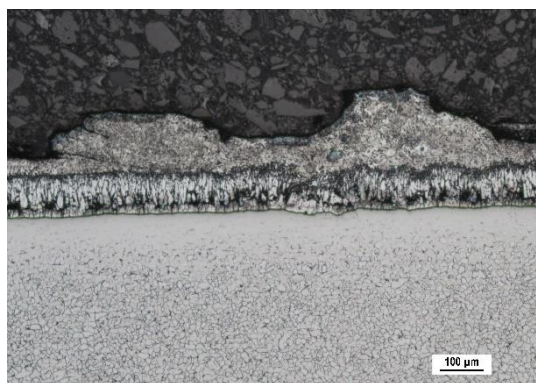
d) 145 μm



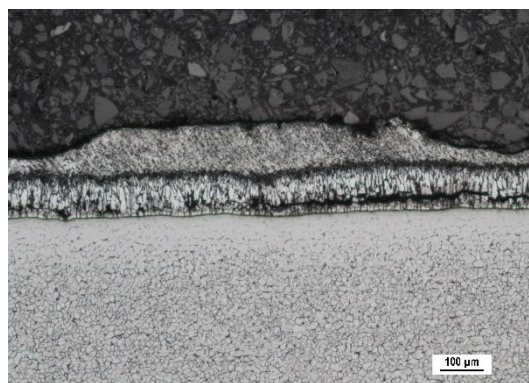
e) 153 μm



f) 180 μm



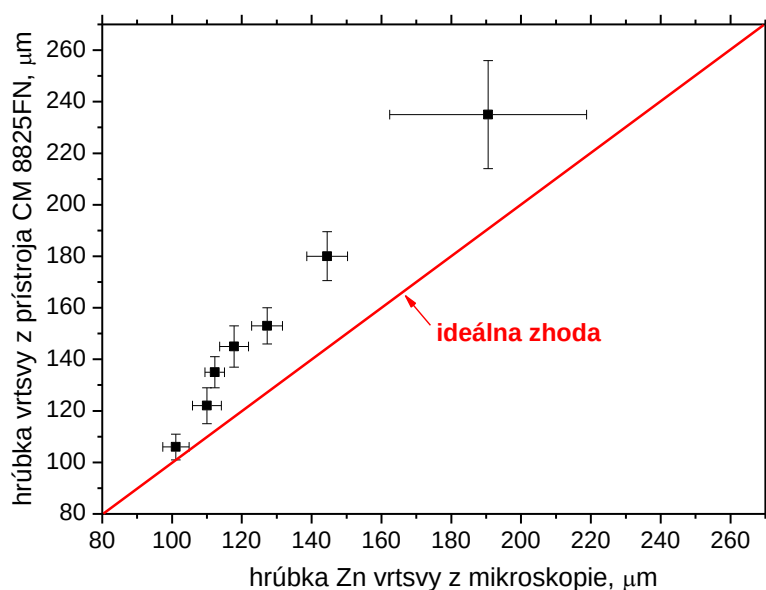
g) 235 μm



h) 235 μm

Obrázok 2 – Fotografie priečných rezov Zn vrstiev rôznej hrúbky, leptané nital 1 %, hodnoty hrúbok vrstiev z prístroja CM 8825FN

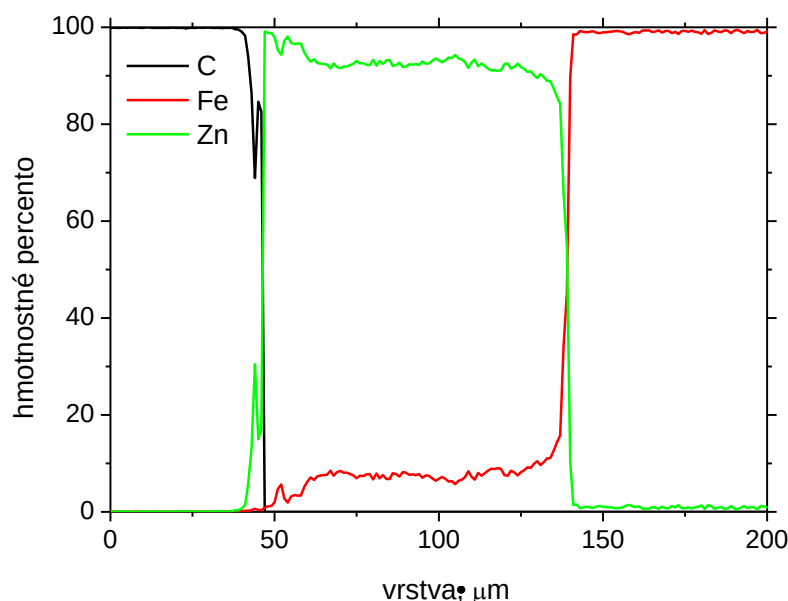
Tieto fotografie boli robené na mikroskope Neophot 2 v programe Niss elements. Priemerná hrúbka Zn vrstvy sa určila ako priemerná hodnota z piatich rôznych miest. Metalografická analýza potvrdila, že tak, ako rastie hrúbka Zn vrstvy meraná prístrojom CM 8825FN, rastie aj hodnota hrúbky Zn vrstvy, merané prostredníctvom metalografie – pozri Obrázok 3.



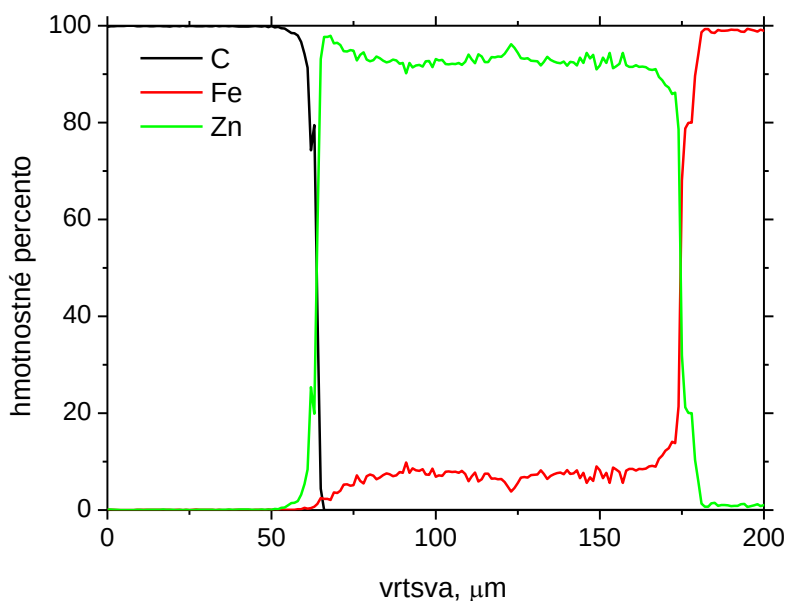
Obrázok 3 – Porovnanie hrúbky Zn vrstvy z analýzy priečných rezov podľa Obrázka 2 a z merania prístrojom CM 8825FN

Obrázok 3 však zároveň ukazuje, že hodnoty hrúbky Zn vrstvy z prístroja CM 8825FN sú mierne vyššie vo všetkých prípadoch. Uvedený rozdiel je spôsobený prítomnosťou difúznej vrstvy, ktorú je možné vidieť na všetkých priečných rezoch zobrazených na Obrázku 2. Difúzna vrstva sa na Obrázku 2 nachádza pod jasne odlíšiteľnou Zn vrstvou a javí sa ako biela (bledá) gradientná vrstva. Jej existencia je daná difúziou Zn do Fe matrice. Zn teda nevytvára len ochrannú Zn vrstvu na povrchu, ale zároveň aj difunduje do Fe matrice pásnice počas chemickej reakcie zinkovania, ktorá sa realizuje pri vysokých teplotách.

Tento aspekt ukazuje aj profil chemického zloženia naprieč rezom Zn vrstvy zo živice cez Zn vrstvu až do Fe matrice pásnice tak, ako ich ukazujú Obrázok 4 a Obrázok 5 (analýza chemického zloženia sa robila na mikroskope Zeiss). Obrázok 4 a Obrázok 5 ukazujú, že prechod medzi Zn vrstvou a Fe matricou nie je „ostrý“, ale vidno gradient chemického zloženia Zn a Fe. Ďalej Obrázok 4 a 5 tiež ukazujú, že Zn vrstva nie je zložená z čistého Zn, ale 10 % ochrannej vrstvy tvorí Fe z matrice. Väčšia indikovaná Zn vrstva z prístroja CM 8825FN je teda spôsobená prítomnosťou difúznej vrstvy.



Obrázok 4 – Chemická analýza cez Zn vrstvu, hrúbka Zn vrstvy 106 μm – Obrázok 2a



Obrázok 5 – Chemická analýza cez Zn vrstvu, hrúbka Zn vrstvy 180 μm – Obrázok 2f

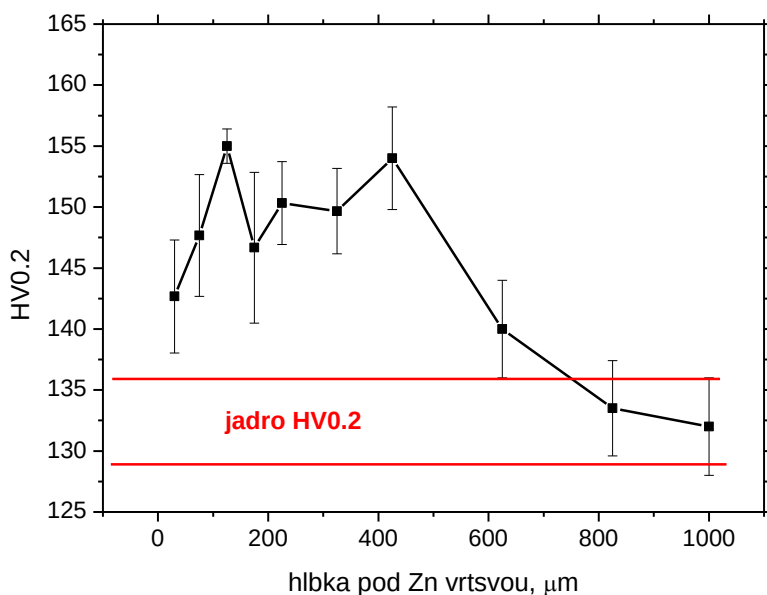
Ako už bolo uvedené, Zn hrúbky nad 180 μm sa vyskytujú zriedkavo a len v tých miestach, kde na pásnici po zinkovaní zostala tavenina Zn a pri chladnutí stuhla. Tento prípad ukazuje Obrázok 2g, h. Obrázok 2 g, h ukazuje výrazne vyššiu hrúbku Zn vrstvy ako aj skutočnosť, že jej charakter je odlišný ako v prípadoch, keď je hrúbka Zn vrstvy menšia. Zn vrstva, ako ju ukazuje Obrázok 2 g, h, sa skladá z časti pochádzajúcej z chemickej reakcie priamo pri zinkovaní a nad ňou ležiacou Zn vrstvou, ktorá vznikla len stuhnutím taveniny Zn po vytiahnutí pásnice zo zinkového kúpeľa. Takéto miesta sú ľahko odlišiteľné aj voľným okom, ako to ukazuje Obrázok 6.



Obrázok 6 – Fotografia povrchu so Zn vrstvou, ako ju ukazuje v priečnom reze Obrázok 2g, h

Vzhľadom na skutočnosť, že hrúbka Zn vrstvy je odlišná, a teda aj podmienky zinkovania sú v rôznych miestach rôzne, realizovalo sa meranie mikrotvrdomosti. Keďže zinkovanie je proces, ktorý sa prevádza pri zvýšených teplotách, robilo sa toto meranie aj so zreteľom na možnosť, či tento proces spôsobuje tepelné popustenie povrchu. Meranie sa realizovalo na prístroji Innova Test 400TM pri záťaži 200 g počas 10 sekúnd na vzorkách zaliatych za tepla do živice.

Obrázok 7 ukazuje, že tvrdosť HV0.2 je až do hĺbky cca 750 μm pod povrchom vyššia v porovnaní s jadrom (bulk). Toto je spôsobené pravdepodobne valcovaním pásnice za studena.



Obrázok 7 – Profil tvrdosti v Fe matrici pod Zn vrstvou – viac-menej rovnaké pre všetky hrúbky Zn vrstiev

Obrázok 7 taktiež ukazuje, že HV0.2 tesne pod povrchom klesá v súvislosti s tepelným popustením povrchu Fe matrice pri zinkovaní. Opakované merania na priečnych rezoch na viacerých vzorkách (ako ich zobrazuje Obrázok 2) ukazujú, že profil mikrotvrdosti je pre všetky hrúbky Zn vrstvy viac-menej veľmi podobný.

4.2 Teória Barkhausenovho šumu

Na nedeštruktívne meranie hrúbky Zn vrstvy prostredníctvom magnetických techník bola vybraná metóda Barkhausenovho šumu.

Barkhausenov šum

Každý feromagnetický materiál (kde patria aj feritické ocele) má tzv. doménovú štruktúru. Znamená to, že v takomto materiáli sú oblasti, kde atómy majú na relatívne veľkú vzdialenosť rovnakú magnetickú orientáciu. Celá táto oblasť sa nazýva magnetická doména a susediace domény sa líšia smerom magnetickej orientácie. Znamená to tiež, že medzi doménami existujú doménové steny. Tieto steny predstavujú istý počet atómových rovín (cca 300 v našom prípade), v rámci ktorých sa magnetická orientácia viac-menej plynule mení z jedného smeru do druhého, pričom tieto smery zodpovedajú smerom susediacich domén.

Ak je materiál vystavený napr. premenlivému magnetickému poľu v čase, tak domény a im prislúchajúce steny majú tendenciu natáčať sa do smeru budiaceho magnetického poľa. Domény, ale hlavne doménové steny, sa však nepohybujú obvykle plynule, ale skokovito, a pri svojich skokoch vytvárajú elektromagnetické impulzy, ktoré je možné detegovať na povrchu. Doménové steny pri svojom skokovitom pohybe kolidujú so všetkými poruchami mriežky, ako sú dislokácie, hranice zŕn, precipitáty, iné fázy a podobne. Čím je hustota týchto mriežkových porúch väčšia, tým sa doménové steny pohybujú ťažšie, na kratšiu vzdialenosť, na ich pohyb je potrebné silnejšie magnetické pole a v konečnom výsledku sú aj nimi generované pulzy slabšie.

Systém merania funguje tak, že merací senzor má budiacu časť (obvykle v tvare U) a detekčnú časť (snímaciu cievku). Úlohou budiacej časti je rozhýbať doménové steny. Detekčná časť má za úlohu merať elektromagnetické pulzy vygenerované doménovými stenami pri ich skokovitom pohybe.

Na Obrázku 8b je senzor s budiacimi magnetmi, uprostred ktorých sa nachádza detektor elektromagnetických pulzov.

4.3 Praktické meranie – protikorózna ochrana

Na analýzu (meranie) Barkhausenovho šumu (magnetic Barkhausen noise – MBN) bol využitý prístroj RollScan rady 300 (Obrázok 8a) a softvér MircoScan 600. Podmienky merania sú uvedené v Tabuľke 1.

Tabuľka 1 – Magnetizačné podmienky

Magnetizačné napätie	5 V
Magnetizačná frekvencia	125 Hz
Vzorkovacia frekvencia	6.7 MHz
Magnetizačné pole	$\pm 4.6 \text{ kA.m}^{-1}$
Frekvenčný rozsah detegovaných MBN pulzov	10 ÷ 1000 kHz
Počet MBN burstov	10
MBN senzor	S1-18-12-01

Meranie sa realizovalo v smere dĺžky pásnice (rolling direction – RD) ako aj v smere kolmom (transversal direction – TD), pretože pri výrobe pásnice dochádza k vytvoreniu slabej magnetickej anizotropie. Analyzované boli 3 základné parametre Barkhausenovho šumu a to:

- efektívna (rms) hodnota Barkhausenovho šumu (ďalej označovaná len **MBN**),
- hodnota polohy maxima obálky Barkhausenovho šumu (ďalej označované **PP** – z anglického peak position),
- počet **MBN pulzov**.



a) prístroj RollScan

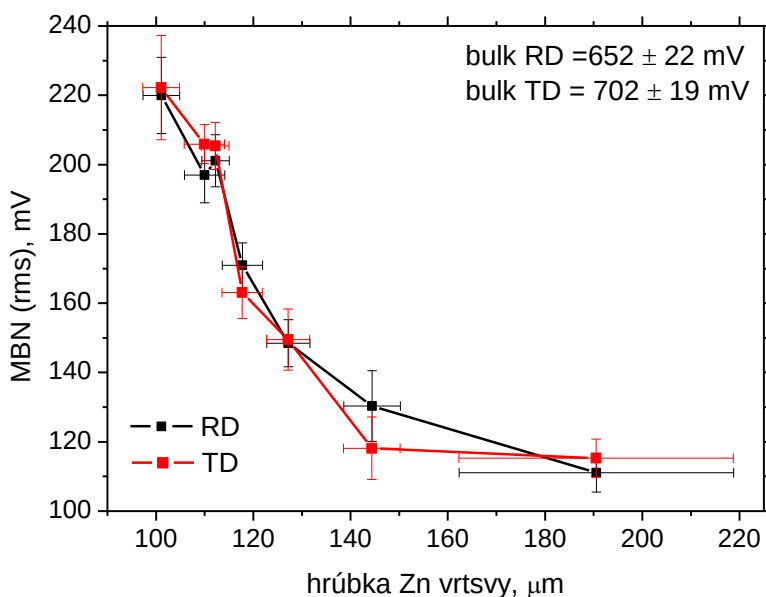


b) senzor S1-18-12-01

Obrázok 8 – Prístroj RollScan a senzor S1-18-12-01 (reálne rozmery senzora 70 x 30 x 20mm)

4.3.1 Efektívna (rms) hodnota Barkhausenovho šumu

Obrázok 9 ukazuje, aký vplyv má rastúca hrúbka Zn vrstvy na MBN. Ako vidieť, MBN hodnota s rastúcou hrúbkou výrazne klesá v oboch smeroch a veľkosť MBN je pre smer RD a TD približne rovnaká. Pre vyššie hodnoty Zn vrstvy dochádza ale k saturácii priebehu (strmosť závislosti sa výrazne znižuje). Tento pokles strmosti ale z praktického hľadiska nie je významný, pretože rozdiel medzi najvyššími Zn hrúbkami je spôsobený tým, že Zn vrstva v prípade najvyššej hrúbky je vytvorená aj stuhnutím taveniny na povrchu, čo je možné pozorovať aj voľným okom, ako je uvedené vyššie (pozri Obrázok 6).

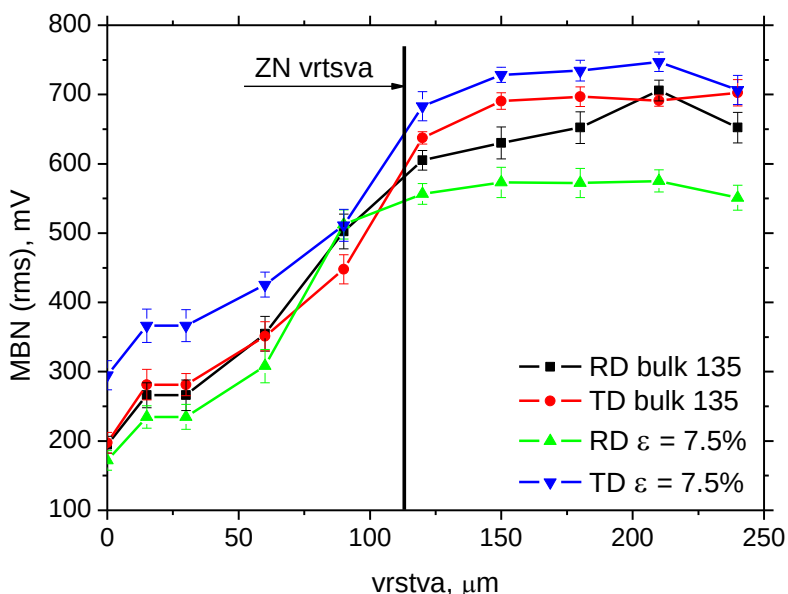


Obrázok 9 – Vplyv hrúbky Zn vrstvy na rms hodnotu MBN

Poznámka: Pre vytvorenie grafov na Obrázku 9, Obrázku 12 a Obrázku 13 boli použité hrúbky Zn vrstvy merané na metalo-grafických výbrusoch priečnych rezov.

Pokles hodnôt MBN s rastúcou hrúbkou Zn vrstvy, ako ich ukazuje Obrázok 9, je spôsobený dvoma základnými aspektmi. S rastúcou hrúbkou Zn vrstvy sa oslabuje magnetické pole v Fe matici po Zn vrstvu, čím sa spomaľuje pohyb doménových stien, a taktiež niektoré steny sa nehýbu, pretože pole je slabé. Okrem toho dochádza k útlmu elektromagnetických pulzov vygenerovaných stenami počas ich prechodu cez Zn vrstvu smerom k voľnému povrchu, kde je senzor. Platí, že čím je hrúbka Zn vrstvy väčšia, tým je útlm silnejší a oslabenie magnetického poľa v Fe matici intenzívnejšie.

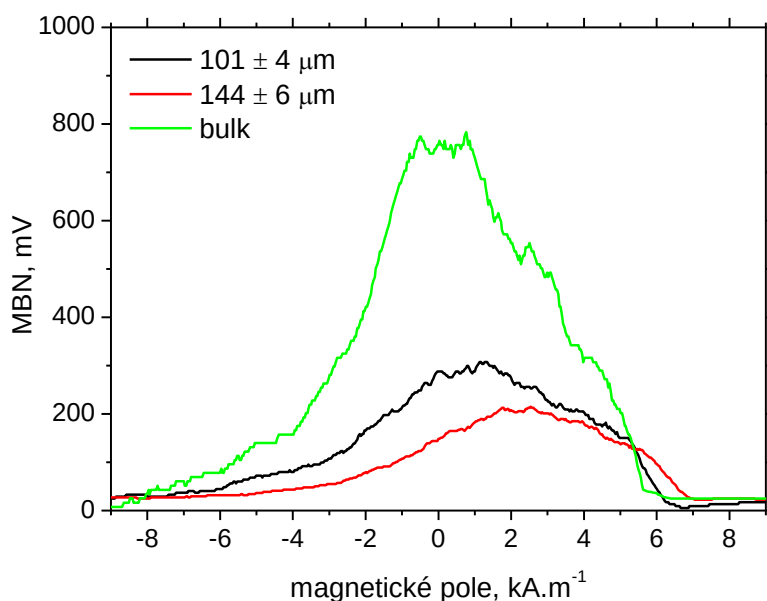
Obrázok 10 ukazuje, ako sa mení MBN hodnota, ak sa z povrchu pásnice odleptávajú postupne vrstvy rôznej hrúbky. Odleptávanie sa realizovalo elektrolytickým odlešťovaním v soľnom roztoku, pričom v podstate ide o proces umelého zmenšovania hrúbky Zn vrstvy cez jej úplné odleptanie, ďalej odstránenie difúznej vrstvy, až konečne do hlbších vrstiev Fe matrice pásnice, ktorá neobsahuje zinok. Toto meranie sa realizovalo jednak pre pôvodný stav pásnice, ako aj pre vzorku, ktorá bola z pásnice vyrezaná (rozmery 200 x 20 mm) a ktorá bola jednoosím ťahom natiahnutá na úroveň plastickej deformácie (pomerného predĺženia ε o veľkosti 7,5 %). Je zrejmé, že pre oba smery (RD a TD), ako aj oba stavy pásnice (deformovaná i pôvodná) s klesajúcou hrúbkou Zn vrstvy MBN hodnoty prudko rastú. Obrázok 9 taktiež ukazuje, že nárast hodnôt MBN je možné pozorovať aj za hranicou úplného odleptania Zn vrstvy a to z dôvodu prítomnosti difúznej vrstvy. Až po odleptaní difúznej vrstvy dochádza definitívne k stabilizácii MBN hodnôt v hlbších vrstvách pod povrchom.



Obrázok 10 – Zmena MBN pri odleptávaní najšôr Zn vrstvy a následne Fe matrice zvodidla

Obrázok 9 aj Obrázok 10 ukazujú, že MBN je mimoriadne citlivý na variabilnú hrúbku Zn vrstvy na povrchu pásnice, a je teda možné prakticky ho využiť na nedeštruktívne a rýchle monitorovanie.

Okrem MBN hodnôt Barkhausenovho šumu sa skúmala aj využiteľnosť parametra PP. Tento parameter reprezentuje polohu maxima obálky Barkhausenovho šumu, ako ich ukazuje Obrázok 11.

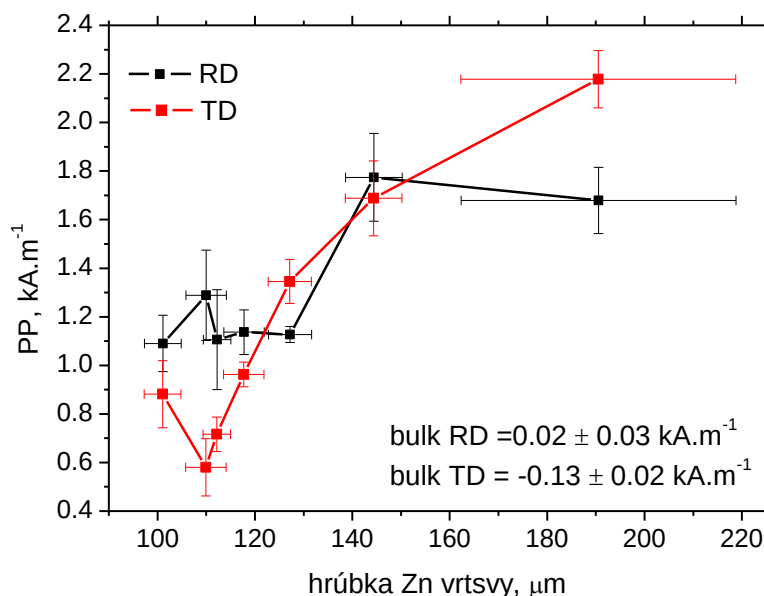


Obrázok 11 – Obálky MBN signálu pre rôzne hrúbky Zn vrstvy a pásnicu bez Zn vrstvy (bulk)

4.3.2 Hodnota polohy maxima obálky Barkhausenovho šumu

Veľkosť MBN pulzov sa s časom a s tým súvisiacou intenzitou magnetického poľa mení. Veľkosť MBN pulzov spočiatku rastie, obvykle v oblasti blízko 0 (tam, kde sa mení znamienko - orientácia magnetického poľa) dosahuje maximum a postupne klesá. Veľkosť obálky, ako aj jej poloha súvisia s tým, aké silné sú MBN pulzy a aké silné magnetické pole treba na pohyb doménových stien.

Na Obrázku 11 je zrejmé, že ak sa na povrchu nenachádza Zn vrstva, tak MBN pulzy sú veľmi silné a poloha maxima je blízko 0. Sumárne tento vplyv demonštruje Obrázok 12, ktorý ukazuje, ako rastie hodnota PP s rastúcou hrúbkou Zn vrstvy.



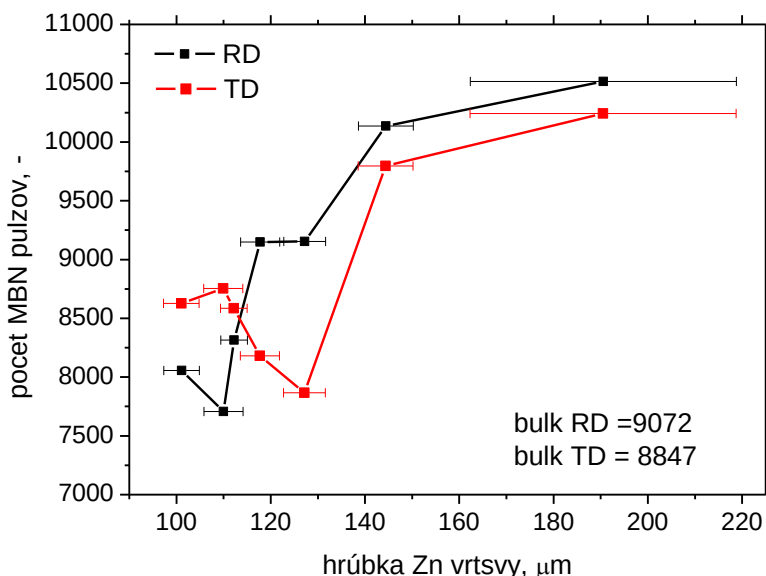
Obrázok 12 – Vplyv hrúbky Zn vrstvy na hodnotu PP Barkhausenovho šumu

Obrázok 12 deklaruje, že vyššiu citlivosť je možné dosiahnuť pri tomto parametri pre smer TD, teda ak sa meria v smere kolmom na dĺžku zvodnice. Obrázok 12 taktiež ukazuje, že pre najvyššie hrúbky Zn vrstvy dochádza k saturácii v smere RD. Prítomnosť Zn vrstvy spôsobí jednak výrazný pokles sily pulzov, ako aj to, že maximum obálky je posunuté do oblasti silnejších magnetických polí. Tento posun je spôsobený tým, že sa zoslabuje reálne magnetické pole v Fe matrici s rastúcou hrúbkou Zn vrstvy, a preto je dominantný pohyb doménových stien dosiahnutý neskôršie.

S ohľadom na využiteľnosť parametra PP pre monitorovanie hrúbky Zn vrstvy sa ukazuje, že aj tento parameter je dostatočne citlivý na zmenu hrúbky Zn vrstvy, ale predovšetkým v smere kolmom na dĺžku zvodnice. Využiteľnosť PP v smere RD je slabšia.

4.3.3 Počet MBN impulzov

Posledným analyzovaným parametrom je počet detegovaných MBN pulzov, ako ich ukazuje Obrázok 13. Ukazuje sa, že počet detegovaných MBN pulzov s hrúbkou Zn vrstvy v zásade rastie predovšetkým v RD smere. V prípade TD smeru vidieť počiatočný pokles počtu pulzov. Softvér MicroScan v tomto prípade využíva tzv. plávajúci prah. Do počtu pulzov sa počítajú tie pulzy, ktoré prekročia vopred stanovenú prahovú hodnotu. Avšak s klesajúcou intenzitou MBN pulzov klesá proporčne aj hodnota prahu. To je dôvod, prečo počet MBN pulzov rastie aj napriek tomu, že ich veľkosť s hrúbkou Zn vrstvy klesá. V zásade je možné konštatovať, že tento parameter nie je príliš vhodný na monitorovanie hrúbky Zn vrstvy. Jednak vývoj počtu MBN pulzov nie je monotónny a rovnako tak miera nárastu počtu pulzov je pomerne malá, t.j., citlivosť tohto parametra je slabšia.



Obrázok 13 – Vplyv hrúbky Zn vrstvy na počet pulzov Barkhausenovho šumu

4.4 Záver posúdenia stavu koróznej ochrany (hrúbky Zn vrstvy) cestných zvodidiel

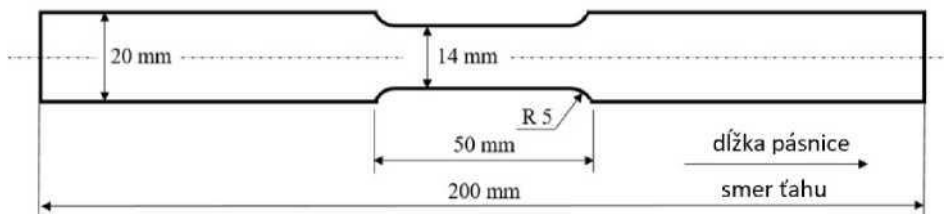
Na základe realizovaných meraní je možné konštatovať, že hrúbku Zn vrstvy na zvodnici je možné pomerne spoľahlivo monitorovať prostredníctvom rms hodnôt MBN a to ako v smere pozdĺžnom, tak aj v smere priečnom. Meranie hrúbky Zn vrstvy prostredníctvom PP parametra je taktiež možné, ale prednostne v smere TD. Všetky tieto parametre vykazujú veľmi dobrú citlivosť na zmenu hrúbky Zn vrstvy.

5 Posúdenie stupňa plastického pretvorenia cestných zvodidiel – deformácia

V laboratórnych podmienkach boli vykonané na novej zvodnici merania pevnosti materiálu. V tejto časti práce sa sledovali zmeny v magnetických parametroch MBM vplyvom deformácie materiálu - zvodidlá vystavené ťahu a pod., s rôznym stupňom plastickej deformácie. Týmto sa fakticky modeluje stav, keď sú reálne zvodidlá poškodené deformačným procesom v dôsledku dopravných nehôd. Cieľom týchto meraní je učiť mieru energie uloženú v zvodnici v dôsledku jej plastického pretvorenia a s tým súvisiacu zostatkovú energiu, ktorú je schopná zvodnica absorbovať s ohľadom na jej možné ďalšie využitie.

5.1 Analýza testovaných vzoriek cestných zvodidiel pre deformáciu

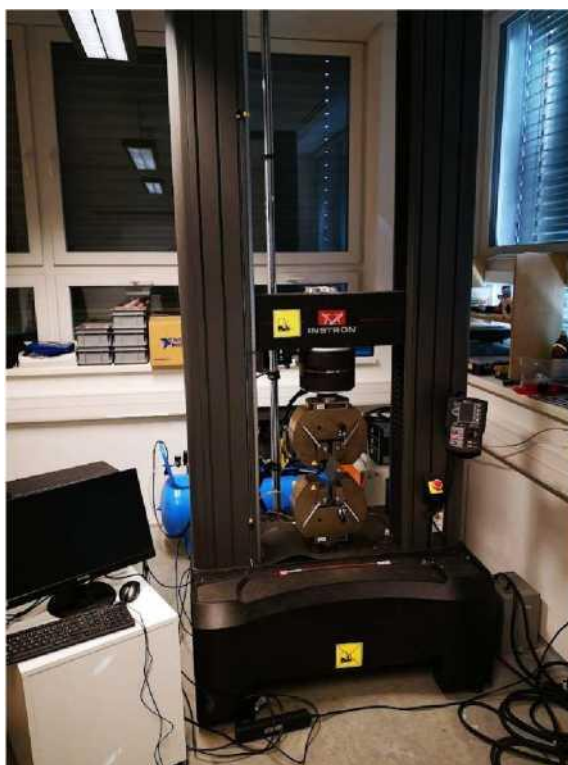
Štúdia využiteľnosti magnetických metód s využitím predovšetkým Barkhausenovho šumu s ohľadom na plastickú deformáciu zvodidiel bola realizovaná prostredníctvom jednoduchého testu, kedy sa vzorky vyrezané zo zvodnice zaťažovali jednoosím ťahom. Rozmer a tvar vzoriek je znázornený na Obrázku 14.





Obrázok 14 – Vzorka pre ťahovú skúšku a skúšku vrubovej húževnatosti

Tvar vzoriek, ako ho ukazuje Obrázok 14, je navrhnutý práve preto, aby sa deformácia koncentrovala v zúženej časti vzorky o dĺžke 50 mm a šírke 14 mm. Vzorky boli ťahané na zariadení Instron 5985 (Obrázok15).



Obrázok 15 – Elektromechanický univerzálny skúšobný stroj Instron 5985

5.2 Praktické meranie – deformácia

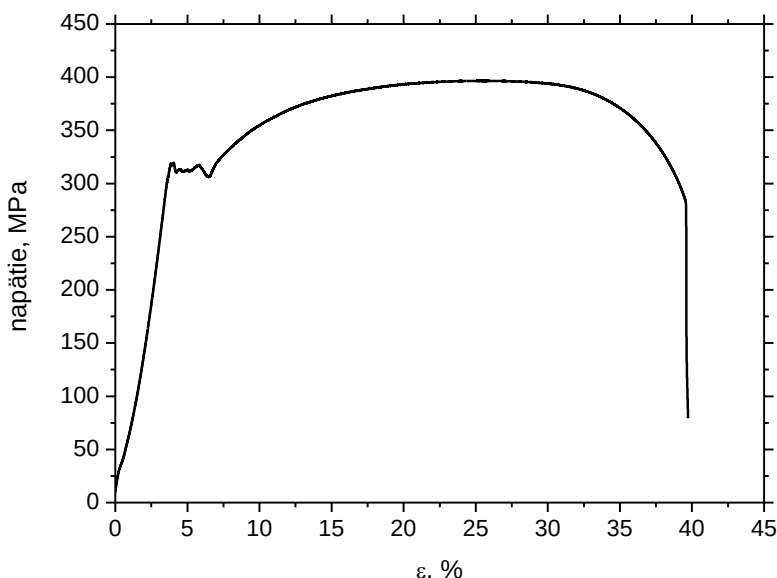
Najskôr bola realizovaná ťahová skúška materiálu, ako ju ukazuje Obrázok 16. Pomerné predĺženie ε je definované ako:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (-, \%) \quad (1)$$

kde:

l - pôvodná dĺžka (v tomto prípade 50 mm),

Δl - predĺženie vzorky (mm).



Obrázok 16 – Závislosť napätia a pomerného predĺženia ϵ na vzorke vyrezanej z pásnice v pozdĺžnom smere

Poznámka: Obrázok 16 ukazuje, že maximálna hodnota ϵ je približne 40 %, ale skutočná je asi o 10 % menšia, pretože v predĺžení vzorky, tak ako je merané priamo na zariadení Instron 5985 bez extenzometra, je zahrnutá aj deformácia rámu a preklz upnutých koncov vzoriek v čelustiach.

Po ťahovej skúške nasledoval proces, kedy sa vzorky opakovane (3 opakovania) naťahovali na vopred stanovené úrovne plastickej deformácie definované prostredníctvom ϵ . Celkovo bolo analyzovaných päť úrovní ϵ s rovnomerným rozstupom a to 7,5 %, 15 %, 22,5 %, 30 % a 37,5 %. Okrem toho bol analyzovaný aj vplyv rýchlosti deformácie, a celkovo boli analyzované 4 rôzne rýchlosti tak, ako ich ukazuje Tabuľka 2. Celkovo tak bolo analyzovaných (spolu s rázovou skúškou) 150 vzoriek. Vzorky boli na konečný tvar vyrobené frézovaním.

Tabuľka 2 – Analyzované rýchlosti deformácie a im odpovedajúce strain rate (SR)

Rýchlosť deformácie, mm.min ⁻¹	Strain rate
1,5	$0,5 \times 10^{-3}$
6	$2,0 \times 10^{-3}$
24	$8,0 \times 10^{-3}$
96	$32,0 \times 10^{-3}$

Po natiahnutí vzoriek na príslušnú úroveň deformácie sa najskôr realizovalo meranie Barkhausenovho šumu za podmienok, ako ich ukazuje Tabuľka 3. Krátka teória ohľadom fyzikálnej podstaty tejto metódy je uvedená v kap. 4.2. venovanej hrúbke Zn vrstvy na pásnici. Na analýzu (meranie) Barkhausenovho šumu (magnetic Barkhausen noise – MBN) bol využitý prístroj RollScan rady 300 a softvér MircoScan 600 (pozri kap. 4.3.).

Tabuľka 3 – Magnetizačné podmienky

Magnetizačné napätie	5 V
Magnetizačná frekvencia	125 Hz
Vzorkovacia frekvencia	6.7 MHz
Magnetizačné pole	$\pm 4.6 \text{ kA.m}^{-1}$
Frekvenčný rozsah detegovaných MBN pulzov	$10 \div 1000 \text{ kHz}$
Počet MBN burstov	10
MBN senzor	S1-18-12-01

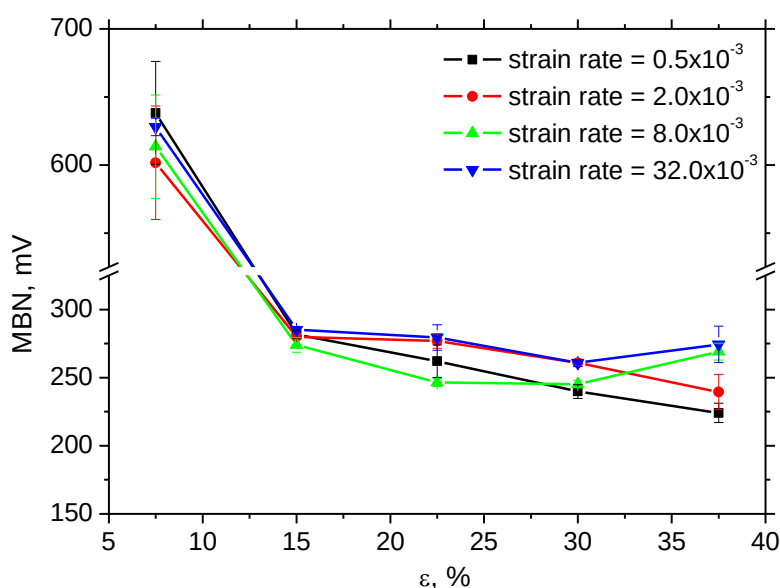
Meranie sa realizovalo v smere dĺžky pásnice (rolling direction – RD), ako aj v smere kolmom (transversal direction – TD), pretože pri výrobe pásnice dochádza k vytvoreniu slabej magnetickej anizotropie. Analyzované boli opäť tri základné parametre Barkhausenovho šumu a to:

- efektívna (rms) hodnota Barkhausenovho šumu (ďalej označovaná len **MBN**),

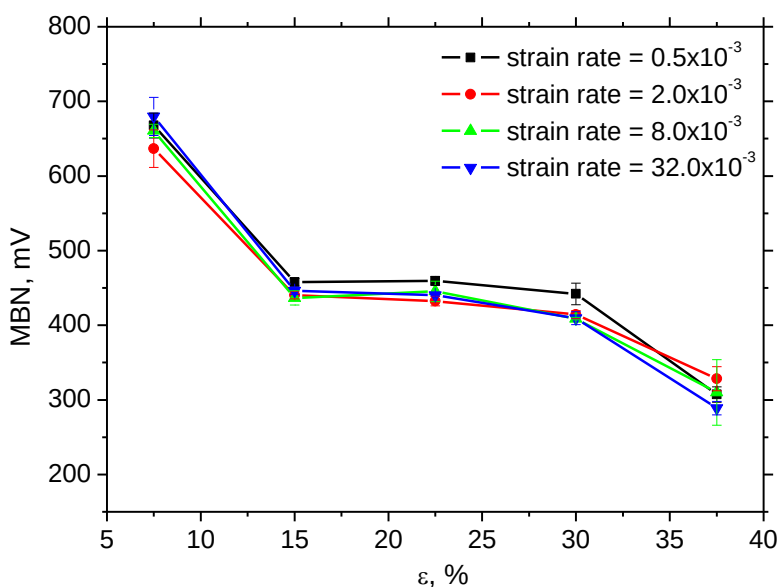
- hodnota polohy maxima obálky Barkhausenovho šumu (ďalej označované **PP** – z anglického peak position),
- počet **MBN pulzov**.

5.2.1 Vplyv deformácie na efektívnu (rms) hodnotu Barkhausenovho šumu

Obrázok 17 a Obrázok 18 ukazujú, že s rastúcou intenzitou deformácie veľkosť MBN klesá. Tento pokles je najvýraznejší v počiatočných štádiách plastického pretvorenia medzi 7,5 % a 15 %. S ďalším pokračovaním plastického pretvorenia tejto deformácie sa tento pokles výrazne spomaľuje. Pokles MBN je spôsobený tým, že s rastúcou plastickou deformáciou rastie aj hustota dislokácií, pretože pohyb dislokácií a ich nukleácia je dominantným mechanizmom plastickej deformácie v tomto prípade. Keďže doménové steny pri spojom pohybe kolidujú s rastúcou hustotou dislokácií, je pochopiteľné, že sila elektromagnetických pulzov, ktoré generujú, je slabšia, a teda aj MBN je menšie. Okrem toho je možné vidieť, že pokles je výraznejší v smere RD (smer ťahu a zároveň smer dĺžky zvodnice) v porovnaní s kolmým smerom. Obrázok 17 a Obrázok 18 taktiež ukazujú, že rýchlosť deformácie vyjadrená v strain rate má veľmi malý vplyv a priebeh zmien MBN je pre všetky rýchlosti viac menej podobný.



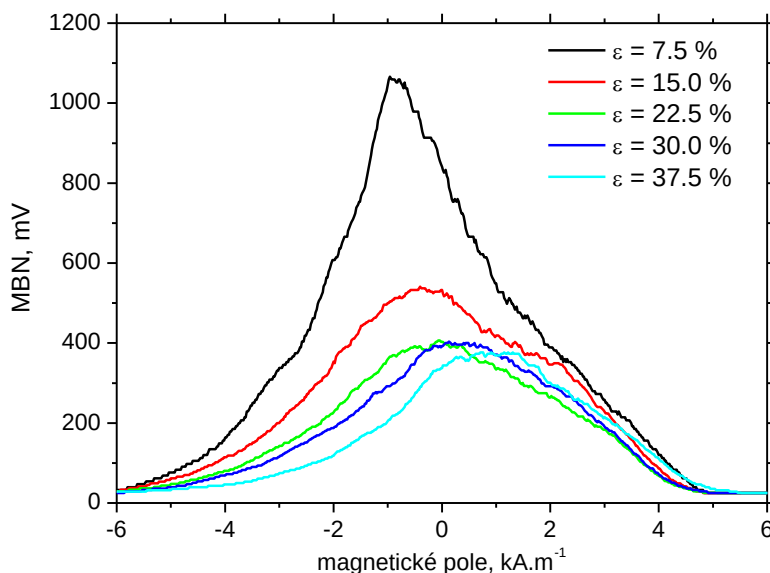
Obrázok 17 – Vplyv ϵ a strain rate na MBN v RD



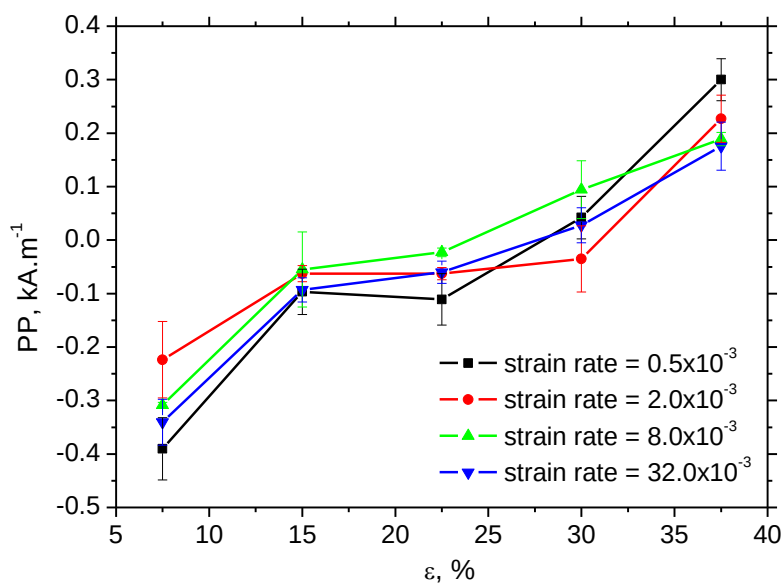
Obrázok 18 – Vplyv ϵ a strain rate na MBN v TD

5.2.2 Vplyv deformácie na hodnotu polohy maxima obálky Barkhausenovho šumu

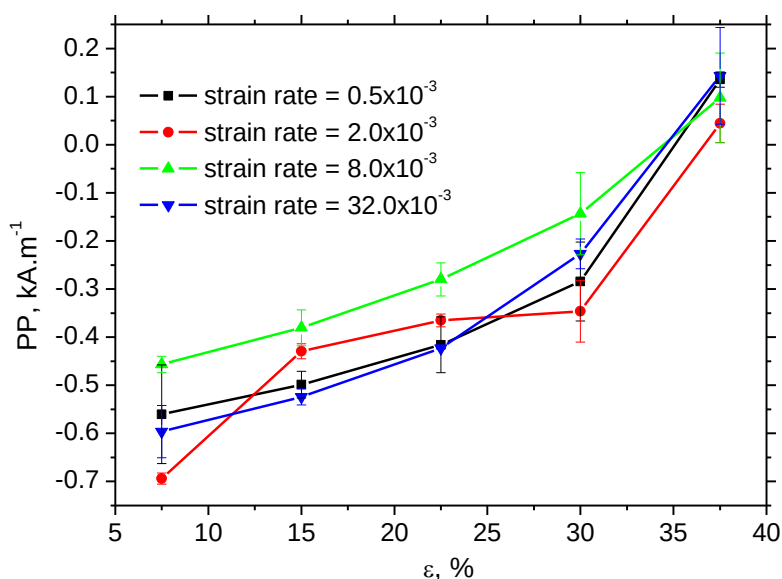
Okrem toho, že klesá MBN, klesá aj s tým súvisiace maximum obálky MBN a posúva sa do silnejších magnetických polí (teda rastie PP - poloha maxima obálky), ako to ukazujú Obrázok 19, Obrázok 20 a Obrázok 21. Nárast PP je v TD a TD veľmi podobný a vplyv rýchlosti deformácie je opäť malý. Obrázok 20 a Obrázok 21 taktiež ukazujú, že na rozdiel od hodnôt MBN, hodnoty PP rastú výrazne aj pri vyšších hodnotách ε . Hodnoty PP v RD sú mierne nižšie v porovnaní s PP v TD.



Obrázok 19 – Obálky MBN v RD a pre strain rate $0,5 \times 10^{-3}$

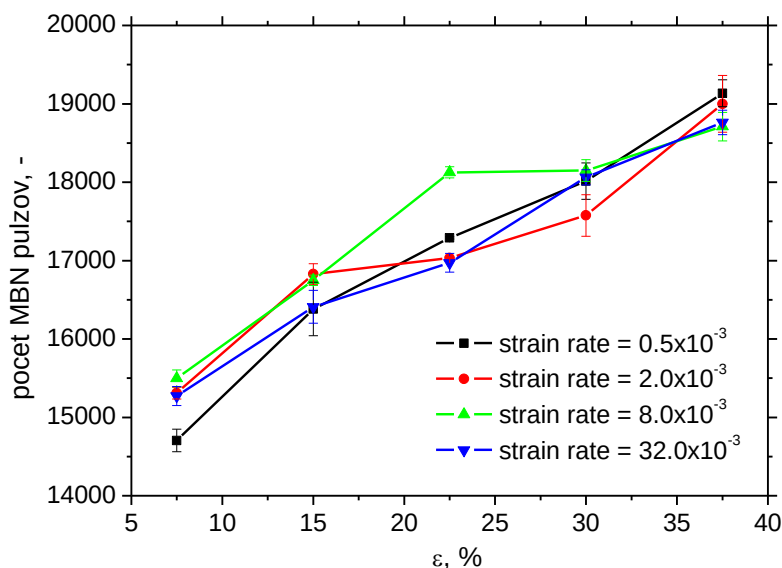


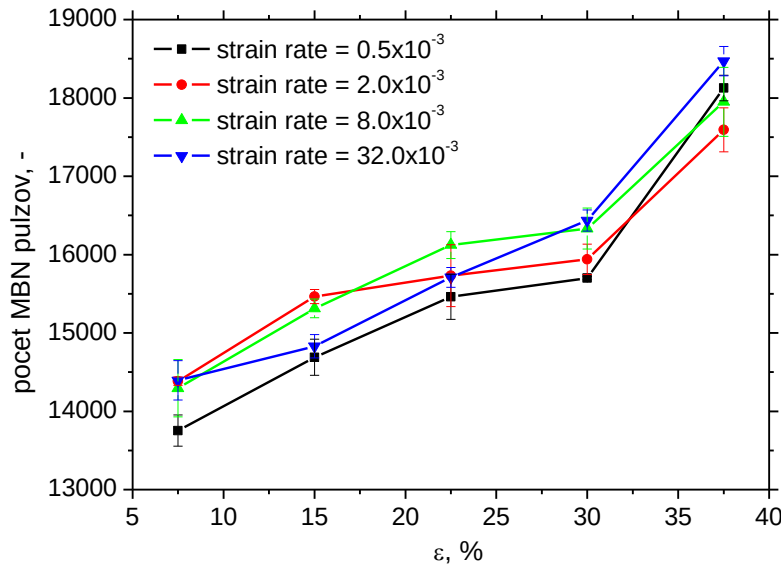
Obrázok 20 – Vplyv ε a strain rate na PP v RD

Obrázok 21 – Vplyv ϵ a strain rate na PP v TD

5.2.3 Vplyv deformácie na počet MBN pulzov

Počet MBN pulzov kontinuálne rastie, pričom tento nárast je opäť „umelo“ generovaný softvérom MicroScan v súvislosti s poklesom sily elektromagnetických pulzov, ktoré doménové steny generujú ako výsledok rastúceho odporu zvyšujúcej sa dislokačnej hustoty. Softvér MicroScan v tomto prípade využíva tzv. plávajúci prah. Do počtu pulzov sa počítajú tie pulzy, ktoré prekročia vopred stanovenú prahovú hodnotu. Avšak s klesajúcou intenzitou MBN pulzov klesá proporčne aj hodnota prahu. To je dôvod, prečo počet MBN pulzov rastie aj napriek tomu, že ich veľkosť s intenzitou plastickej deformácie klesá. Obrázok 22 a Obrázok 23 ukazujú, že počet detegovaných MBN pulzov s ϵ rastie v oboch smeroch. Počet pulzov v RD je mierne vyšší ako v TD a počet pulzov viac-menej rovnomerne rastie v celom rozsahu analyzovaných plastických deformácií ϵ . Vplyv rýchlosti deformácie je opäť malý.

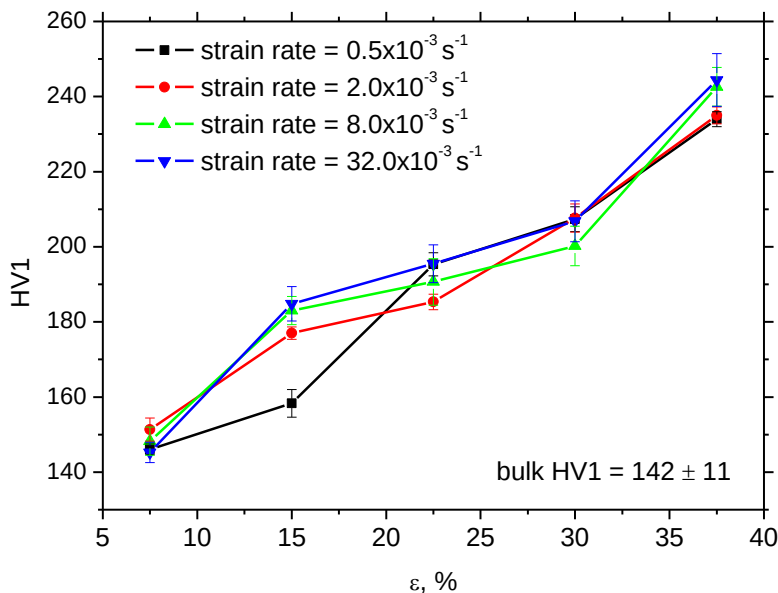
Obrázok 22 – Vplyv ϵ a strain rate na počet MBN pulzov v RD



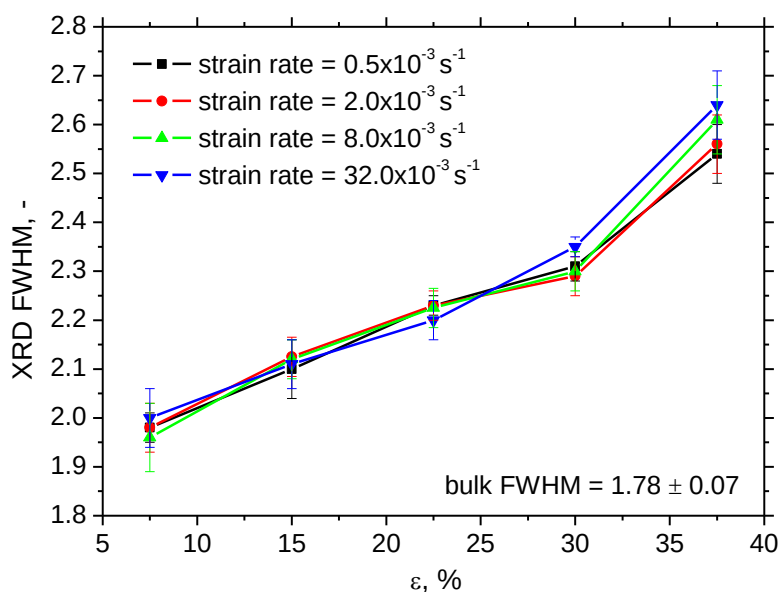
Obrázok 23 – Vplyv ε a strain rate na počet MBN pulzov v TD

5.2.4 Vplyv deformácie na tvrdosť materiálu zvodnice

Obrázok 24 ukazuje, ako sa mení tvrdosť materiálu zvodnice pri jej plastickej deformácii. Tvrdosť bola meraná na prístroji Innova Test 400TM pri záťaži 1 000 g počas 10 sekúnd. Toto meranie, ako aj rozšírenie difrakčného vrcholu (ako ho ukazuje Obrázok 25) potvrdzujú rastúcu dislokačnú hustotu, pretože tvrdosť matrice je v tomto type materiálu priamo funkciou dislokačnej hustoty. Rovnako to platí aj v prípade rozšírenia vrcholu meraného na polovici výšky difrakčného vrcholu (FWHM = full width at half maximum = plná šírka na polovici výšky). Difrakčný vrchol bol meraný prostredníctvom XRD techniky (XRD = X-ray diffraction). XRD meranie bolo realizované na prístroji Proto iXRD Combo (CrKa zdroj žiarenia, skenovací uhol $\pm 39^\circ$ a Braggov uhol 156.4°). Zvyškové napätia v matrici boli vypočítané z difrakčného záznamu na rovine 211. Winholtz & Cohen metóda s použitím elastických konštánt $\frac{1}{2}s_2 = 5.75 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1.25 \text{ TPa}^{-1}$ bola použitá na výpočet zvyškových napätí po plastickej deformácii. Obrázok 24 ako aj Obrázok 25 ukazujú kontinuálny a rovnomerný nárast jednak HV1, ako aj XRD FWHM. Vplyv rýchlosti deformácie je veľmi malý.

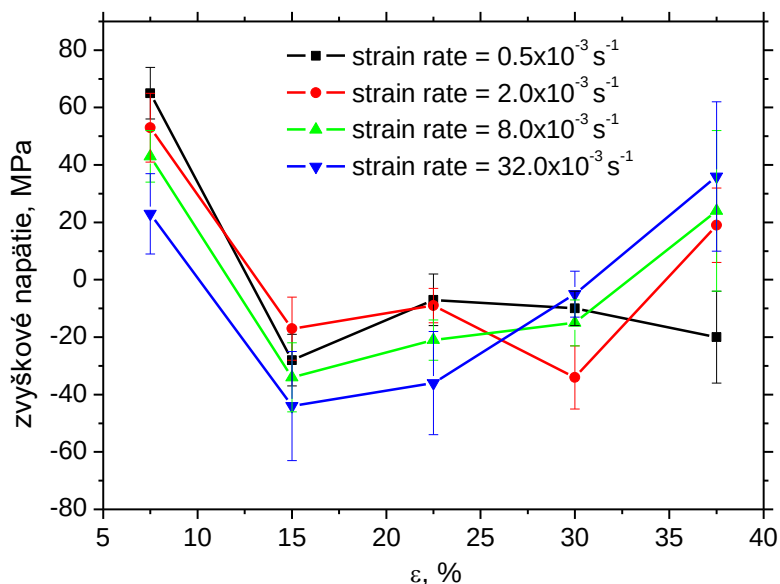


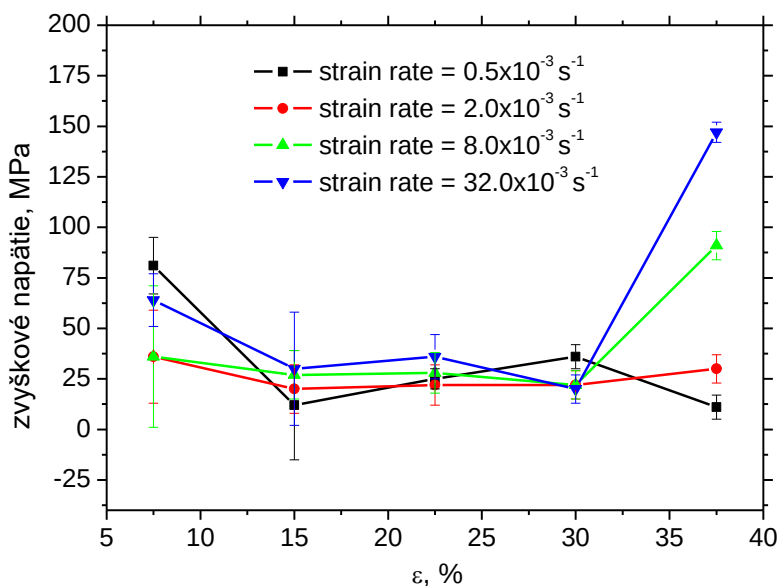
Obrázok 24 – Vplyv ε a strain rate na tvrdosť HV1

Obrázok 25 – Vplyv ε a strain rate na rozšírenie difrakčného vrcholu pri meraní na XRD

5.2.5 Meranie zvyškových napätí materiálu zvodnice

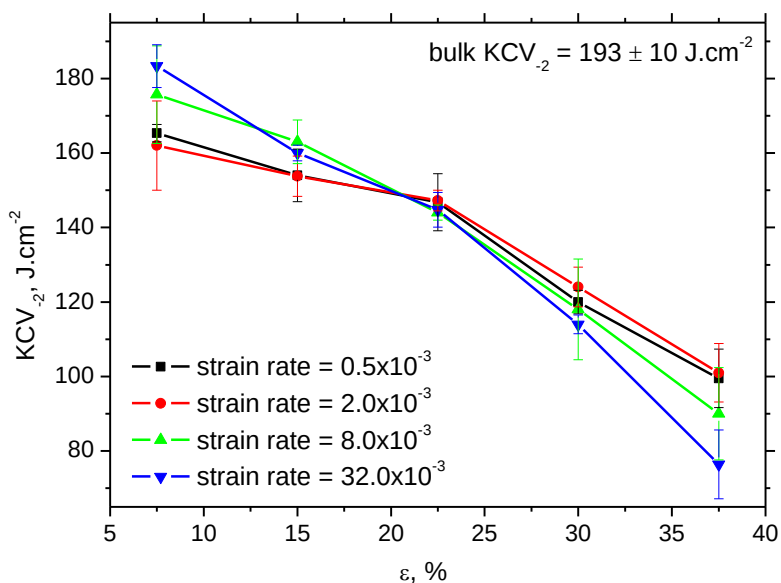
Veľkosť zvyškových napätí spočiatku v oboch smeroch klesá s ε , zostáva viac-menej konštantná pre stredné hodnoty ε a naopak pre $\varepsilon = 37,5$ % v oboch smeroch rastie (pozri Obrázok 26 a Obrázok 27). Citlivosť zvyškových napätí s ohľadom na intenzitu plastickej deformácie je slabá a navyše charakter zmien nie je monotónny. Výraznejšie rozdiely vo veľkosti zvyškových napätí s ohľadom na rýchlosť deformácie je možné pozorovať až pri $\varepsilon = 37,5$ %, kedy veľkosť zvyškových napätí, obzvlášť v smere TD, prudko rastie s rýchlosťou deformácie. Zvyškové napätie v smere TD pri vysokej rýchlosti deformácie predstavuje pomerne veľkú časť celkového napätia, ktoré je matrica schopná absorbovať.

Obrázok 26 – Vplyv ε a strain rate na veľkosť zvyškových napätí v RD



Obrázok 27 – Vplyv ε a strain rate na veľkosť zvyškových napätí v TD

Plastickým pretváraním Fe matrice pásnice klesá veľkosť energie, ktorú je matrica schopná absorbovať pri ďalšom zaťažení. Túto energiu je možné analyzovať prostredníctvom merania vrubovej húževnatosti KCV, ako to ukazuje Obrázok 28.



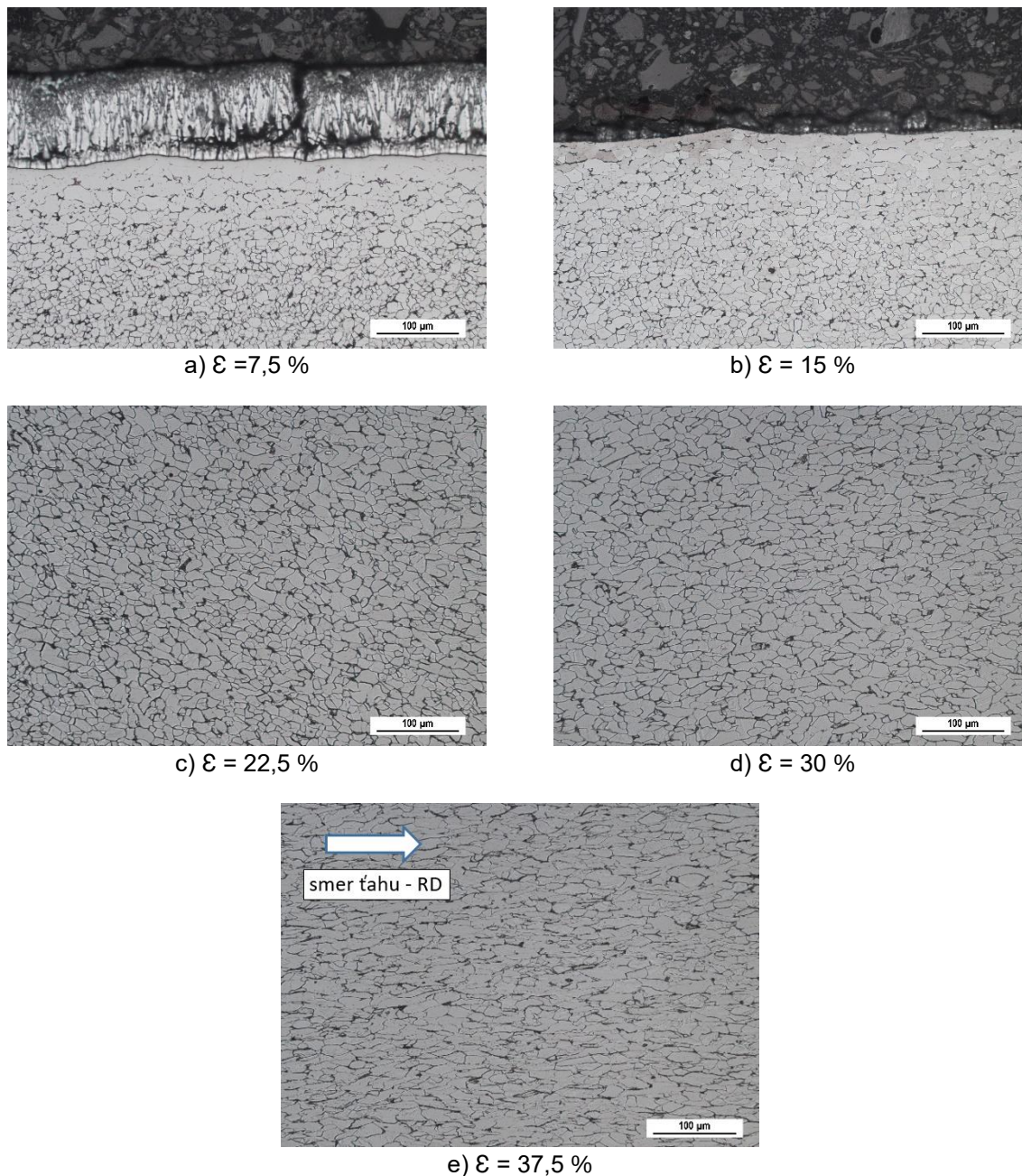
Obrázok 28 – Vplyv ε a strain rate na vrubovú húževnatosť KCV

Vrubová húževnatosť veľmi úzko koreluje s energiou, ktorú musí zvodidlo absorbovať pri dopravnej nehode, ako je to uvedené v platných technických podmienkach pre zvodidlá na pozemných komunikáciách [T1] (pozri tabuľku 1 v [T1]). Tento parameter teda veľmi dobre súvisí so stupňom zadržania, respektíve zostatkovou energiou, ktorú je ešte zvodnica schopná absorbovať. Ako ukazuje Obrázok 28, vrubová húževnatosť kontinuálne klesá. Obrázok 28 taktiež dokumentuje skutočnosť, že vrubová húževnatosť je ovplyvnená aj rýchlosťou deformácie. Vrubová húževnatosť je pre menšie ε ako aj rýchlosti deformácie nižšia. Na druhej strane, pri nižších rýchlostiach deformácia klesá KCV s ε pomalšie, a preto pri vyšších ε ako aj rýchlostiach deformácie (strain rate) je už KCV nižšia.

Na Obrázku 28 je možné vidieť, že pri nízkej deformácii zvodnice do cca $\varepsilon = 7,5\%$ je pokles vrubovej húževnatosti materiálu v rozmedzí od cca 5 % - 17 % oproti pôvodnej pevnosti. Pričom pokles vrubovej húževnatosti pri vyššej rýchlosti deformácie, ktorá nastáva napr. pri náraze vozidla, sa pohybuje v okolí 5 %.

5.2.6 Zmena stavu matrice materiálu zvodnice vplyvom deformácie

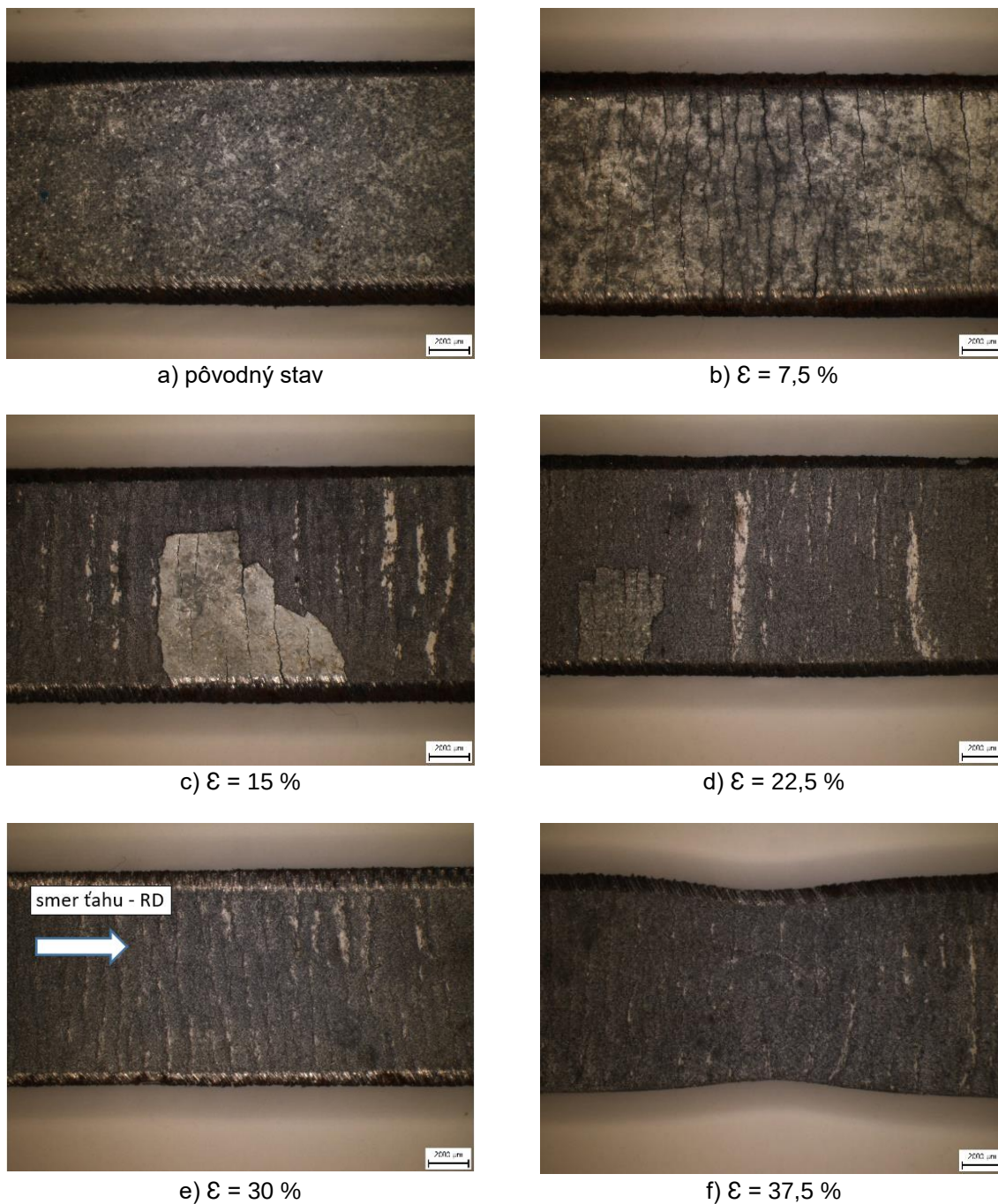
Obrázok 29 ukazuje povrch matrice (metalografické fotografie, rezané na metalografickej pile Metalco, zaliate za tepla do živice, brúsené, leštené a leptané 1 % nitalom) zvodidla pre $\epsilon = 7,5\%$ a 15% , ako aj charakter zmien pre $\epsilon = 22,5\%$, 30% a $37,5\%$. Z hľadiska povrchu a s tým súvisiacou Zn vrstvou je vidieť, že pre $\epsilon = 7,5\%$ zostáva Zn vrstva súčasťou povrchu, avšak na rozdiel od pôvodného stavu sa v nej iniciujú trhliny (pozri aj Obrázok 30 a, b). Po prekročení deformácie $\epsilon = 7,5\%$ dochádza k delaminácii Zn vrstvy tak, ako to ukazuje Obrázok 29 b aj Obrázok 30 c. Na niektorých miestach ešte zostávajú zvyšky Zn vrstvy, ale ich veľkosť a početnosť s rastúcou intenzitou postupne klesá. Delaminácia je spôsobená tým, že matrica je húževnatá, zatiaľ čo Zn vrstva nie. Zn vrstva je krehká, avšak povrch zvodidla aj napriek delaminácii Zn vrstvy obsahuje Zn, avšak v difúznej vrstve. Je to vidieť na fotografii povrchu na Obrázku 29 b. Rovnako tak je vidno časti difúznej vrstvy na Obrázku 30 c, d, e, f ako svetlé pásy orientované kolmo na smer ťahu.



Obrázok 29 – Metalografia matrice a povrchu ako funkcia ϵ pre strain rate $0,5 \times 10^{-3}$

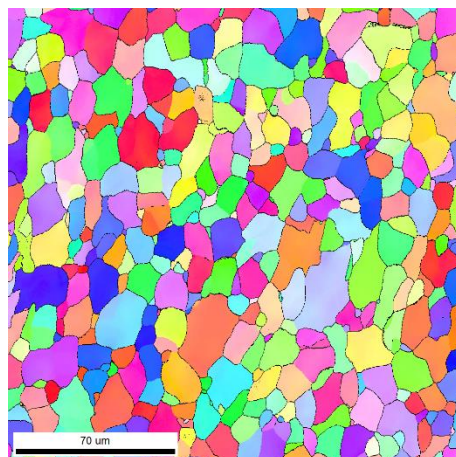
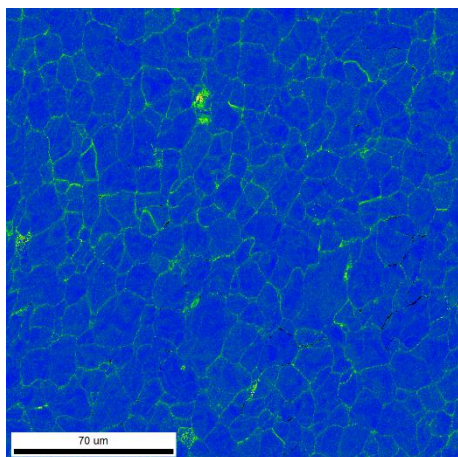
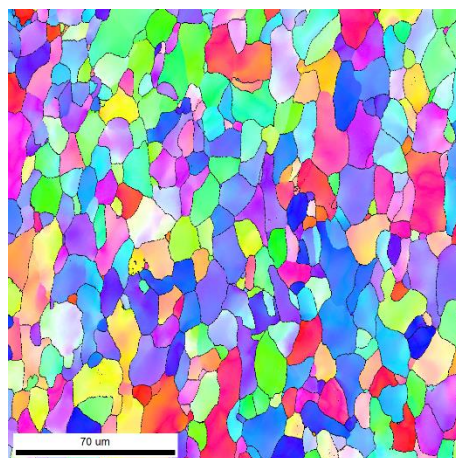
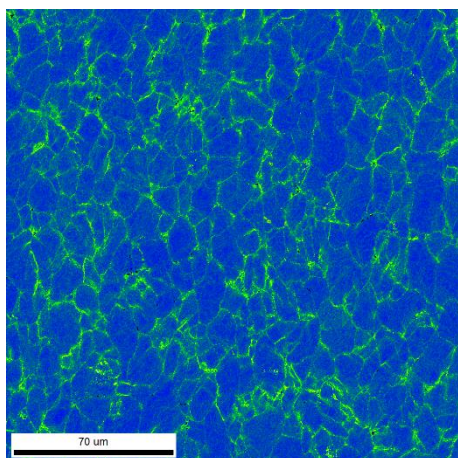
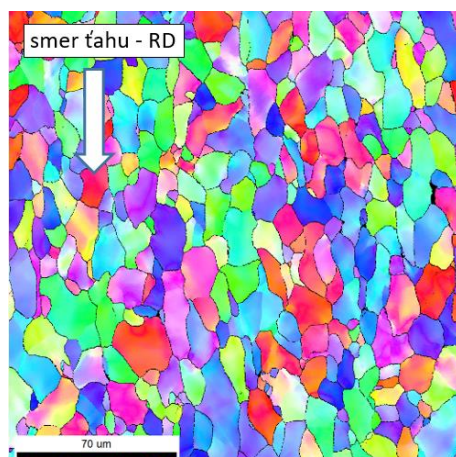
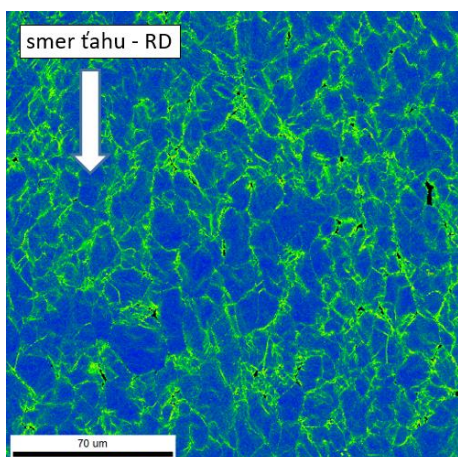
Okrem delaminácie je možné vidieť na Obrázku 29 aj postupnú preferenčnú orientáciu matrice (naťahovanie jednotlivých zŕn) do smeru ťahu. Prvé náznaky tejto preferenčnej orientácie je možné

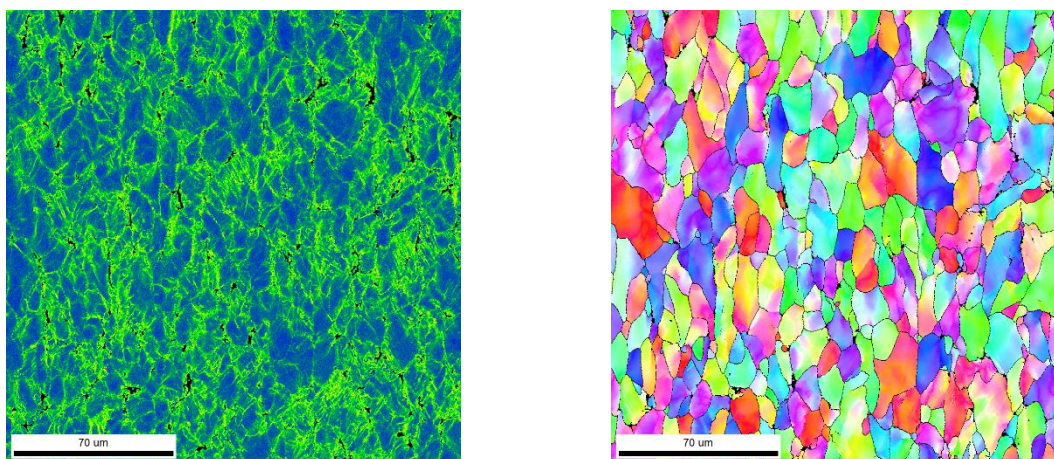
vidieť až keď ϵ dosiahne aspoň 22,5 % a s ďalším rozvojom deformačných procesov sa zviditeľňuje – pozri Obrázok 29 d, e.



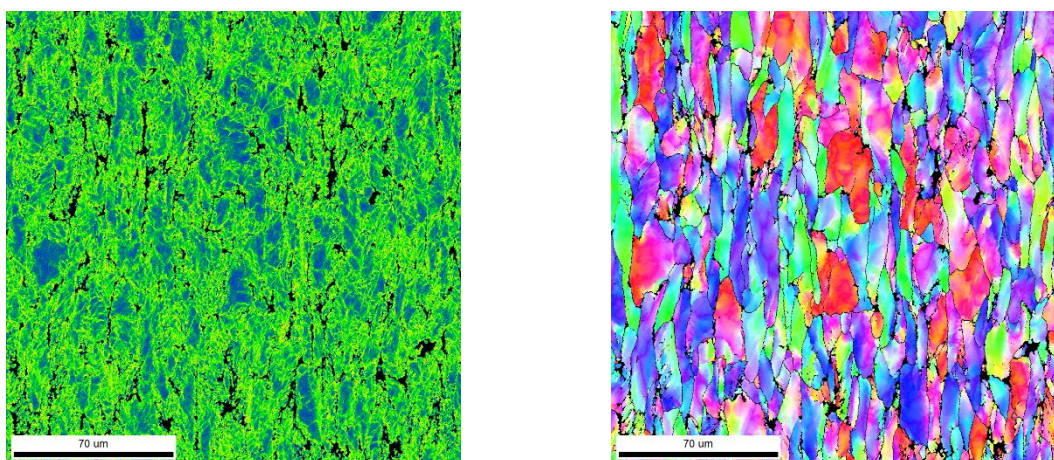
Obrázok 30 – Delaminácia Zn vrstvy pri ťahu

Ešte lepšie vidíme preferenčné usmernenie matrice na IPF snímkach z EBSD analýzy (Obrázok 31 vpravo). Obrázok 31 ukazuje aj to, že s rastúcou rýchlosťou deformácie sa intenzita preferenčného usmernenia zvyšuje (pozri Obrázok 31 e, f). Istý podiel na tomto jave má však aj fakt, že pri vyššej rýchlosti deformácie sa redukuje maximálne možné dosiahnuteľné ϵ (ťažnosť). Pri vyššej rýchlosti deformácie nastáva prudký pokles na deformačnej krivke, ako ju ukazuje Obrázok 30, skôr, a teda reálne plastické pretvorenia sú viac rozvinuté. Stĺpec vľavo (modrý až modro - zelený) na Obrázku 31 ukazuje, ako postupne rastie misorientácia v rámci matrice, a tiež z neho vyplýva, ako rastie hustota dislokácií v matici. Vplyv rýchlosti deformácie je v tomto prípade menej výrazný, avšak priemerná misorientácia je pre vyššiu rýchlosť deformácie mierne vyššia.

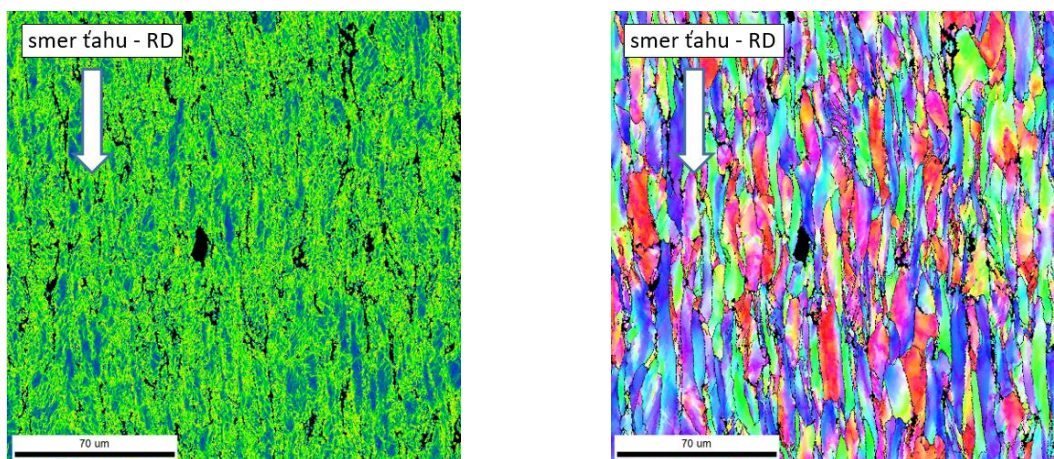
a) $\varepsilon = 7,5 \%$, strain rate 0.5×10^{-3} b) $\varepsilon = 15 \%$, strain rate 0.5×10^{-3} c) $\varepsilon = 22,5 \%$, strain rate 0.5×10^{-3}



d) $\epsilon = 30 \%$, strain rate 0.5×10^{-3}



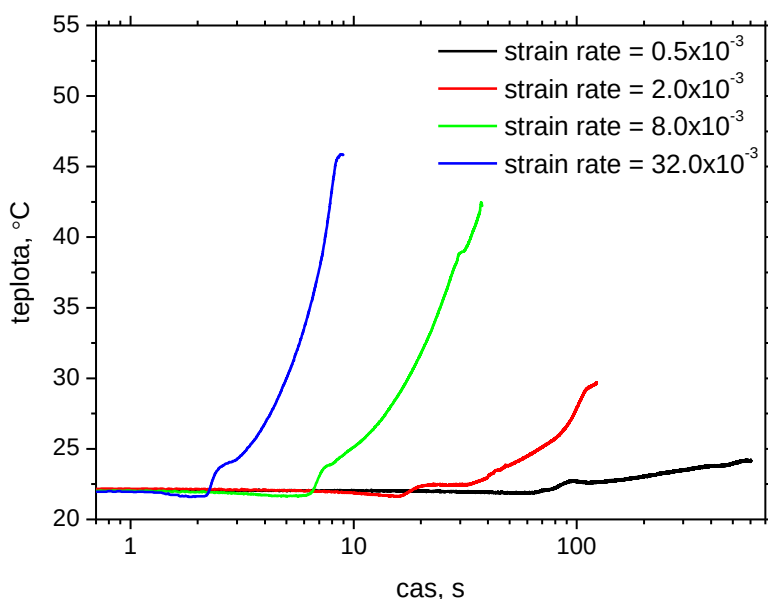
e) $\epsilon = 37,5 \%$, strain rate 0.5×10^{-3}



f) $\epsilon = 37,5 \%$, strain rate 32.0×10^{-3}

Obrázok 31 – KAM mapy (stĺpec vľavo) a IPF mapy (stĺpec vpravo) ako funkcia ϵ a strain rate

K mierne vyššej intenzite pretvorenia matrice prispieva aj zvýšená teplota matrice, ktorá rastie s rýchlosťou deformácie, ako ju ukazuje Obrázok 32, keďže rastúca teplota uľahčuje pohyblivosť dislokácií. Teplota bola meraná prostredníctvom priemyselného teplomeru PPG101A6 v programe Tera Term.

Obrázok 32 – Vplyv ϵ a strain rate na teplotu pri ťahu

5.3 Záver posúdenia stupňa plastického pretvorenia cestných zvodidiel - deformácia

Z hľadiska využiteľnosti magnetických parametrov pre monitorovanie intenzity deformačného pretvorenia pásnice sa ukazuje, že konvenčná rms MBN hodnota Barkhausenovho šumu klesá prudko predovšetkým v počiatočných štádiách deformácie. Kontinuálne a najmä rovnomernejšie sa mení hodnota PP, ktorá rastie s veľkosťou plastického pretvorenia zvodnice. Rovnako tak rastie aj počet indikovaných MBN pulzov. Klesajúca hodnota MBN umožňuje indikovať, aká je zostatková hodnota absorpčnej energie zvodnice na základe úzkej korelácie medzi MBN a KCV. Tu je úzky súvis s kinetickou energiou tak ako je definovaná v [T1].

Je potrebné konštatovať, že pri vyšších deformáciách zvodnice dochádza k delaminácii Zn vrstvy, a teda na opätovné využitie pri nižších úrovniach zadržania je možné použiť ďalej len tie zvodnice, u ktorých je veľkosť pomerného pretvorenia malá (ϵ niekde okolo hodnoty 7,5 %). Po túto hranicu nedochádza k delaminácii Zn vrstvy a prípadné trhliny v nej je možné do istej miery stabilizovať aplikovaním Zn nástreku. Zvodnice pri rozsahu pretvorenia do 7,5 % je možné pravdepodobne vyrovnať, pričom pokles schopnosti absorbovať kinetickú energiu vplyvom predchádzajúcej deformácie je malý.

Nad hranicou $\epsilon = 7,5$ % je už rozvoj poškodenia vo všetkých aspektoch neakceptovateľný a zvodnice nie je možné opätovne použiť (veľké deformácie, nemožnosť ich vyrovnať, chýbajúca Zn ochranná vrstva, výraznejší pokles schopnosti absorbovať kinetickú energiu nárazu). Výhodou MBN parametra v tomto prípade je skutočnosť, že pre stavy zvodnice, ktorá je deformovaná do $\epsilon = 7,5$ %, je možné pozorovať veľkú citlivosť MBN parametra s rastúcou intenzitou deformácie - prudký pokles.

6 Problematika a charakteristika cestných zvodidiel

6.1 Porovnanie rozmerov, hmotnosti a profilov zvodidiel

Získané zvodnice boli pred materiálovými skúškami podrobené vizuálnej kontrole, ako aj vzájomnému porovnaniu tvarov. Zvodnice na základe kontroly profilu boli identifikované ako prvky zvodidlového systému AXIUM. Pre účely rozlíšenia pri skúškach boli jednotlivé zvodnice označené nasledovne:

- O – originálna zvodnica,
- F – neoriginálna zvodnica.

V prvom kroku prebehla kontrola znakov.

Originálna pásnica:



Obrázok 33 – Identifikačné znaky vyrazené na zvodnici - 1249913621

Na neoriginálnej zvodnici neboli obhliadkou zistené žiadne identifikačné znaky.

Následne bola prevedená vizuálna kontrola celkového stavu zvodnice. Kontrolou boli zistené vizuálne rozdiely týkajúce sa zinkovej úpravy, kde originálna zvodnica (O) mala povrch vizuálne jednoliaty. Pri neoriginálnej zvodnici (F) zinkový povrch vyzeral napohľad flakato. Výsledky z merania hrúbok zinkovej vrstvy sú uvedené v Tabuľke 4.



Obrázok 34 – Viditeľný rozdiel v povrchovej zinkovej úprave zvodnice - vľavo originálna, vpravo neoriginálna

Rozdiely medzi originálnou a neoriginálnou zvodnicou boli zistené aj v počte otvorov nachádzajúcich sa na zvodniciach.



Obrázok 35 – Rozdiely zistené v počte a tvare otvorov - vľavo kraj zvodníc, vpravo stred zvodníc

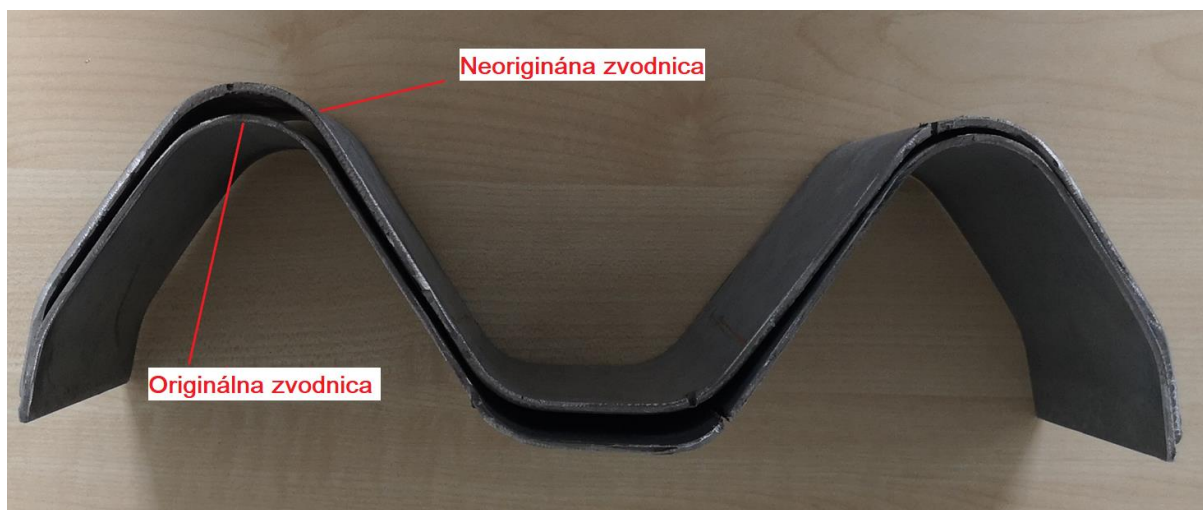
Pri kontrole rozmerov zvodníc boli zistené nasledovné skutočnosti:

- Podľa schváleného [T5] má zvodnica tvar dvojvlhny a vyrába sa z plechu hrúbky 2,6 mm. Zvodnica je vysoká 310 mm a pôdorysnú šírku má 81 mm. Dĺžka zvodnice je 4 318 mm.
- Meraním boli zistené dĺžky zvodnice – originálna zvodnica má 4 315 mm, neoriginálna zvodnica 4 301 mm.
- Hrúbka plechu meraného na okraji zvodnice je podľa [T5] 2,6 mm. Namerané údaje u originálneho je 2,36 mm a u neoriginálneho 2,88 mm. Hrúbky boli merané posuvným meradlom VRC PRO 3425 s presnosťou 0,02 mm (Obrázok 36.).



Obrázok 36 – Meranie hrúbok zvodníc - vľavo originálna, vpravo neoriginálna

Výška zvodnice bola v oboch prípadoch zhodná: 311 mm. V prípade pôdorysnej výšky zvodnice vykazovala neoriginálna zvodnica menšiu výšku, čo sa prejavilo aj v tvare vlny.



Obrázok 37 – Porovnanie profilov

Vplyv rozdielneho tvaru vlny sa prejavil pri skúške zvodnice ohybom a je podrobnejšie opísaný v kapitole 6.5 Ohyb zvodnice.

6.2 Chemické zloženie, tvrdosť a mikroštruktúra

Z hľadiska chemického zloženia (Tabuľka 4) je výraznejší rozdiel medzi zvodnicami predovšetkým pri obsahoch C a Mn. V oboch prípadoch originálna zvodnica obsahuje výrazne vyššie koncentrácie týchto prvkov. Oba prvky prispievajú k vyššej pevnosti ocele, čiastočne k jej tvrdosti, avšak na úkor ťažnosti, ako je ukázané ďalej.

Tabuľka 4 – Chemické zloženie materiálov

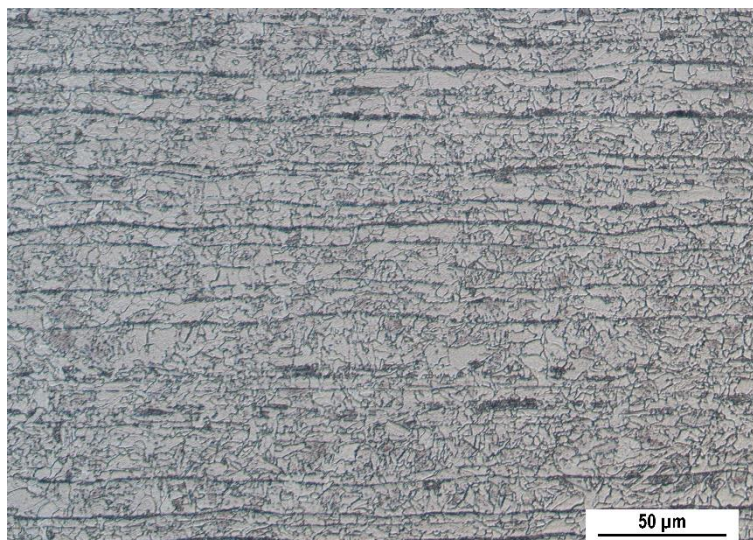
	C	Cu	Al	Si	Mn	Cr	Co	Ti	Fe
Originálna zvodnica	0,145	0,021	0,05	<0,005	1,612	0,048	0,0043	0,0045	Bal.
Neoriginálna zvodnica	0,041	0,012	0,046	0,019	0,68	0,049	0,01	0,04	Bal.

Ako ukazuje Tabuľka 5, tvrdosť matrice originálnej zvodnice je 197 ± 3 HV10, pričom tvrdosť neoriginálnej zvodnice je 172 ± 6 HV10. Vyšší podiel C v originálnej zvodnici zvyšuje aj podiel perlitu v matrici, ako ukazujú Obrázok 38 a Obrázok 39. Navyše je matrica originálnej zvodnice jemnozrnnejšia, čo takisto prispieva k jej vyššej pevnosti. Podiel perlitu (tmavé oblasti) vo ferite (biele zrná) je v prípade neoriginálnej zvodnice menší.

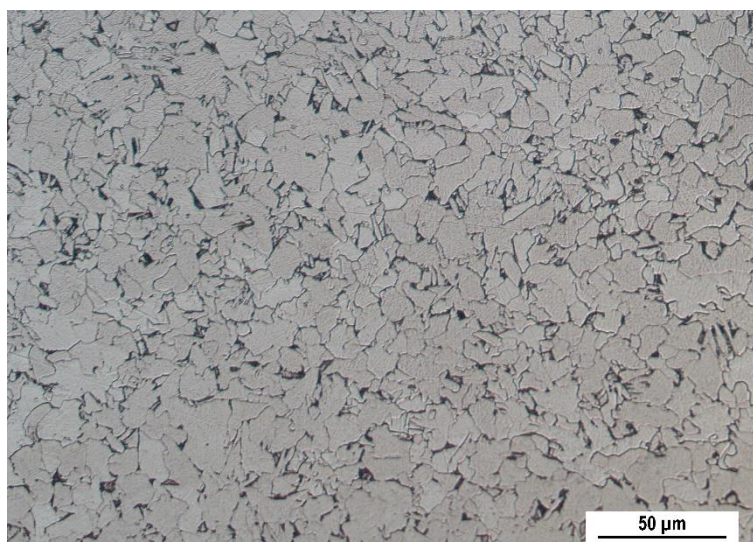
Okrem jemnejšieho zrna matrice originálnej zvodnice je v prípade matrice originálnej zvodnice vidieť aj riadkovitosť uloženia perlitu v smere pozdĺž zvodnice, teda v smere valcovania plechu. Táto riadkovitosť nie je vytvorená počas vytvárania profilu zvodnice, ale bola prítomná v plechu pri jeho dodaní. Vzhľadom k tomu, že riadkovitosť sa ťahá v smere dĺžky zvodnice, a teda aj v smere zaťažovania zvodnice, má tento štruktúrny nedostatok pomerne malý vplyv na funkčnosť zvodnice s ohľadom na absorbovanie kinetickej energie nárazu.

Tabuľka 5 – Porovnanie tvrdosti matrice – merané na MPO 250/AQ

	Originálna zvodnica					Neoriginálna zvodnica				
HV10	200	196	194	196	200	175	170	160	176	177



Obrázok 38 – Mikroštruktúra originálnej zvodnice



Obrázok 39 – Mikroštruktúra neoriginálnej zvodnice

6.3 Hrúbka Zn ochrannnej vrstvy

Z hľadiska hrúbky ochrannnej Zn vrstvy meranej prostredníctvom CM-8825FN na oboch zvodidlách (Tabuľka 6) je hrúbka pre obe zvodnice podobná. Výraznejší rozdiel je možné vidieť v pozícii č. 1 (viď Obrázok 40), kde je hrúbka ochrannnej Zn vrstvy v prípade originálnej zvodnice menšia. V ostatných pozíciách sú hrúbky Zn vrstiev porovnateľné. Toto konštatuje jednak meranie prostredníctvom CM-8825FN (Tabuľka 6), ako aj metalografické zobrazenia na Obrázku 41.

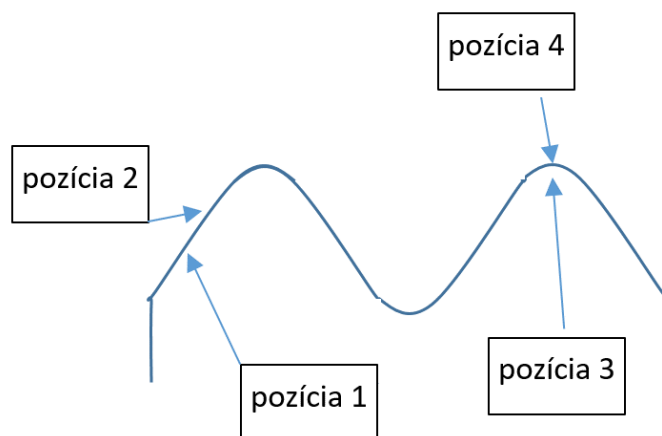
Čiastočnú delamináciu Zn vrstvy, ktorú ukazuje Obrázok 41, spôsobila príprava vzoriek – konkrétne rezanie na metalografickej píle Struers. Vzorky na metalografickú analýzu boli pozorované v smere dĺžky zvodnice, zaliate za tepla, brúsené, leštené a leptané 3 % Nitalom po dobu asi 5 sekúnd.

Pozície s ohľadom na profil zvodnice sú ukázané na Obrázku 40:

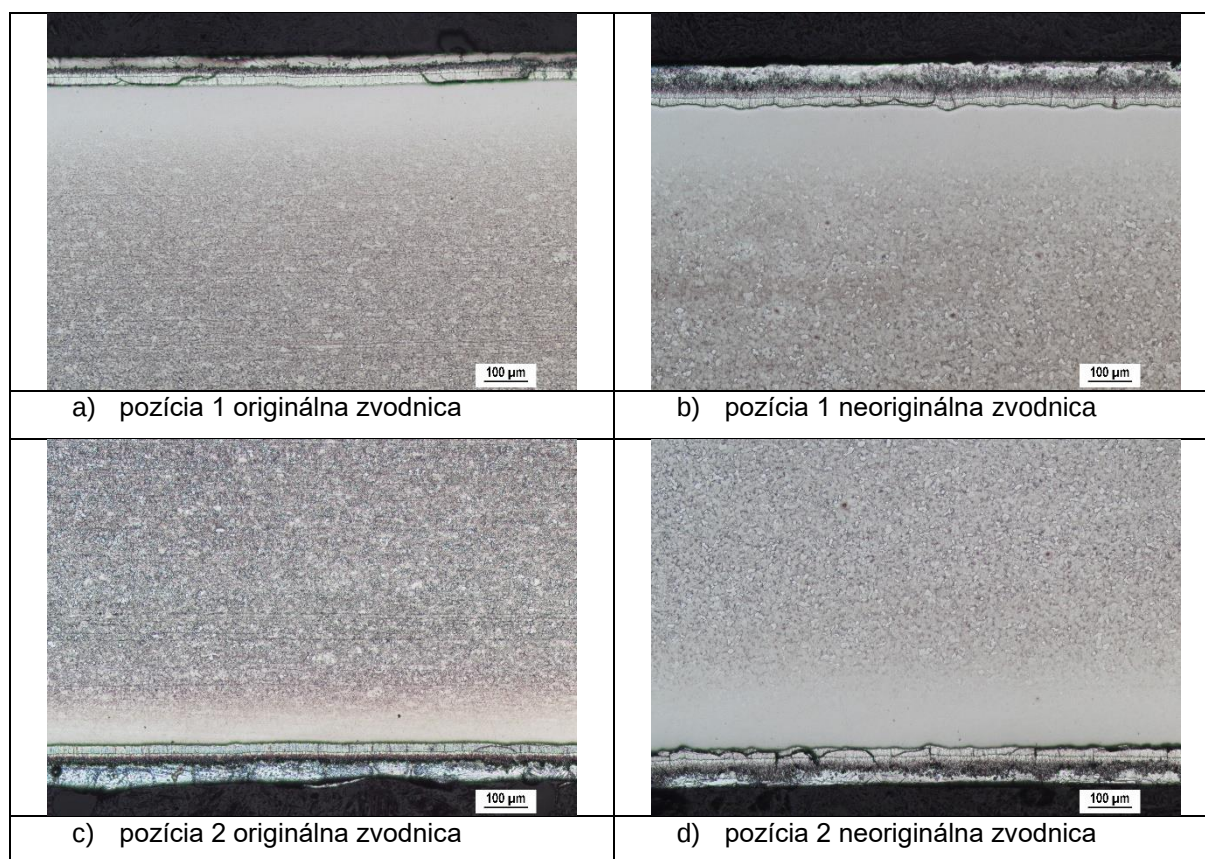
- Pozícia 1 – vnútorná strana z hľadiska zaťaženia zvodnice na rovnej časti
- Pozícia 2 – vonkajšia strana z hľadiska zaťaženia zvodnice na rovnej časti
- Pozícia 3 – vnútorná strana z hľadiska zaťaženia zvodnice na ohybe
- Pozícia 4 – vonkajšia strana z hľadiska zaťaženia zvodnice na ohybe

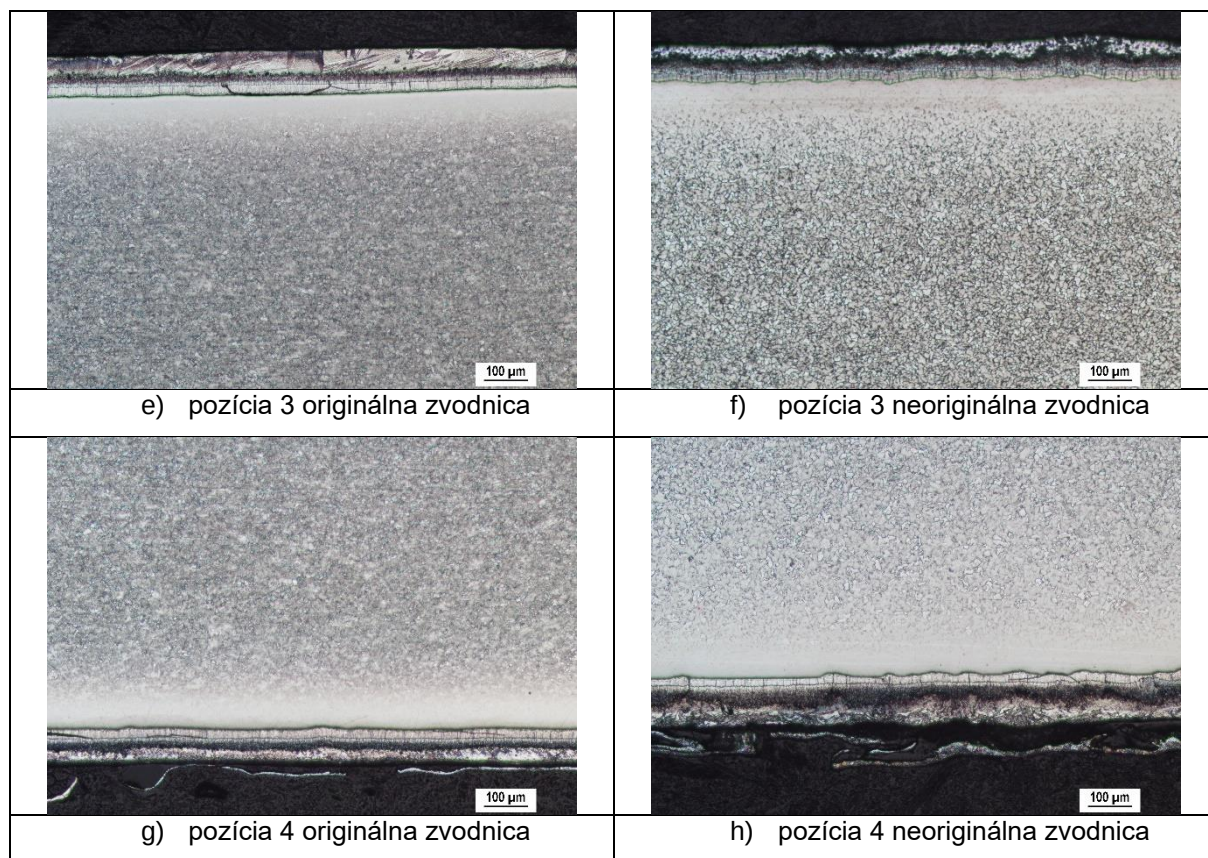
Tabuľka 6 – Hrúbky ochrannej Zn vrstvy v mikrometroch merané prostredníctvom CM-8825FN na
rôznych miestach zvodnice

	Originálna zvodnica - μm					Neoriginálna zvodnica - μm				
Pozícia 1	81	72	87	96	87	124	110	134	115	116
Pozícia 2	86	98	106	97	124	100	95	107	95	96
Pozícia 3	141	106	139	117	107	98	106	107	109	103,5
Pozícia 4	100	108	88	91	85	101	108	114	107	112



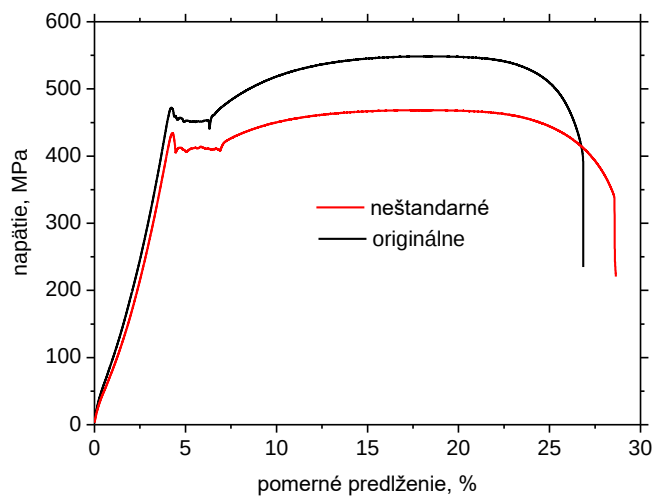
Obrázok 40 – Pozície merania Zn vrstvy na zvodniciach

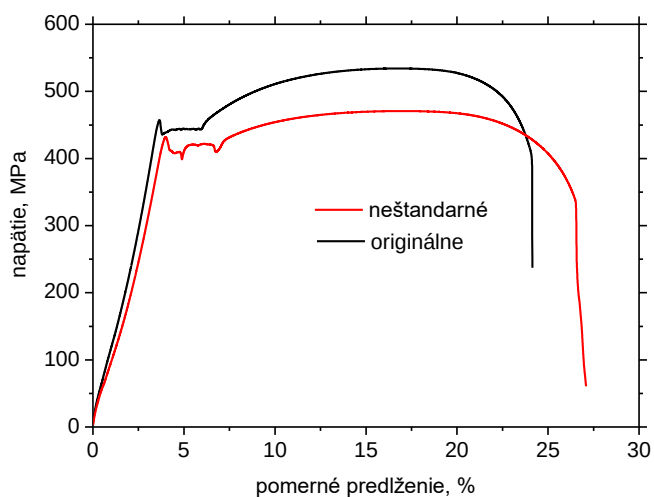




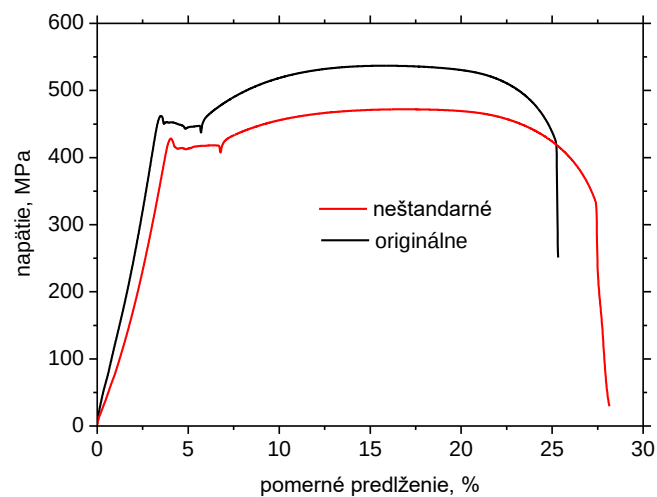
Obrázok 41 – Metalografia Zn vrstiev v jednotlivých pozíciách

6.4 Mechanické vlastnosti

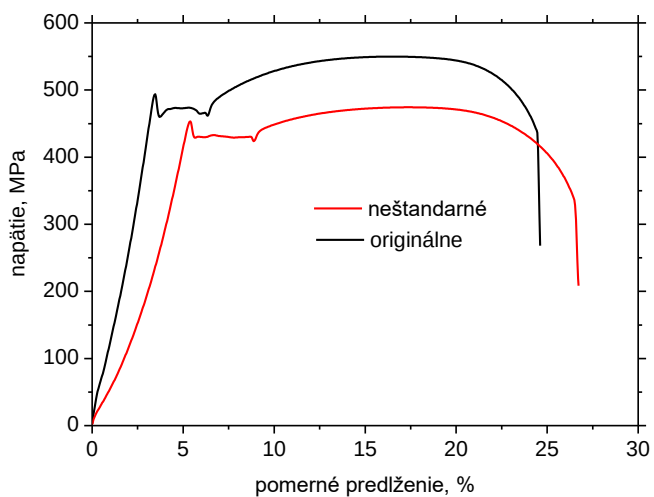
Obrázok 42 – Ťahovky pre rýchlosť deformácie $0,5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



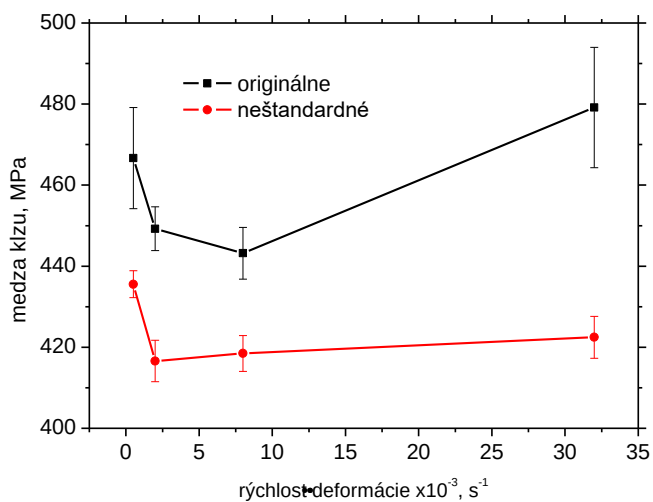
Obrázok 43 – Ťahovky pre rýchlosť deformácie $2,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



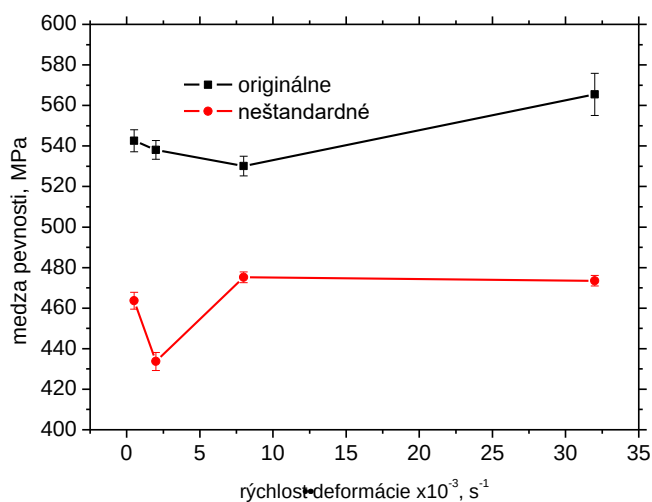
Obrázok 44 – Ťahovky pre rýchlosť deformácie $8,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



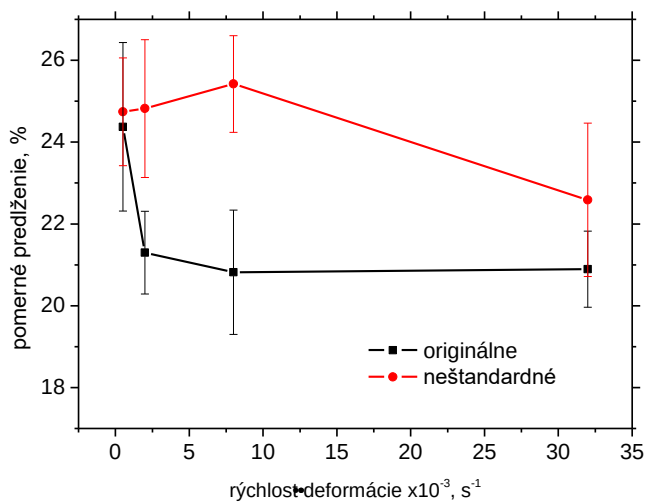
Obrázok 45 – Ťahovky pre rýchlosť deformácie $32,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



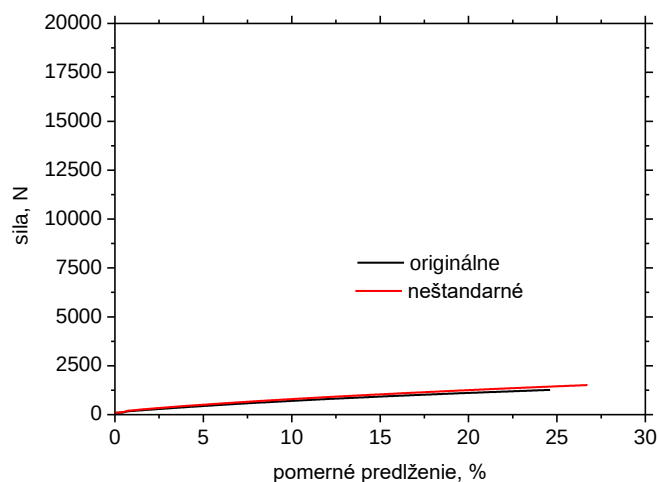
Obrázok 46 – Vplyv rýchlosti deformácie na medzu klzu



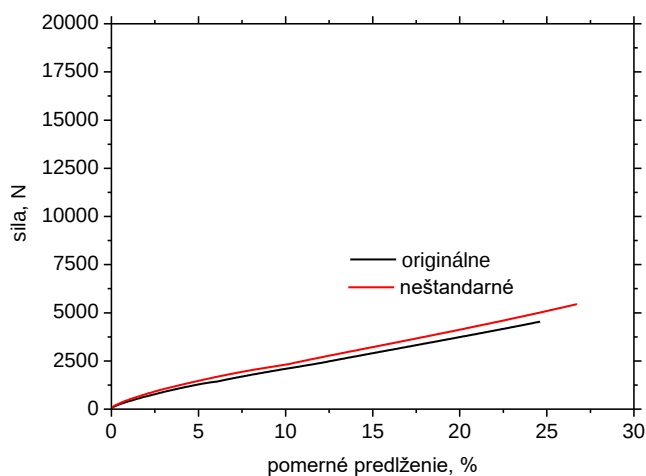
Obrázok 47 – Vplyv rýchlosti deformácie na medzu pevnosti



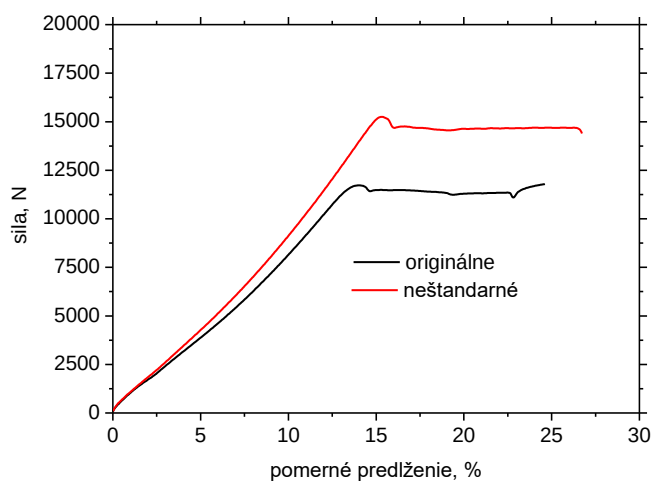
Obrázok 48 – Vplyv rýchlosti deformácie na ťažnosť



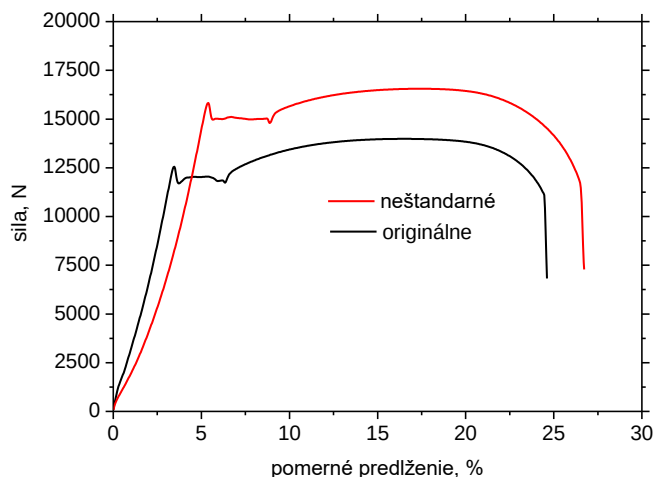
Obrázok 49 – Celková zádržná sila, ktorú je zvodnica schopná preniesť, rýchlosť deformácie $0,5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



Obrázok 50 – Celková zádržná sila, ktorú je zvodnica schopná preniesť, rýchlosť deformácie $2,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



Obrázok 51 – Celková zádržná sila, ktorú je zvodnica schopná preniesť, rýchlosť deformácie $8,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



Obrázok 52 – Celková zádržná sila, ktorú je zvodnica schopná preniesť, rýchlosť deformácie $32,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

V súvislosti s mechanickými vlastnosťami matrice zvodnice je potrebné odlišiť:

1. samotné mechanické vlastnosti, ktoré je možné získať na základe štandardizovaných ťahových skúšok. Tieto neberú do úvahy hrúbku steny, keďže je v nich napätie prepočítané na hrúbku steny,
2. celkovú kinetickú energiu matrice, ktorá berie do úvahy aj hrúbku steny, a ktorú vyjadruje celková sila pri ťahaní vzoriek.

Obrázky 42 až 45 ukazujú závislosť napätia a pomerného predĺženia pre obe zvodnice pre rôzne rýchlosti deformácie. Tento faktor je nutné zohľadniť pri mechanických skúškach zvodidiel vzhľadom k tomu, že pri reálnych kolíziách v doprave je rýchlosť deformácie obvykle výrazne vyššia ako tá, ktorá sa používa pri štandardizovaných skúškach.

Sumárne vplyv rýchlosti deformácie na medzu klzu, pevnosti ako aj ťažnosť ukazujú Obrázky 46 až 48.

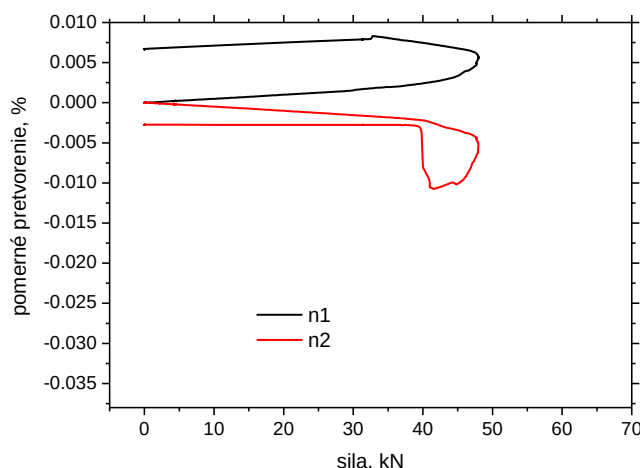
Na základe Obrázkov 42 až 48 je možné konštatovať, že originálna zvodnica pre všetky rýchlosti deformácie vykazuje vyššiu medzu klzu i pevnosti, avšak na úkor menšej ťažnosti. Celková kinetická energia, ktorá je vyjadrená plochou pod krivkami na Obrázkoch 42 až 45, je pre originálnu zvodnicu mierne vyššia v porovnaní s neoriginálnou zvodnicou, a síce preto, že pokles ťažnosti je menší ako nárast pevnosti. Vplyv rýchlosti deformácie je pomerne malý, či sa to týka medze klzu, pevnosti, či ťažnosti, ako to ukazujú Obrázky 46 až 48. Výsledky ťahových skúšok dokladujú, že pevnostné charakteristiky materiálov oboch zvodníc vyhovujú oceli S355.

V súvislosti s celkovou schopnosťou zvodnice absorbovať kinetickú energiu nárazu je potrebné brať do úvahy hrúbku steny zvodnice, a teda porovnávať silu, ktorá je spotrebovaná pri ťahovej skúške. Obrázky 49 až 52 ukazujú, že vplyvom väčšej hrúbky steny neoriginálnej zvodnice je táto sila u tejto zvodnice vyššia ako sila originálnej zvodnice. Pri menších rýchlostiach deformácie je tento rozdiel malý, avšak s rastúcou rýchlosťou deformácie sú tieto rozdiely výraznejšie v prospech neoriginálnej zvodnice. Rovnako tak s rýchlosťou deformácie výrazne rastie aj sila, ktorú je potrebné vynaložiť.

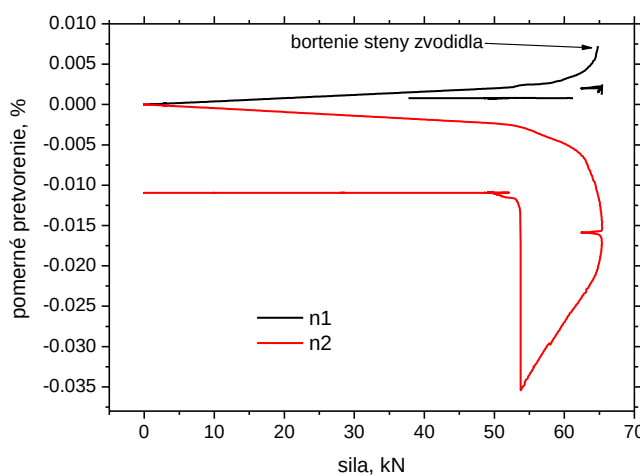
6.5 Ohyb zvodnice

Lepšiu predstavu o schopnosti zvodnice absorbovať kinetickú energiu si možno urobiť na základe skúšky ohybom (Obrázok 53 a Obrázok 54), kedy sa netestuje len matrica vyrezaná z časti zvodnice, ale je zaťažovaná zvodnica ako celok, berúc do úvahy jej profil a symetriu. V prípade tejto skúšky bolo realizované pomerné pretvorenie zvodnice v dvoch miestach, tak ako to ukazuje Obrázok 55. Skúška sa realizovala s využitím tenzometrov, pričom tenzometer označený ako n1 bol nalepený do pozície, ako to ukazuje Obrázok 55 – v tomto mieste je matrica zaťažovaná ťahovými napätiami.

Tenzometer označený ako n2 bol nalepený do pozície znázornenej na Obrázku 55 – v tomto mieste je matrica zaťažovaná tlakovými napätiami. Fotografie so samotného zaťažovania a následne aj po odľahčení ukazuje Obrázok 56 pre obe zvodnice.

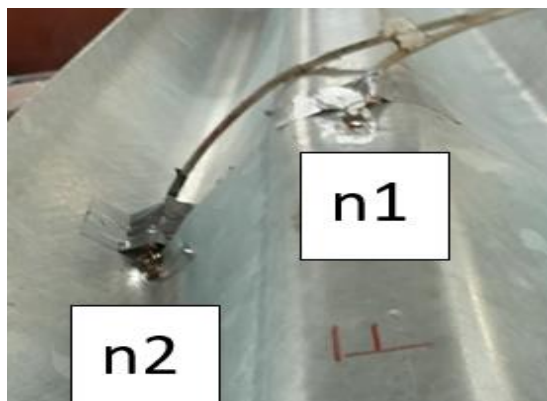


Obrázok 53 – Pomerné pretvorenie verzus zaťažujúca sila, originálna zvodnica

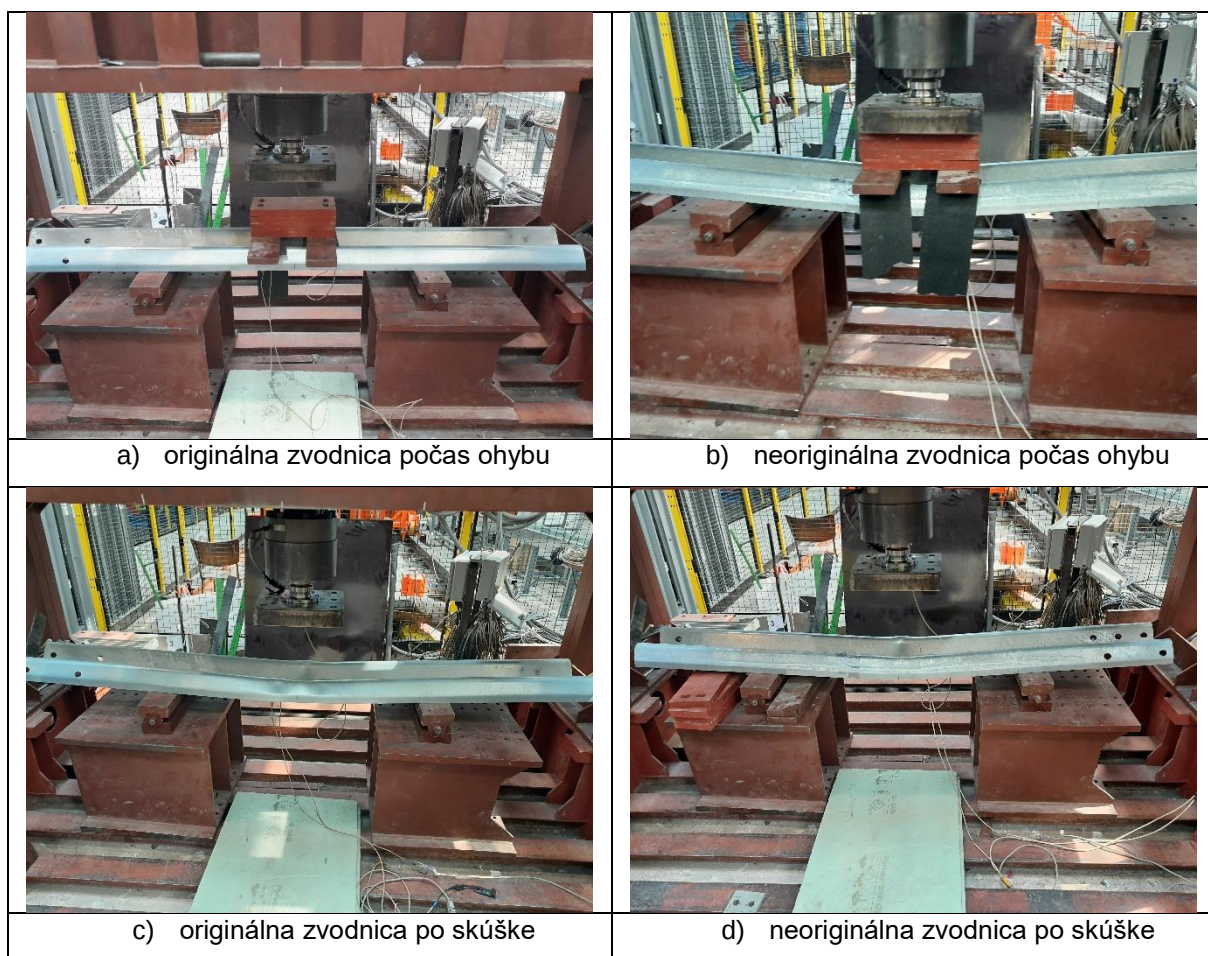


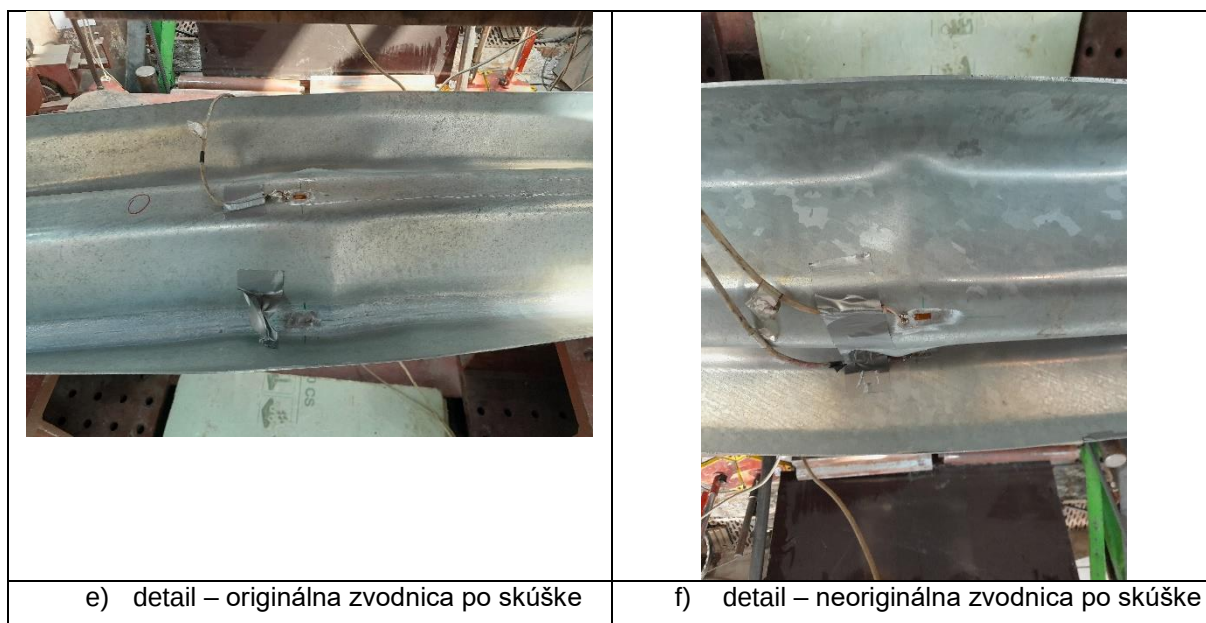
Obrázok 54 – Pomerné pretvorenie verzus zaťažujúca sila, neoriginálna zvodnica

Obrázky 53 a 54 ukazujú dva aspekty súvisiace so schopnosťou zvodnice absorbovať kinetickú energiu. Vzhľadom na menšiu hrúbku steny je celková sila potrebná na obdobné pomerné pretvorenie originálnej zvodnice menšia v porovnaní s neoriginálnou zvodnicou. Pokiaľ v prípade originálnej zvodnice je maximálne zaťaženie do cca 50 kN, v prípade neoriginálnej zvodnice je to cca 65 kN. Absorbovanú energiu demonštruje aj veľkosť plochy, ktorú ohraničujú červená a čierna krivka. Na druhej strane nedostatkom neoriginálnej zvodnice je predčasná deštrukcia steny (pozri priebeh n1 – čierna krivka na Obrázku 54). Táto krivka je neúplná, čo je spôsobené tým, že profil oboch „vln“ zvodnice nie je symetrický, ako v prípade originálnej zvodnice. V súvislosti s touto asymetriou je jedna polovica profilu zvodnice zaťažovaná nadmerne na úkor susediacej, čo vedie k vyššie uvedenému preťaženiu profilu v asymetrickej časti. Túto výraznú asymetriu v deformácii je možné vidieť na Obrázku 56 f. Naopak, v prípade originálnej zvodnice je profil symetrickejší, t.j., zaťaženie sa symetricky rozkladá po celej šírke profilu zvodnice a k predčasnému borteniu zvodnice v tomto prípade nedochádza. Neoriginálna zvodnica teda nie je zaťažovaná len 4-bodovým ohybom, ale charakter jej zaťaženia je komplexnejší, čo môže mať negatívny vplyv na jej celkovú schopnosť absorbovať kinetickú energiu.



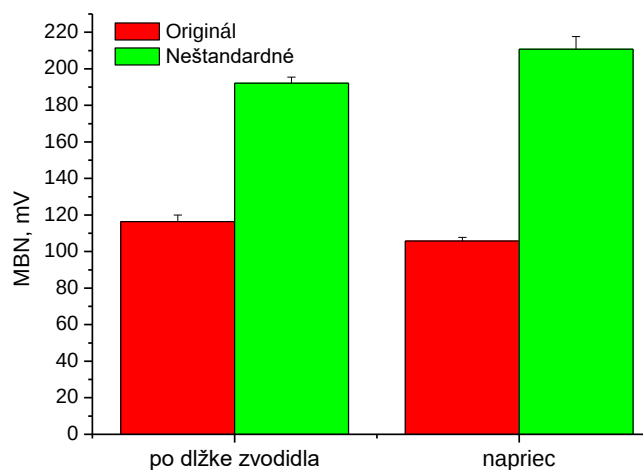
Obrázok 55 – Miesta merania n1 a n2, kde boli umiestnené tenzometre počas ohybu



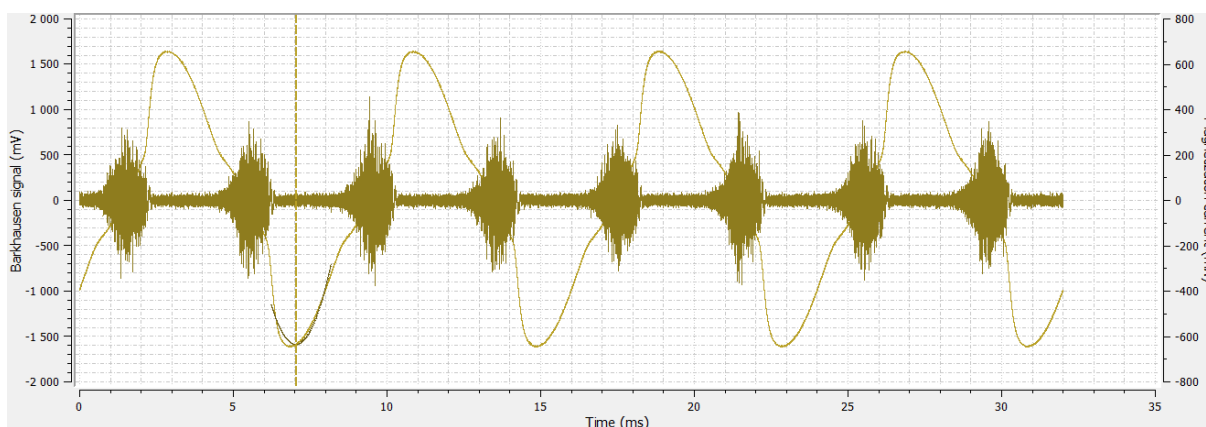


Obrázok 56 – Priebeh skúšky ohybom

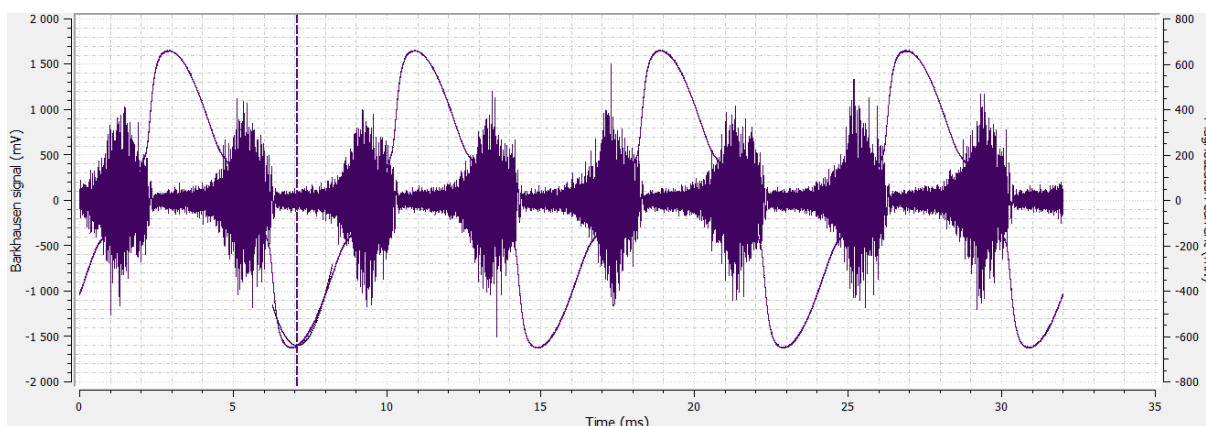
6.6 Barkhausenov šum



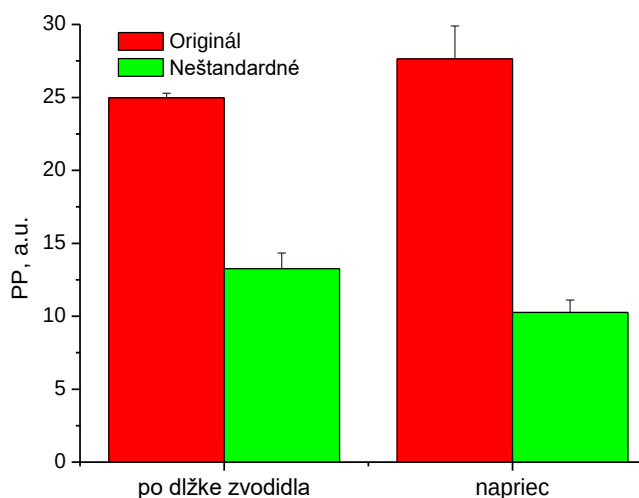
Obrázok 57 – Porovnanie efektívnych (MBN) hodnôt Barkhausenovho šumu



Obrázok 58 – Záznam z Barkhausenovho šumu pre originálnu zvodnicu po dĺžke zvodnice



Obrázok 59 – Záznam z Barkhausenovho šumu pre neoriginálnu zvodnicu po dĺžke zvodnice



Obrázok 60 – Porovnanie PP hodnôt Barkhausenovho šumu

Pre účely monitorovania skutočnosti, či inštalovaná zvodnica je alebo nie je originál, je v tomto prípade možné využiť aj jej rozmery, konkrétne hrúbku steny, ktorá je u neoriginálnych zvodníc 2,88 mm, zatiaľ čo originálne majú hrúbku steny 2,36 mm. Tento rozdiel sa pri dodržaní ostatných rozmerov samozrejme prejavuje väčšou hmotnosťou neoriginálnych zvodníc (originál 35,1 kg, vs. neoriginál 45,75 kg).

Ďalej je možné vysledovať pôvodnosť zvodnice vďaka vyrazenej značke, keďže táto na originálnej zvodnici je a na neoriginálnej zvodnici chýba. No a konečne je možné odlišiť zvodnice aj prostredníctvom merania Barkhausenovho šumu (MBN), ako to ukazujú Obrázky 57 a 60. Vzhľadom na odlišný charakter mikroštruktúry, ako ho komentuje kapitola 6.2, sú hodnoty MBN merané po dĺžke ako aj šírke zvodnice zhruba polovičné pre originálnu zvodnicu v porovnaní so zvodnicou neoriginálnou (pozri Obrázky 58 a 59). Toto súvisí s jemnejšou štruktúrou, vyššou pevnosťou a najmä vyššou tvrdosťou, ktorá vyjadruje zvýšenú hustotu dislokácií. Vyššia hustota dislokácií v matici vytvára hustejšiu sieť prekážok pre pohyb doménových stien, čo vedie k nižším hodnotám MBN. V súvislosti s tým majú originálne zvodidlá vyššie hodnoty PP. Tento parameter obvykle silne koreluje s mechanickou tvrdosťou matrice, ako ju dokumentuje kap. 6.2 – pozri aj Obrázok 60.

Obrázky 57 a 60 taktiež ukazujú, že asymetria MBN ako aj PP v prípade merania po dĺžke a šírke zvodnice je pomerne malá, a mierna preferenčná kryštalografická orientácia plechov po valcovaní zohráva len malú úlohu v MBN a PP.

Je potrebné zdôrazniť, že používanie neoriginálnych a neautorizovaných jednotlivých dielov zvodidlového systému je v rozpore s platnou legislatívou.

7 Analýza využiteľnosti Barkhausenovho šumu na monitorovanie stavu zvodníc po deformáciách získaných z reálnej praxe – overovacia fáza využiteľnosti MBN

Táto časť úlohy súvisí s overením poznatkov získaných z laboratórnych testov, keď sa matrica zvodnice deformovala prostredníctvom jednoosého ťahu a analyzovala sa zmena MBN. Ukázalo sa, že MBN klesá s rozvojom plastickej deformácie a hodnoty PP rastú, lebo rastie dislokačná hustota v materiáli. Avšak najviac zaťažené časti zvodnice sú zaťažované najmä ohybom, prípadne kombinovaným zaťažením. Preto je potrebné poznatky z laboratórnych testov overiť aj na reálne zdeformovaných častiach zvodidiel. Pre tento účel boli získané zvodnice z cestnej premávky po dopravných nehodách a na jednej z nich (pozri Obrázok 61) boli realizované nasledujúce experimentálne merania:

- meranie hrúbky Zn vrstvy,
- meranie MBN v smere dĺžky zvodnice,
- meranie tvrdosti matrice v rôznych miestach,
- metalografická analýza deformovaných častí.

Obrázok 61 vľavo dole tiež ukazuje pás, ktorý bol zo zvodnice vyrezaný a ktorý bol následne použitý na analýzu v tomto bode. Celkovo bolo okrem pôvodného nedeformovaného stavu monitorovaných ďalších 6 miest v deformovanej oblasti. Týchto 6 miest bolo vybraných na základe merania MBN, ako to ukazuje Tabuľka 7, s cieľom analyzovať oblasti generujúce v deformovanej oblasti rôzne signály MBN.

Z MBN meraní boli vyextrahované aj hodnoty PP, ako ich ukazuje Tabuľka 7. Po meraní MBN sa vyrezalo 7 miest nedeformovanej časti, ako aj miest 1 až 6 podľa Tabuľky 7, na ktorých sa následne realizovala metalografická analýza, ako aj meranie tvrdosti HV10. Vzorky po meraní MBN boli pripravené na metalografickú analýzu, keď boli vyrezané v smere po dĺžke zvodnice, následne zaliate za tepla, brúsené, leštené a leptané 3 % nitalom.

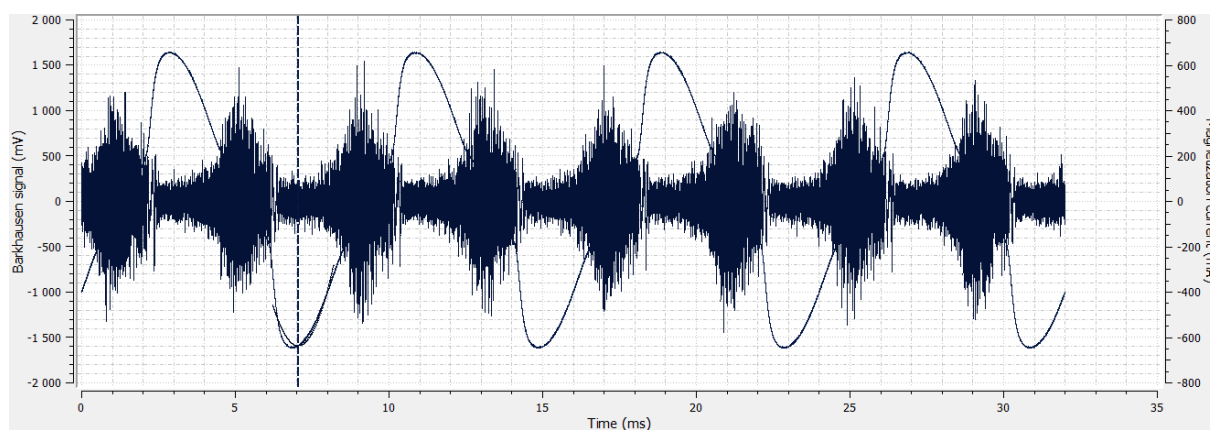
Tabuľka 7 – Namerané MBN, PP ako aj HV10 vo vybraných miestach zvodnice

Miesto	Nedef.	Miesto 1	Miesto 2	Miesto 3	Miesto 4	Miesto 5	Miesto 6
MBN, mV	248	218	188	187	177	134	127
PP, a.u.	2,9	5,8	6,05	6,82	8,29	11,9	13,2
HV10	105	107	110	116	120	121	125

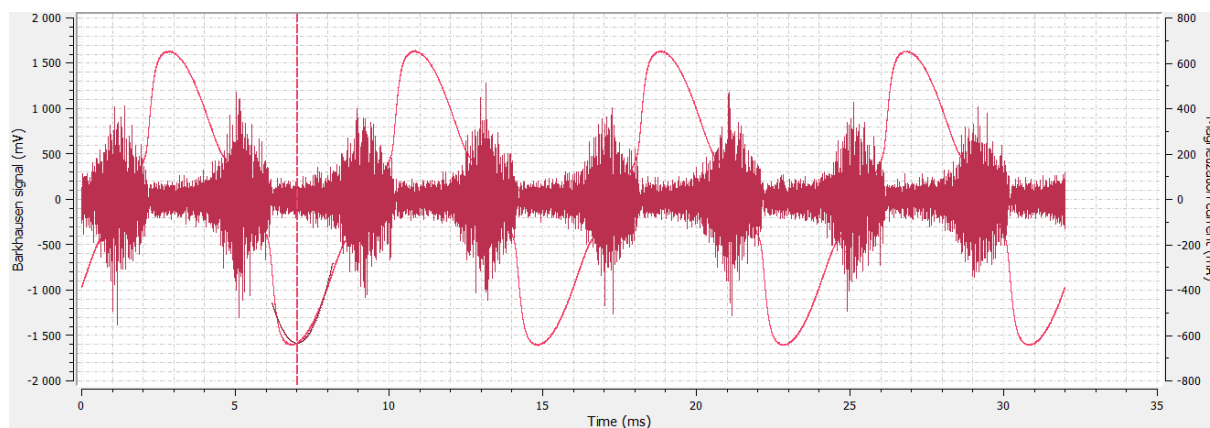




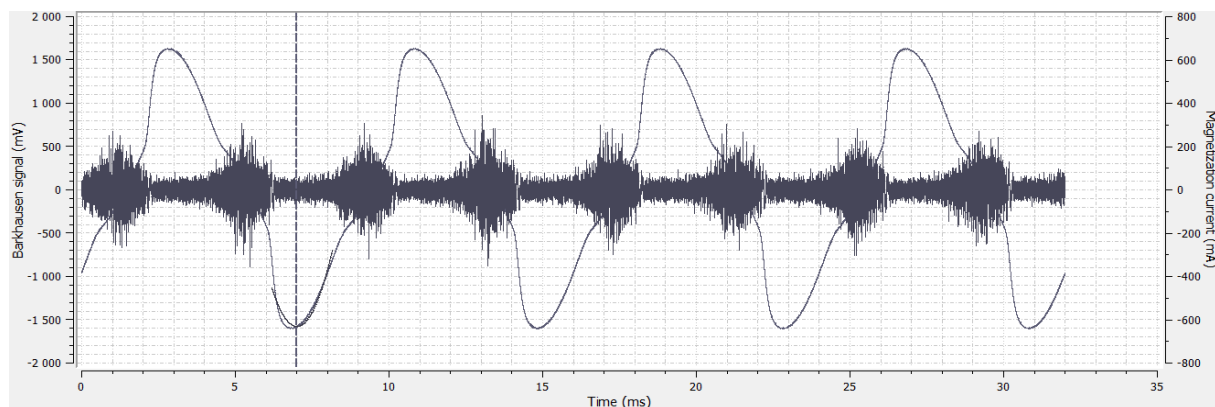
Obrázok 61 – Deformovaná zvodnica využitá pri analýze vplyvu deformácie na MBN



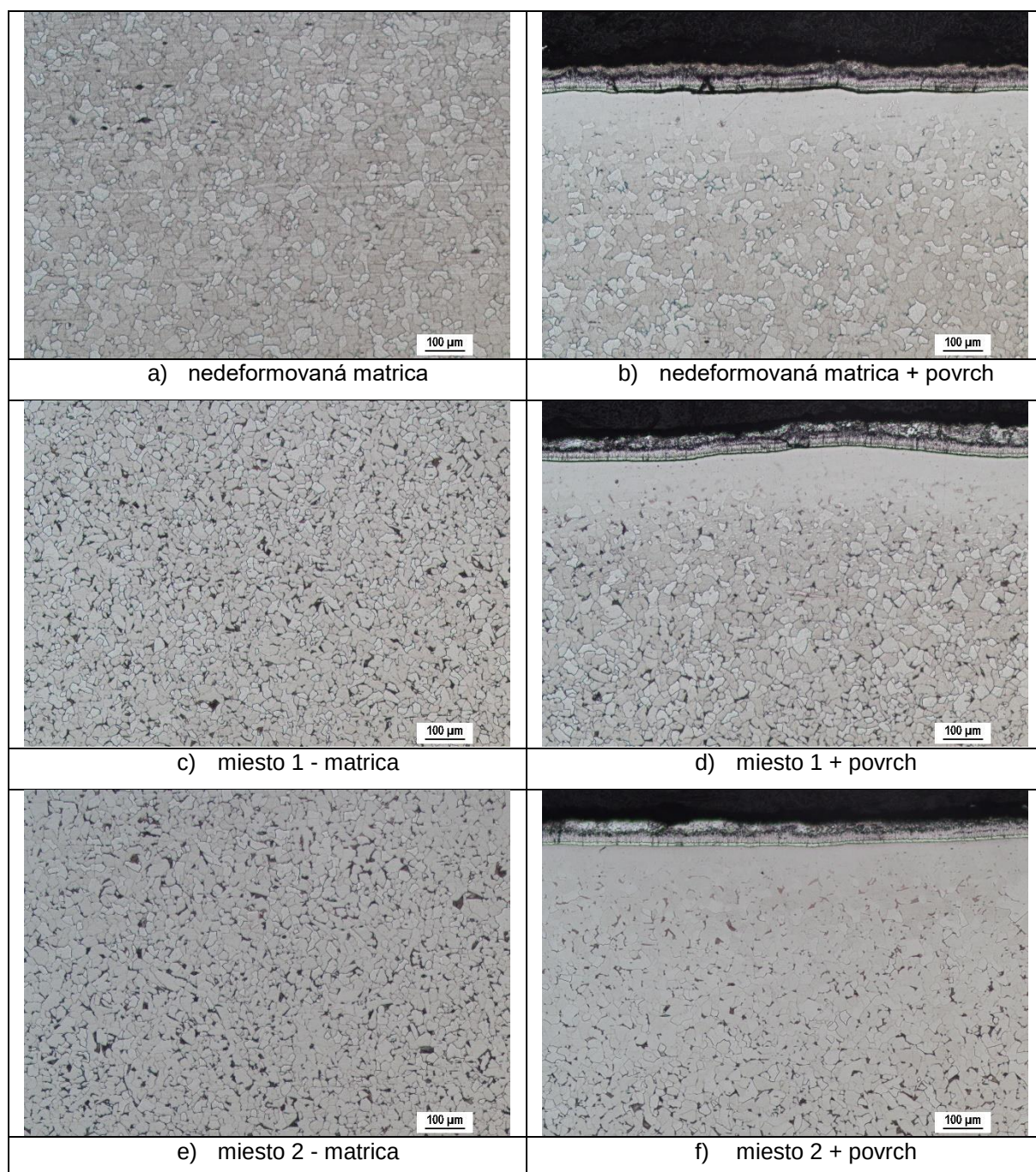
Obrázok 62 – Záznam MBN v mieste, ktoré na zvodnici nebolo zdeformované

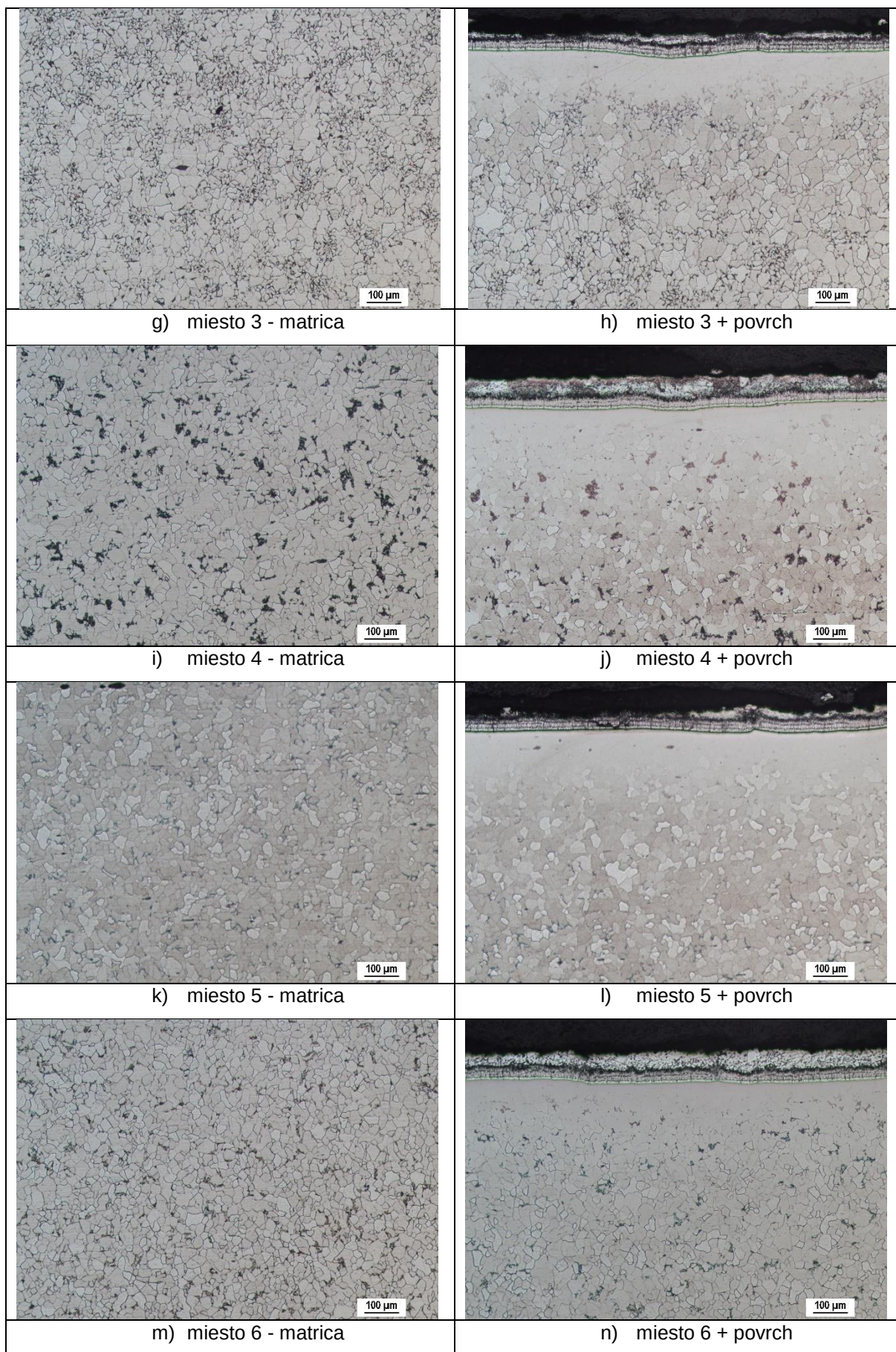


Obrázok 63 – Záznam MBN v mieste č. 2



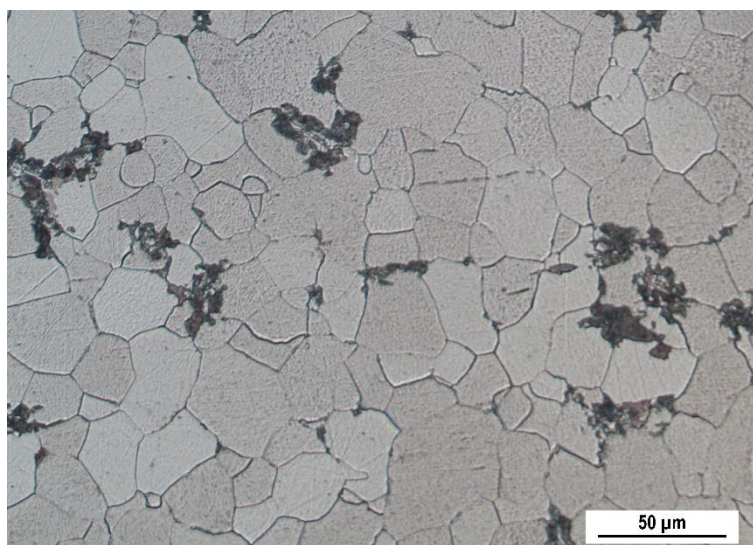
Obrázok 64 – Záznam MBN v mieste č. 6



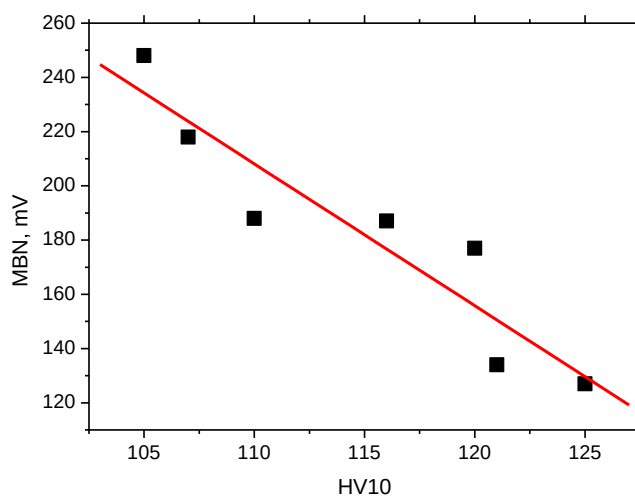


Obrázok 65 – Metalografia matrice ako aj povrchu v jednotlivých miestach deformovanej zvodnice podľa Tabuľky 7

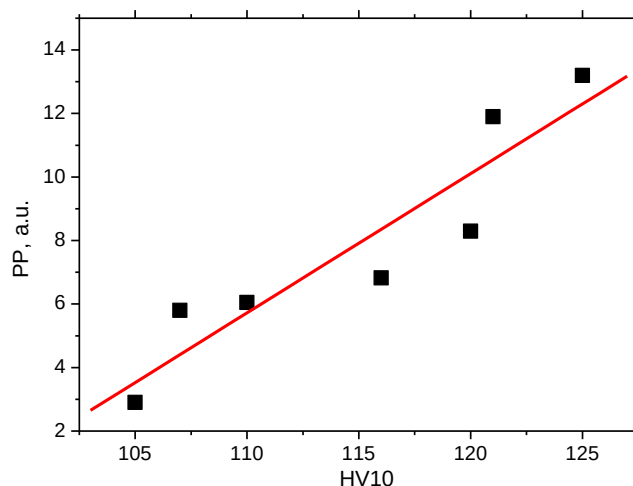
Obrázky 62 až 64 ukazujú magnitúdu MBN pulzov v rôznych miestach merania, a to na nedeformovanej časti (najsilnejší MBN signál), ako aj ich klesajúci charakter v miestach 2 a 6. Takýto charakter zmien (klesajúce hodnoty MBN) indikujú viac rozvinuté deformačné procesy, čo potvrdzuje aj rastúca hodnota PP, ako ju ukazuje Tabuľka 7. Metalografická analýza vo všetkých 7 miestach (Obrázok 65) ukazuje, že matrica nevykazuje preferenčné usmernenie v smere deformácie ani v jednom mieste. Avšak v miestach s viac rozvinutým deformačným procesom sa objavujú tmavé miesta „chumáčovitého“ tvaru (v tomto prípade nejde o perlit), ktoré sú pravdepodobne výsledkom starnutia matrice po deformačnom spevnení, keďže analýza nebola realizovaná bezprostredne po deformačnom procese (dopravnej nehode), ale s odstupom viac ako 1 roku. Detail starnutia je vidieť na Obrázku 66.



Obrázok 66 – Detail starnutia materiálu zvodnice po deformačnom spevnení



Obrázok 67 – MBN versus HV10



Obrázok 68 – PP versus HV10

Proces starnutia ovplyvnil aj zmenu tvrdosti matrice, ktorej rozsah je menší ako v prípade laboratórnych meraní, kedy sa merania tvrdosti realizovali do 7 dní od deformácie. Aj napriek tomu Obrázok 67 ukazuje veľmi dobrú koreláciu medzi stupňom deformácie vyjadrenej v dislokačnej hustote a jej zodpovedajúcej HV10 a MBN. MBN s HV10 klesá v súvislosti s rastúcou opozíciou rastúcej dislokačnej hustoty. Tento fakt potvrdzuje aj vzťah medzi HV10 a PP (pozri Obrázok 68). Ako už bolo vyššie uvedené, PP úzko súvisí s mechanickou tvrdosťou, a teda dislokačnou hustotou, ktorá obvykle u tohto typu materiálu rastie so stupňom pretvorenia (deformačného spevnenia). PP s HV10 rastie.

7.1 Záver overovacej fázy využiteľnosti MBN na monitorovanie stavu zvodníc po deformáciách získaných z reálnej praxe

Záverom je teda možné konštatovať, že MBN možno využiť na monitorovanie stupňa pretvorenia zvodnice. Pri silne deformovaných prvkoch je táto deformácia viditeľná voľným okom. Silne deformované zvodnice v podstate nie je možné opätovne využiť. Stáva sa však, že dochádza k redistribúcii zaťaženia zo silne deformovanej zvodnice do susednej zvodnice, ktoré už nie sú namáhané ohybom, ale len ťahom. Takéto zvodnice zostávajú priame, vizuálne deformačným procesom nedotknuté, avšak v mieste prenosu zaťaženia môžu byť plasticky pretvorené. V tomto prípade by MBN technika mohla byť použitá na posúdenie miery poškodenia takejto zvodnice, a teda na určenie možnosti jej sekundárneho využitia.

Takéto posúdenie by mohlo v budúcnosti šetriť náklady na opravy častí zvodidiel po dopravných nehodách, kedy by sa nahrádzali len prvky, ktoré preukázateľne nemajú dostatočnú schopnosť absorbovať kinetickú energiu nárazov.

8 Definovanie prahových hodnôt vybraných magnetických parametrov rozhodujúcich pre opätovné použitie zvodnice

Pre podmienky magnetizácie, ako sú uvedené v tabuľke 1 (kap. 4.3.), sú prahové hodnoty magnetických parametrov uvedené v Tabuľke 8.

Tabuľka 8 – Prahové hodnoty MBN a PP v RD a TD

Parameter	Smer merania	Prahová hodnota
MBN	RD	Minimálna 550 mV
MBN	TD	Minimálna 550 mV
PP	RD	Maximálna $-0,15 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ ($-3,25 \text{ a.u.}$)
PP	TD	nevyužívať

Poznámka: RD – smer merania do dĺžky zvodidla, TD – smer merania po šírke zvodidla

Prahové hodnoty MBN vychádzajú zo závislosti medzi MBN a pomerným pretvorením, pričom sa zohľadňuje aj delaminácia povrchu. MBN ako efektívna hodnota signálu (rms) je v oboch smeroch (RD aj TD) v podstate rovnaká, ako to ukazuje Tabuľka 8. V prípade PP je možné použiť len smer RD, pretože v smere TD dochádza k veľkému rozptylu údajov s ohľadom na rýchlosť deformácie a veľkosť

pretvorenia. V TD smere a v prípade parametra PP nie je teda v súvislosti s tým možné spoľahlivo určiť prahovú hodnotu. Hodnota parametra PP v RD sa uvádza jednak v jednotkách, ktoré poskytuje priamo softvér (-3,25 a.u. – a.u. znamená arbitrary units), a zároveň po prepočítaní v reálnych hodnotách magnetického poľa ($-0,15 \text{ kA.m}^{-1}$).

Prahové hodnoty uvedené v Tabuľke 8 sú platné pre zvodnice - typ NH4. Pre stanovenie prahových hodnôt MBN pre ostatné typy zvodníc je potrebné vykonať ďalší výskum a merania.

9 Záver

Cieľom rozborovej úlohy bolo posúdenie možnosti využitia nedeštruktívnych magnetických metód pre monitorovanie stavu cestných zvodidiel, s ohľadom na ich funkčné vlastnosti. Pri riešení tejto úlohy bola pre monitorovanie funkčných vlastností využitá metóda magnetického merania Barkhausenovým šumom.

V súčasnej dobe neexistujú záznamy o využívaní tejto metódy pre monitorovanie stavu vlastností zvodidiel. Metóda Barkhausenovho šumu sa však v širokom spektre využíva v strojárskom priemysle na kontrolu a overovanie kvality kriticky namáhaných súčiastok.

Na základe realizovaných laboratórnych skúmaní je možné považovať túto rozborovú úlohu a získané výsledky za výskum.

Na základe výsledkov prezentovaných v tejto rozborovej úlohe je možné konštatovať, že metódu Barkhausenovho šumu je možné použiť pre overovanie funkčných vlastností zvodnice, ako časti zvodidlového systému.

Nakoľko metódou Barkhausenovho šumu je posudzované materiálové pretvorenie zvodnice, je možné konštatovať, že zvodnica, ktorá bola touto metódou vyselektovaná ako vhodná, má mechanické a materiálové vlastnosti na dolnej hranici tolerančného poľa nových zvodníc (Obrázok 28).

Výsledkom realizovaných meraní na zvodnici NH4 je, že pri splnení podmienok definovaných v tejto rozborovej úlohe je zvodnicu možné opätovne použiť. **V zmysle tejto rozborovej úlohy je však nevyhnutné realizovať merania Barkhausenovým šumom pre vyselektovanie nevhodných zvodníc.**

Z hľadiska možného opätovného použitia zvodníc zvodidiel môžu byť predmetom posudzovania principiálne tri prípady. Posúdenie schopnosti absorbovania kinetickej energie je možné na základe kontroly parametrov získaných kalibračnou skúškou, v prípade, že je hrúbka Zn vrstvy v rozsahu 85 až 90 % hrúbky Zn vrstvy deklarovanej výrobcom, je možné pre takúto zvodnicu použiť parametre uvedené v Tabuľke 8.

- 1.) **Zvodnica, ktorá nie je viditeľne zdeformovaná.** Potenciálne môže byť plasticky pretvorená (trvalo predĺžená), keďže bola spriahnutá so zvodnicami, ktoré boli viditeľne deformované. Spojenie zvodníc namáha tieto zvodnice jednoduchým ťahom, a preto tieto zvodnice môžu byť taktiež plasticky pretvorené bez toho, že by to bolo viditeľné.
- 2.) **Zvodnica je viditeľne deformovaná.**
- 3.) **Zvodnice nie sú poškodené nárazom,** avšak dosiahli životnosť deklarovanú výrobcom.

Je potrebné zdôrazniť, že ostatné prvky zvodidlového systému (napr. hrnce, stípičky, spojovací materiál, atď.) musia byť nové, a od výrobcu opätovne inštalovanej zvodnice.

Prahové hodnoty, tak ako sú uvedené v Tabuľke 8, sú platné len pre testovaný typ zvodnice NH4, ktorá bola analyzovaná v kapitole 5 tejto úlohy.

V prípade iných typov (tvarov) zvodnice je potrebné pre určenie prahových hodnôt MBN realizovať kalibračnú skúšku v laboratórnych podmienkach pre posudzovaný typ zvodidla.

Metodike kalibračnej skúšky je venovaná kapitola 5 tejto rozborovej úlohy. Stanovenie nových prahových hodnôt MBN pre požadovaný typ zvodnice je možné vykonať v časovom rozmedzí 2 až 3 dní od dodania referenčnej zvodnice.

Referenčnou zvodnicou sa myslí:

- nedeformovaná zvodnica nová, rovnakého tvaru a rozmerov a od rovnakého výrobcu ako zvodnice posudzované,

- nedeformovaná zvodnica už inštalovaná, rovnakého tvaru, rozmerov a časti cestnej komunikácie ako zvodnice posudzované, avšak z časti, kde nebolo zvodidlo viditeľne deformované.

Kalibráciu je možné vykonať na zvodnici novej, alebo už inštalovanej, pričom jej musí predchádzať kontrola posudzovaných zvodidiel na mieste. Touto kontrolou sa realizuje vizuálna obhliadka posudzovaných zvodníc a taktiež sa meria hrúbka Zn vrstvy pomocou prístroja CM 8825FN (prípadne iným obdobným zariadením). Hrúbka Zn vrstvy má vplyv na útlm signálu Barkhausenovho šumu a tento faktor je potrebné zohľadniť. Ak je hrúbka Zn vrstvy v rozsahu 85 až 90 % hrúbky Zn vrstvy deklarovanej výrobcom, je možné pre takúto zvodnicu použiť kalibračnú závislosť rovnakú ako pre novú zvodnicu rovnakého tvaru, rozmerov, ako aj od toho istého výrobcu.

V opačnom prípade je potrebné realizovať opätovnú kalibráciu. Kalibračná skúška pre iné typy zvodníc má byť realizovaná podľa jednotnej metodiky uvedenej v kapitole 5 tejto rozborovej úlohy. Tento aspekt je dôležitý pri posudzovaní predovšetkým tých zvodníc, ktoré boli využívané v dlhšom časovom období, keďže prirodzene dochádza k poklesu hrúbky ochrannej Zn vrstvy.

Prahová hranica pre Barkhausenov šum pri nových kalibráciách sa určí z ťahovej skúšky realizovanej v laboratórnych podmienkach. Touto skúškou sa stanoví množstvo energie plastickej deformácie, ktorú je matrica schopná absorbovať. Táto energia úzko súvisí s celkovým stupňom zadržania celého zvodidla tak, ako je to uvedené v [T1].

Výsledky tejto rozborovej úlohy sa vzťahujú len na konkrétny diel zvodidlového systému (zvodnice NH4). Z tohto dôvodu aktuálne nevzniká potreba a požiadavka na úpravu súčasných platných TPR, ktoré riešia problematiku zvodidiel.

Aktuálny právny stav neumožňuje opätovné použitie častí zvodidlového systému, a preto výsledky tejto rozborovej úlohy nie je v súčasnej dobe možné uplatniť v praxi a to aj s ohľadom na používanie viacerých zvodidlových systémov na území Slovenska.

Výsledky rozborovej úlohy však potvrdzujú, že overovanie funkčných vlastností zvodnice metódou Barkhausenovho šumu je možné. Pre účely implementácie do praxe sú potrebné ďalšie laboratórne merania pre zvodnice iných typov zvodidlových systémov, vrátane verifikácie meraní prostredníctvom bariérových (nárazových) skúšok podľa normy EN 1317.

Poznámka č. 1: Monitoring, ako je vyššie uvedený, sa týka len zvodnice zvodidla a nie je možné ho uplatniť pre ďalšie prvky (časti) zvodidla.

Poznámka č. 2: Súčasťou monitorovania zvodníc je aj kontrola montážnych otvorov, ktoré prenášajú zaťaženie zvodnice do ďalších nosných prvkov, a ktoré môžu byť poškodené aj v súvislosti s demontážou skrutiek.