

**Univerzita Pardubice**  
**Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Studium dynamické pevnosti dvoufázové oceli**  
**pro autokaroserie**

**Bc. Petr Ondráček**

**Diplomová práce**  
**2018**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Ondráček**  
Osobní číslo: **D16356**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**  
Název tématu: **Studium dynamické pevnosti dvoufázové oceli pro autokaroserie**  
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Představení vysokopevných ocelí s důrazem na feriticko-martenzitickou ocel pro bezpečnostní konstrukční prvky karoserií
2. Analýzy strukturních změn vlivem svařování
3. Návrh a realizace dynamických tahových zkoušek dvoufázové oceli
4. Vyhodnocení dynamických zkoušek zaměřených na vyjádření dynamické meze kluzu a složek energie do destrukce materiálu
5. Fraktografické analýzy mechanismu lomu
6. Souhrnné vyhodnocení dynamického lomového chování, posouzení vlivu rychlosti deformace na dynamického zpevnění oceli

Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**

Rozsah pracovní zprávy: **50 - 60 stran textu a přílohy**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**1.J. Kunz: Aplikovaná lomová mechanika, ČVUT, 2005**

**2.Pluhař J., Puškár A., Koutský J., Macek K., Beneš V.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu, SNTL/Alfa, 1987**

**3.Kuncipál, J.: Teorie svařování, SNTL, 1986**

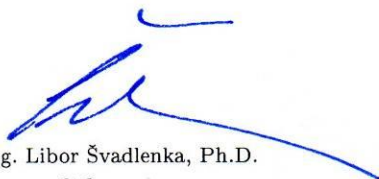
**4.Související normy**

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.**

Výukové a výzkumné centrum v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2018**



doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.  
děkan

L.S.



Ing. Jakub Vágner, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. února 2018

## PROHLÁŠENÍ

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

V Proseči dne 11.5.2018

Bc. Petr Ondráček

## **PODĚKOVÁNÍ**

Zde bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomáhali s vypracováním této práce. A to především paní prof. Ing. Evě Schmidové, Ph.D. a prof. Ing. Bohumilu Culkovi, CSc. za praktické rady a pomoc při provedení jednotlivých zkoušek.

## **ANOTACE**

Tato diplomová práce je zaměřena na zjištění chování dvoufázové oceli, zejména na dynamickou pevnost a vliv rychlosti deformace. Zkoumaná ocel byla feriticko-martenzitická.

V teoretické části je uveden přehled vysokopevných ocelí. Tyto oceli se používají pro bezpečnostní prvky karoserií silničních vozidel, kde zvyšují pasivní bezpečnost a zároveň snižují celkovou hmotnost vozidla.

V experimentální části byla provedena analýza mikrostruktury dvoufázové oceli. Základní materiál byl použit při statických a dynamických tahových zkouškách. Jednotlivé vzorky byly odebrány z vyrobeného výlisku podélníku automobilu. Indentační zkouškou tvrdosti byl zjištěn dosah a intenzita zpevnění po provedených statických a dynamických zkouškách.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Dvoufázová ocel, vysokopevná ocel, bodový odporový svar, podélník automobilu, tepelně ovlivněná oblast, dynamická pevnost, deformační rychlost, indentační zkouška

## **TITLE**

Study of dynamic strength of dual-phase steel for body car

## **ANNOTATION**

This diploma thesis is focused on the detected behavior of two-phase steel, primarily on the dynamic strength and influence velocity of deformation. The tested steel was ferritic-martensitic.

In the theoretical part is instructing overview high-strength steels. These steels are used for safety parts of body road vehicles, where they increase passive safety and while lowering the total vehicle weight.

In the experimental part was analyzing the microstructure of two-phase steel. The base material was used in static and dynamic tensile tests. The individual samples were taken from the manufactured press longitudinal part car. The indentation test of hardness was detected range and intensity strengthening after the static and dynamic tests.

## **KEYWORDS**

Dual-phase steel, high-strength steel, resistance spot weld, longitudinal part car, heat affected zone, dynamic strength, deformation speed, indentation test

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED VYSOKOPEVNÝCH OCELÍ PRO BEZPEČNOSTNÍ PRVKY AUTOKAROSERIÍ.....</b>	<b>13</b>
2.1	Vysokopevné oceli – HSS ocel (High-Strength Steel).....	14
2.2	Pokročilé vysokopevné oceli – AHSS (Advanced High-Strength Steel).....	16
2.3	Ultra vysokopevné oceli – UHSS (Ultra High-Strength Steel).....	23
<b>3</b>	<b>ANALÝZA STRUKTURNÍCH ZMĚN VLIVEM SVAŘOVÁNÍ.....</b>	<b>25</b>
3.1	Výběr referenčního materiálu pro zkoušky, příprava vzorků.....	26
3.2	Výsledky strukturní analýzy.....	28
3.3	Mikrostruktura základního materiálu.....	28
3.4	Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti materiálu – TOO.....	30
3.5	Mikrostruktura svarového kovu.....	32
<b>4</b>	<b>NÁVRH A REALIZACE DYNAMICKÝCH TAHOVÝCH ZKOUŠEK DVOUFÁZOVÉ OCELI.....</b>	<b>35</b>
4.1	Návrh zkušebních vzorků.....	35
4.2	Zkoušení podle normy ČSN EN ISO 26203.....	35
4.3	Vlastní měření.....	36
4.3.1	Příprava vzorků.....	36
4.3.2	Měření.....	38
<b>5</b>	<b>VYHODNOCENÍ DYNAMICKÝCH ZKOUŠEK.....</b>	<b>40</b>
5.1	Vyhodnocení dynamického zpevnění.....	42
5.1.1	Statická tahová zkouška.....	42
5.1.2	Výpočet statické meze kluzu.....	43
5.1.3	Výpočet dynamické meze kluzu.....	45
<b>6</b>	<b>FRAKTOGRAFICKÁ ANALÝZA MECHANIZMU LOMU.....</b>	<b>47</b>
6.1	Analýza dynamického lomu.....	47
6.2	Analýza statického lomu.....	50
<b>7</b>	<b>POSOUZENÍ VLIVU RYCHLOSTI DEFORMACE NA ZPEVNĚNÍ OCELI.....</b>	<b>52</b>
7.1	Vliv rychlosti deformace materiálu.....	52
7.2	Indentační měření po dynamické zkoušce.....	52
7.3	Indentační měření po statické zkoušce.....	55
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>58</b>

<b>9</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>60</b>
<b>10</b>	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>62</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Použité materiály karoserie ŠKODA Octavia III. [3] .....	13
Obrázek 2: Tloušťky plechů u Škody Octavia III. v [mm] [3] .....	14
Obrázek 3: Graf znázorňující zpevnění HB efektem [1] .....	16
Obrázek 4: ARA diagram, a) bez Mo, b) s Mo a zakreslenou ochlazovací křivkou [1] .....	20
Obrázek 5: Přední podélník .....	25
Obrázek 6: Snímek svarové čočky.....	26
Obrázek 7 a Obrázek 8: Zalisovaný vzorek č. 1 a vzorek č. 2.....	27
Obrázek 9: Makrosnímek svarové čočky s místem odběru .....	28
Obrázek 10: Mikrostruktura základního neovlivněného materiálu .....	29
Obrázek 11: Detail základního neovlivněného materiálu .....	29
Obrázek 12: Přejednostně ovlivněné oblasti .....	30
Obrázek 13: Teplotně ovlivněná oblast .....	31
Obrázek 14: Detail teplotně ovlivněné oblasti - pásmo částečné austenitizace.....	31
Obrázek 15: Detail teplotně ovlivněná oblast – pásmo plné austenitizace.....	32
Obrázek 16: Svarový kov .....	33
Obrázek 17: Staženiny ve svarovém kovu vzorku č.2.....	34
Obrázek 18: Detail svarového kovu vzorku č.2.....	34
Obrázek 19: Přední podélník – vrchní pohled .....	37
Obrázek 20 Přední podélník – pohled z vnitřní části.....	37
Obrázek 21: Přední podélník – pohled z vnější části.....	38
Obrázek 22: Upínací zařízení se vzorkem .....	39
Obrázek 23: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 7 .....	41
Obrázek 24: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 14 .....	41
Obrázek 25: Záznam statické zkoušky vzorku č. 2 .....	43
Obrázek 26: Postup vyhodnocení $F_{kluzu 0,2}$ vzorku č. 2.....	43
Obrázek 27: Postup vyhodnocení $F_{kluzu statické}$ vzorku č. 2.....	44
Obrázek 28: Postup vyhodnocení $F_{kluzu dynamické}$ vzorku č. 14.....	45
Obrázek 29: Porovnání statické a dynamické meze kluzu a pevnosti .....	46
Obrázek 30: Lomová plocha vzorku č. 7 .....	47
Obrázek 31: Struktura lomové plochy vzorku č. 7 .....	48
Obrázek 32: Lomová plocha vzorku č. 14 .....	49
Obrázek 33: Mikrostruktura lomové plochy vzorku č. 14.....	49

Obrázek 34: Lomová plocha vzorku č. 12 .....	50
Obrázek 35: Mikrostruktura lomové plochy vzorku č. 12 .....	51
Obrázek 36: Nákres měřených míst.....	53
Obrázek 37: Průběhy indentační zkoušky neovlivněného materiálu.....	53
Obrázek 38: Průběhy indentační zkoušky ovlivněného materiálu.....	54
Obrázek 39: Průběhy indentační zkoušky neovlivněného materiálu.....	56
Obrázek 40: Průběhy indentační zkoušky ovlivněného materiálu.....	57

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Chemické složení oceli .....	26
Tabulka 2: Naměřené hodnoty dynamické zkoušky .....	40
Tabulka 3: Hodnoty statické zkoušky .....	44
Tabulka 4: Vypočítané hodnoty ze statické zkoušky .....	45
Tabulka 5: Hodnoty dynamické zkoušky .....	46
Tabulka 6: Mezní síla v základním materiálu - dynamika .....	54
Tabulka 7: Mezní síla v ovlivněném materiálu - dynamika .....	55
Tabulka 8: Mezní síla v základním materiálu - statika .....	56
Tabulka 9: Mezní síla v ovlivněném materiálu - statika .....	57

# 1 ÚVOD

V dnešní době je zapotřebí při návrhu nového automobilu splňovat různé podmínky. Mezi hlavní požadavky patří důraz na životní prostředí (ekologii) a bezpečnost. Tyto dva základní parametry jsou protichůdné.

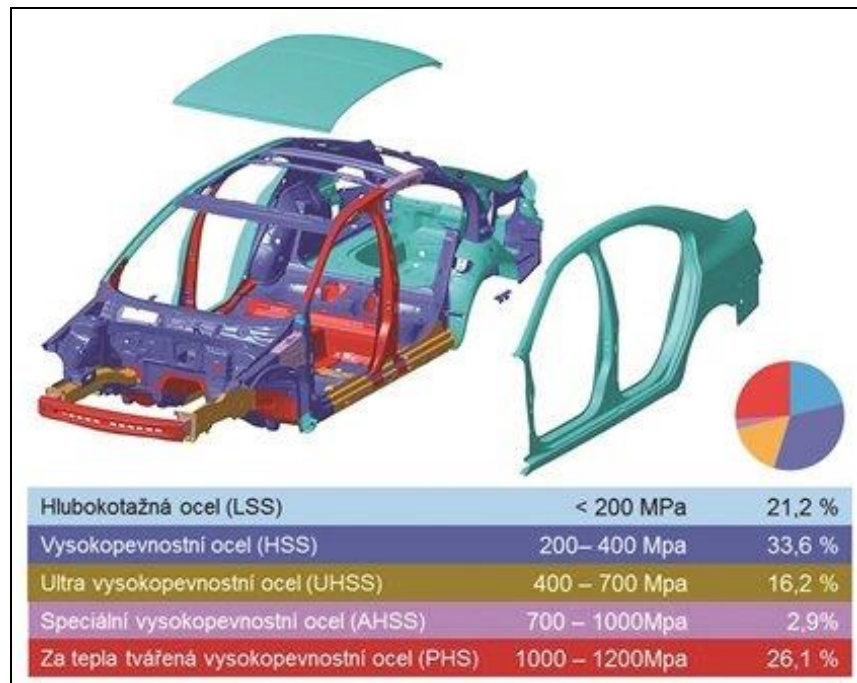
S požadavky na ekologii jsou úzce spjaty emisní normy EURO. Jsou to závazné normy Evropské unie stanovující limitní hodnoty škodlivin ve výfukových plynech zážehových a vznětových motorů. První norma EURO I začala platit v roce 1992 a aktuálně platí norma EURO IV z roku 2014. Limity jsou stanoveny pro škodliviny: oxid uhelnatý (CO), uhlovodíky (HC), oxidy dusíku (NOx) a množství pevných částic (PM). Snížení emisí lze dosáhnout snížením spotřeby pohonných hmot. Základním konstrukčním řešením ovlivňujícím spotřebu paliva je snížení hmotnosti karoserie automobilu. Toho lze dosáhnout zmenšením tloušťky použitých plechů nebo nahrazování nízkopevné oceli za vysokopevnostní martenzitické oceli, ze kterých se vyrábějí bezpečnostní prvky karoserie.

Druhým hlavním aspektem je bezpečnost vozidla jak pro posádku, tak i pro okolní účastníky silničního provozu (například cyklisty a chodce). Z tohoto hlediska je třeba zajistit, aby při nárazu nedocházelo k deformaci prostoru pro posádku. Zároveň je nutné, aby karoserie rozložila náraz na delší časový úsek, a tím nedocházelo k velkému zrychlení posádky vozidla, které by mělo za následky vnitřní zranění.

Ke snížení hmotnosti karoserie současně se zvětšením její pevnosti je nutné vyvíjet a používat vysokopevné oceli. Jedním druhem z aktuálně aplikovaných ocelí jsou různé pevnostní stupně dvoufázových feriticko-martenzitických ocelí. Cílem práce bylo přispět k poznání chování vybraného typu oceli při zvýšené rychlosti zatěžování. Zároveň byly provedeny analýzy strukturních změn, vyvolaných bodovým odporovým svařováním, používaným při stavbě autokaroserie.

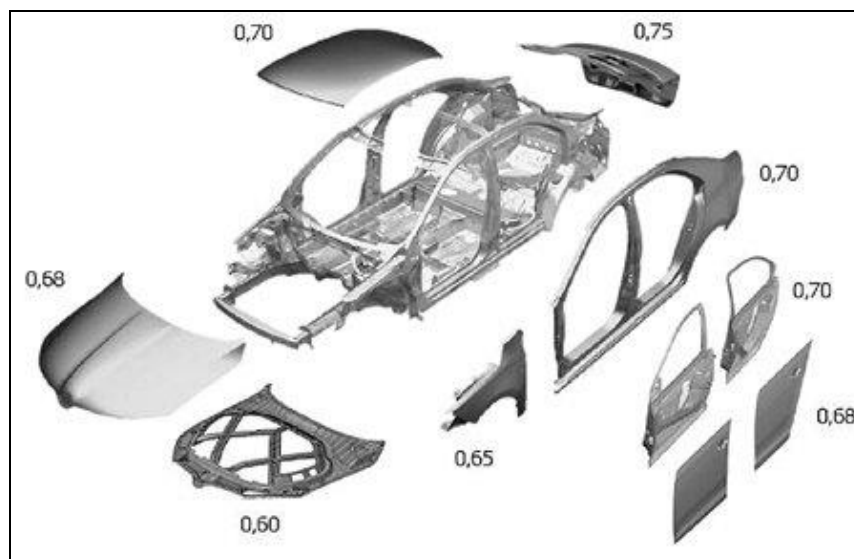
## 2 PŘEHLED VYSOKOPEVNÝCH OCELÍ PRO BEZPEČNOSTNÍ PRVKY AUTOKAROSERIÍ

Karoserie automobilu je složena z různých druhů materiálů o odlišných vlastnostech. Stále větší zastoupení mají vysokopevné oceli. Příklad použití těchto materiálů je znázorněn na obrázku 1 na vozidle Škoda Octavia III.



Obrázek 1: Použité materiály karoserie ŠKODA Octavia III. [3]

Nahrazování nízkopevných ocelí vysokopevnými má zásadní vliv na možnost snižování tloušťky materiálu se zachováním (zvyšováním) tuhosti karoserie. Na obrázku 2 jsou znázorněny jednotlivé tloušťky plechů v různých částech karoserie.



Obrázek 2: Tloušťky plechů u Škody Octavia III. v [mm] [3]

Vysokopevné oceli jsou všechny slitiny kovových materiálů, které splňují následující podmínku:

$$R_{p\ 0,2} \geq \frac{E}{150}$$

[2]

$R_{p\ 0,2}$ .....smluvní mez kluzu [MPa]

$E$ .....modul pružnosti [MPa]

Vysokopevné oceli dělíme podle pevnosti do těchto skupin:

- vysokopevné – HSS
- pokročilé vysokopevné – AHSS
- ultra vysokopevné – UHSS

## 2.1 Vysokopevné oceli – HSS ocel (High-Strength Steel)

Tyto oceli jsou nízkolegované s jednofázovou feritickou strukturou. S mezí kluzu 210 až 620 MPa a mezí pevnosti 270 až 800 MPa. [8]

### **IF-HS ocel (Interstitial Free – High Strength Steel)**

Struktura oceli je feritická s nízkým obsahem uhlíku, díky kterému má větší tažnost. Mezi další vlastnosti patří vysoký exponent deformačního zpevnění a nízká mez kluzu ( $R_{p0,2}$ ). Zvýšení pevnosti lze dosáhnout přidáním legujícího prvku fosforu a zjemněním zrna.

Tato ocel se používá pro tvarově složité součásti, jako jsou nárazníky, dveře, kapoty a střechy. Je možné ji svařovat tavnými i tlakovými metodami.

Mechanické parametry:

- mez kluzu 180 až 310 MPa,
- mez pevnosti 270 až 390 MPa. [8]

### **HSLA ocel (High-Strength Low-Alloy Steel)**

Ocel je nízkouhlíková (0,05 až 0,26 %) a nízkolegovaná nebo mikrolegovaná (0,01 až 0,1 %) s jemnozrnnou strukturou. Mezi legující prvky patří například měď, titan, vanad, chrom a niob. Mikrolegující prvky vytvářejí karbidy a nitridy, které precipitačně zvyšují pevnost a zjemňují strukturu, což má za následek dosažení vysoké meze kluzu.

Mezi hlavní přednosti této oceli patří dobrá odolnost proti atmosférické korozi, dobrá tvárnost a svařitelnost. Používají se pro dynamicky namáhané díly například pro části podvozku, výztuhy dveří a nárazníků.

Mechanické parametry:

- mez kluzu 240 až 620 MPa,
- mez pevnosti 290 až 800 MPa. [8]

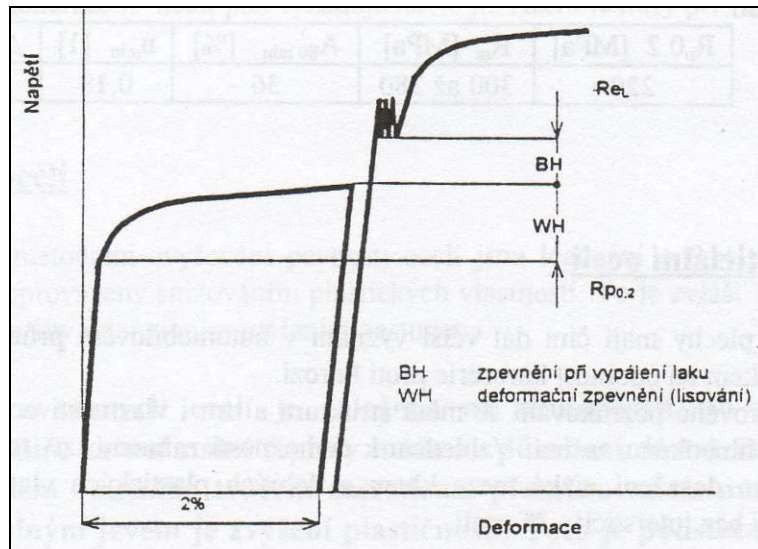
### **BH ocel (Bake Hardening Steel)**

Její struktura je feritická s nízkým obsahem uhlíku. Celková pevnost oceli je dána dvěma typy zpevnění.

Prvním typem je deformační zpevnění. Vzniká při tváření oceli válcováním nebo lisováním za studena. Tímto mechanismem zpevnění dochází ke zvýšení meze kluzu o 35 až 40 MPa.

Ke druhému typu zpevnění oceli dochází při tepelném zpracování kontrolovaným žháním. Tento proces je nazýván HB efekt a je založený na nízkoteplotním staticko-napěťovém stárnutí. Zpevnění závisí na množství rozpuštěného uhlíku v původní struktuře feritické oceli. Na obrázku 3 je znázorněn průběh napětí bez a s HB efektem.

Mezi další důležité prvky ovlivňující velikost zpevnění patří mangan, fosfor a křemík. V automobilovém průmyslu toto stárnutí probíhá při vypalování laku částí karoserie. Teplota vypalování je cca 170 °C po dobu 20 minut.



Obrázek 3: Graf znázorňující zpevnění HB efektem [1]

Vzhledem k nízkému obsahu uhlíku a legujících prvků jsou oceli dobře svařitelné. Mají dobré únavové vlastnosti, schopnost výrazně absorbovat mechanickou energii a vysokou odolnost proti vniknutí cizího tělesa (vrypům). Používají se na výrobu automobilových součástí, jako jsou střechy, vnější díly bočních dveří, kapoty motoru, víka zavazadlového prostoru a nárazníkové výlisky.

Mechanické parametry:

- mez kluzu 180 až 360 MPa,
- mez pevnosti 290 až 480 MPa. [8]

## 2.2 Pokročilé vysokopevné oceli – AHSS (Advanced High-Strength Steel)

Do této kategorie patří TRIP ocel, TWIP ocel, CP ocel, Martenzitická a Dvoufázová ocel.

### 1) TRIP ocel (Transformation Induced Plasticity Steel)

Tato ocel je vícefázová s transformačně indukovanou plasticitou. Základní mikrostruktura oceli je feritická (50 až 60 %), ve které se dále nachází bainit (25 až 40 %), ostrůvky zbytkového austenitu (5–15 %) a v některých případech se vyskytuje i martenzit

(v řádu jednotek %). Obsahují malé množství legujících prvků. Například u běžných ocelí (800 MPa) je celkový obsah legujících prvků přibližně 3,5 % hmotnosti. [6]

Při tomto TRIP efektu dochází k přeměně zbytkového austenitu na martenzit. Aby došlo k tomuto efektu, musí být v oceli minimálně 5 % austenitu. Přeměna probíhá za normální teploty a působení vysokého napětí nebo deformace. Vysokého napětí je dosaženo při zpracování tvářením za studena.

Obsah uhlíku hraje zásadní roli v struktuře TRIP oceli, protože je zásadní pro výsledné materiálové vlastnosti. Zvýšený obsah uhlíku (až 0,24 %) a dalších stabilizujících prvků zabezpečuje potřebné množství austenitu. Dále se v oceli nachází zvýšené hodnoty těchto prvků: křemík, hliník a mangan. Ty slouží k urychlení transformace feritu na martenzit a pro zabránění vzniku karbidů.

Předností těchto ocelí je velká tažnost (až 80 %), vysoké deformační zpevnění a únavová pevnost. U současných ocelí je omezeno množství uhlíku na 0,2 až 0,25 % z důvodu snadného svařování odporovými metodami. Díky těmto vlastnostem jsou oceli vhodné pro konstrukční a bezpečnostní díly karoserií automobilů. Používají se například jako příčné a podélné nosníky, výztuhy B sloupků, nárazníky a prahy dveří.

Mechanické parametry:

- mez kluzu 390 až 800 MPa,
- mez pevnosti 500 až 1050 MPa. [8]

## 2) CP ocel (Complex Phase Steel)

Jedná se o vícefázovou nízkouhlíkovou ocel, která má velmi podobnou strukturu jako TRIP ocel. Struktura je jemnozrnná feriticko bainitická s malým podílem perlitu, martenzitu a zbytkového austenitu. Jemnozrnná struktura je docílena potlačením rekystalizace, případně precipitací mikrolegujícími prvky, a to titanem, niobem a vanadem.

CP oceli s bainitickou maticí mají vynikající tvářitelnost, protože rozdíl mezi tvrdostí bainitu a martenzitu je poměrně malý. Dále má vysoké deformační zpevnění, vysokou tvrdost a pevnost. Mezi nevýhody patří malá deformace. Využívá se na výrobu konstrukčních prvků karoserie, které jsou méně tvarově náročné například výztuže dveří, nárazníků a přírub sedadel.

Mechanické parametry:

- mez kluzu 600 až 920 MPa,
- mez pevnosti 780 až 1130 MPa. [8]

### **3) Dvoufázová ocel - DP (Dual Phase steel)**

První dvoufázové oceli byly vyvinuty ve 30. letech 20. století ve Švédsku. Byly použity v průmyslu v chladírenském systému, kde bylo třeba vysoké korozivní odolnosti. Aby došlo ke zlepšení korozní odolnosti, byly do oceli přidány prvky: chrom, molybden a nikl. Výsledkem vývoje byla první generace dvoufázových ocelí.

V současné době se používá již několikátá generace dvoufázové oceli. Největší využití má v automobilovém průmyslu. Používá se v konstrukčních částech, kde je zapotřebí vysoké pevnosti, dobré svařitelnosti a únavové odolnosti, vysokého deformačního zpevnění a korozivní odolnosti. Díky těmto vlastnostem se z nich vyrábějí základní části karoserie například výztuhy podlah a střech, boční rámy, přední nárazníky, podélníky a ostatní bezpečnostní prvky karoserie automobilu.

Struktura těchto ocelí se skládá z dvou fází. Obsahuje malé množství drahých legujících prvků, proto jsou relativně levné a mají velké využití v automobilovém průmyslu. Dvoufázovou ocel dělíme do skupiny austeniticko-feritických a feriticko-martenzitických.

#### **a) Austeniticko-feritické oceli**

Ocel se skládá ze dvou fází, a to feritu a austenitu. Základní stavební jednotka krystalu feritu je prostorově středěná kubická mřížka a krystalu austenitu je plošně středěná kubická mřížka. Ideální poměr feritu a austenitu ve struktuře je 50 : 50 %. Tohoto poměru je dosaženo přesným chemickým složením oceli. Ocel tedy obsahuje tyto legující prvky: chrom, nikl, molybden a dusík. Kromě ideálního poměru jednotlivých fází je důležitá i jejich čistota na výsledné vlastnosti.

Díky těmto legujícím prvkům dosahují vynikajících mechanických vlastností (houževnatost) a zároveň dobré korozní odolnosti v prostředí obsahující chloridy. Nejsou však kalitelné protože obsahují maximálně 0,03 % uhlíku.

#### **b) Feriticko-martenzitická ocel**

Tvoří skupinu vysoce pevných ocelí tvářených za studena. Jde o nízkouhlíkový materiál s maximálním množstvím uhlíku 0,13 % na bázi mangan – křemík popřípadě obsahují molybden, chrom nebo vanad. Struktura těchto ocelí se skládá ze dvou fází, a to feritické matrice a fáze martenzitu uspořádaného rovnoměrně mezi feritovými zrny. Struktura může obsahovat zbytky austenitu, který napomáhá k výhodné kombinaci pevnostně – plastické charakteristiky. Základní princip mikrostruktury je takový, že tvrdá a křehká martenzitická fáze je uspořádána v měkké a tvárné feritické fázi. Feritu je v oceli 75 až

90 % a martenzitu 10 až 25 %. Čím vyšší je podíl martenzitu v oceli, tím je pevnější a plasticitu naopak ovlivňuje feritická matrice. [3]

Oceli mají schopnost vysokého mechanického zpevnění, což vede ke zvýšení meze kluzu po válcování za studena. Mez kluzu lze dále zvýšit pomocí BH efektu při vytvrzování laku (cca 80 MPa), stejně jako u BH ocelí.

Typické vlastnosti dvoufázové oceli:

- plynulá závislost napětí – deformace bez výrazné meze kluzu,
- nízká mez kluzu a vysoká mez pevnosti,
- vysoká hodnota tažnosti,
- vysoká hodnota koeficientu deformačního zpevnění  $n_s$ ,
- dobrá odolnost proti stárnutí při pokojové teplotě,
- schopnost zvýšení meze kluzu při vypalování laku (HB efekt).

Mez kluzu s rostoucím podílem martenzitu do 10 % klesá a po překonání této hranice se zvyšuje. Zároveň však množství martenzitu by nemělo překročit 20 %, protože by hrozilo shlukování martenzitických ostrůvků ve spojitou fázi. Tento jev by měl za následek prudký pokles plastických vlastností oceli.

Ke zvýšení pevnosti a tvrdosti se přidávají legující prvky mangan, chlor, molybden, nikl a vanad. Obsah uhlíku je minimální, proto se jedná o nízkouhlíkové oceli s jednoduchou svařitelností všemi metodami. Mezi další výhody tohoto druhu oceli patří dobrá tvárnost za studena, vynikající odolnost vůči šíření únavových trhlin, dobrý poměr mezi pevností a plasticitou a vyšší exponent deformačního zpevnění.

Výrobu feriticko-martenzitických ocelí rozdělujeme do dvou metod, které se od sebe liší obsahem legujících prvků nutných k dosažení martenzitické transformace:

#### **a) Metoda interkritického žíhání**

Výchozí materiály jsou za tepla nebo za studena válcované pásy dvoufázové oceli. Za studena válcujeme ve dvoufázové feriticko-austenitické oblasti. V dnešní době je to nejpoužívanější způsob výroby této oceli. Proces interkritického žíhání spočívá v ohřevu materiálu na teplotu žíhání (kdy dochází k rozpadu perlitu) a následném rychlém ochlazení. Velikost teploty je ovlivněna množstvím uhlíku a legujících prvků v oceli.

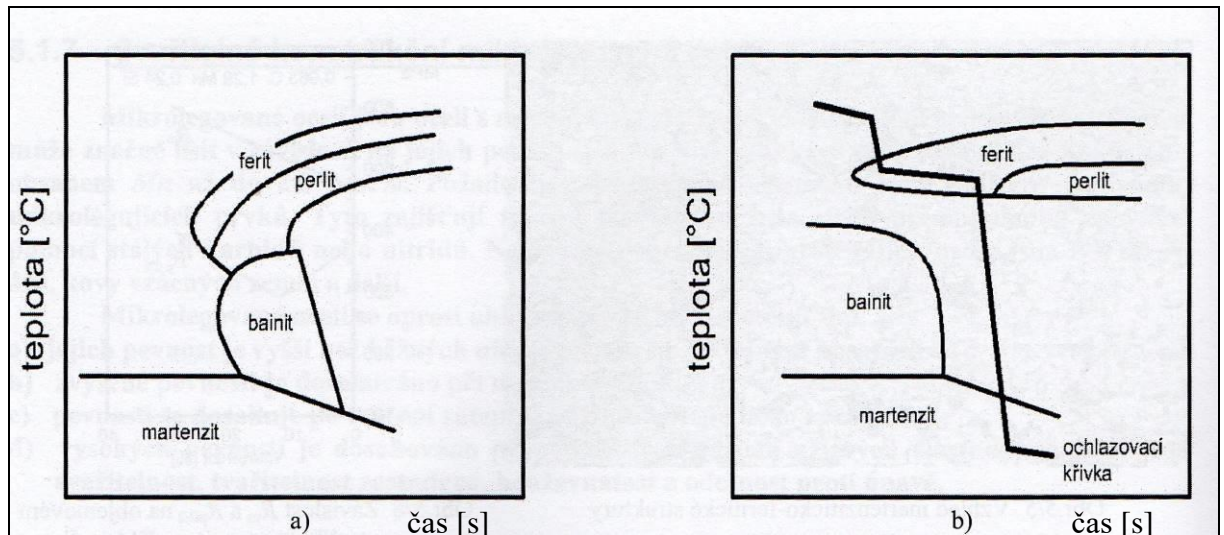
Žíhání může být kontinuální (v kontinuálních žíhacích pecích) nebo stacionární (v pokloповých pecích).

## b) Metoda „as roled“

U této metody se jedná o přímou výrobu pásů s feriticko-martenzitickou strukturou v procesu válcování. Válcování probíhá za tepla. Výhodou oproti předchozímu způsobu je úspora energie, která je potřeba u interkritického žhání a úspora související s výstavbou moderní žhací linky.

Při tomto druhu zpracování je nutná předúprava chemického složení tak, aby při ochlazování nedošlo k vytvoření perlitické struktury. Perlitická struktura má za následek zhoršení tvářitelnosti oceli za studena. Úprava se provádí snížením obsahu uhlíku na 0,04 až 0,08 %, omezením množství křemíku na maximálně 1,5 % a přidáním 0,3 až 0,5 % molybdenu.

Pro dosažení stanoveného množství martenzitu v oceli je třeba znát ARA diagram této oceli. Přidání molybdenu do oceli je důležité, protože bez něho nelze při ochlazování oceli získat feriticko martenzitickou strukturu bez perlitu. V původní oceli bez přidání molybdenu dochází při chladnutí ke vzniku perlitu již po 10 sekundách, kdežto v oceli s již přidaným výše zmiňovaným prvkem dochází k jeho vzniku již po 10 000 sekundách. Proces ochlazování je znázorněn na obrázku 4.



Obrázek 4: ARA diagram, a) bez Mo, b) s Mo a zakreslenou ochlazovací křivkou [1]

Mechanické parametry:

- mez kluzu 300 až 780 MPa,
- mez pevnosti 400 až 1120 MPa, [8]
- tažnost více než 30 %,
- deformační zpevnění  $n_s = 0,19$  až  $0,22$ . [11]

## **Vliv legujících prvků na vlastnosti feriticko-austenitické oceli**

### **Chróm**

Vytváří na povrchu oceli pasivní film, který jí chrání před korozi. Minimální obsah v dvoufázové oceli je 20 %. Další vlastností chromu je feritotvornost. Tento jev podporuje tvorbu feritické kubické prostorově středěné mřížky.

### **Molybden**

Stejně jako chrom je molybden feritotvorný prvek. Zvyšuje odolnost oceli proti pittingu (důlkové korozi). Obsah v oceli je maximálně 4 %.

### **Dusík**

Zvyšuje pevnost, houževnatost oceli a odolnost proti důlkové a štěrbinové korozi. Patří mezi prvky austenitotvorné. Dusík je levný legující prvek.

### **Nikl**

Nikl stabilizuje austenit, protože podporuje přeměnu kubické krystalové mřížky feritu z prostorově středěného na plošně středěnou austenitu. Stejně jako dusík patří mezi austenitotvorné prvky. V oceli je obsaženo 1,5 až 7 % niklu.

### **Křemík a Mangan**

Křemík podporuje feritickou přeměnu. Mangan slouží ke stabilizaci austenitu a zpevňuje tuhý roztok feritu.

## **Vliv deformačního chování na velikost feritových zrn a objemu martenzitu**

Zlepšení mechanických vlastností a chování dvoufázových ocelí lze dosáhnout zjemněním velikosti feritových zrn, konkrétně účinkem ultrajemné feritové fáze a objemového podílu martenzitu v DP oceli na deformační chování. Tento efekt zpevnění je finančně náročný.

Ve zprávách o dvoufázových ocelích se uvádí, že existují tři fáze deformačního zpevnění. V první fázi dochází k elastické deformaci u obou složek. V druhé fázi se martenzit stále deformuje elasticky, zatímco ferit se začne deformovat plasticky. V poslední fázi se obě

složky deformují stejně, a to plasticky. To znamená, že plastické deformaci martenzitu předchází velká deformace feritu.

Schwindt a kol. ve své práci dokázali, že plasticita martenzitu je důležitým faktorem, podle kterého lze předvídat tvářitelnost ocelového plechu DP 780. Dále dospěli k závěru, že plastická deformace se nejprve objevuje v částech s velkými feritovými zrny a při nízkém obsahu martenzitu. Největší napětí se nachází v oblastech s vysokou plastickou deformací. [15]

Zmenšování velikosti feritických zrn vede ke změně mechanismu deformace, kdy ocel má větší pevnost a malou ztrátu tažnosti. Nejen zmenšování feritických zrn, ale i procentuální podíl martenzitické fáze, má vliv na pevnost oceli. Dále lze dokázat, že čím jemnější feritické zrno, tím je více omezena jeho deformace a dříve dochází k plastické deformaci martenzitu. Největší pevnost je při kombinaci účinku velkého zjemnění zrna a vyšších podílech martenzitické fáze. Zhoršení tažnosti bylo pozorováno u středního a vysokého podílu martenzitu.

### **Deformační zpevnění DP oceli**

Autoři Miura a kol. a autoři Uenishi a Teodosiu zkoumali schopnost vysokopevných ocelí absorbovat nárazovou energii. Výsledky jejich pokusů ukazují, že vysoká dynamická pevnost a zpevnění mohou zlepšit stabilitu procesu vzpěru, což má pozitivní vliv na vyšší absorbující energii při nárazu automobilových dílů. Především dvoufázové oceli mohou absorbovat více energie během dynamické deformace než jiné druhy ocelí se stejnou statickou mezní pevností.

Haidong Yu, Yongjin Guo a Xinmin Lai provedli statické a dynamické tahové zkoušky pro ocel DP600 při rychlosti deformace od  $10^{-4}$  do  $10^3$  s<sup>-1</sup>. Výsledky ukazují závislost mechanického chování na rychlosti deformace pro tuto ocel. Hodnoty napětí při vysokých deformačních rychlostech jsou téměř dvojnásobné než u nízkých deformačních rychlostí. Při vysokých rychlostech deformace existuje horní a dolní mez kluzu, což je odlišné od zkoušek při nízkých deformačních rychlostech. [16]

Celkové napětí a deformace je podobné, jak u diagonálně, tak i příčně orientovaných plechů (směru válcování). Nejvyšší pevnost byla zaznamenána v příčném směru. [17]

Ve studii věnované dvoufázové oceli typu DP 600 autoři zjišťovali vliv deformační rychlosti na mechanické vlastnosti. Pro porovnání statických a dynamických vlastností byla použita dvoufázová ocel DP 600 s tloušťkou 1,5 mm. Ve struktuře se nachází 11,62 %

martenzitu. Z naměřených hodnot pro ocel DP 600 dochází k pozorovatelnému zvýšení meze kluzu a pevnosti v tahu.

Mikrostruktura se výrazně změnila vlivem deformačního procesu při statickém i dynamickém zatížení. Při dynamickém zatížení se zvýšila hustota dislokací, které ovlivňují zvýšení meze kluzu oceli. Důvodem je, že při vyšší rychlosti deformace se sníží potřebný čas na překonání těchto překážek. Z měření vyplývá, že pro tuto konkrétní ocel jsou hodnoty meze pevnosti při statické zkoušce (rychlosti zatížení  $1,6 \times 10^4$  m/s) 561 MPa. Při dynamických zkouškách se pohybovala mez pevnosti 705 MPa při 6 m/s, 824 MPa při 12 m/s a 894 MPa při rychlosti 20 m/s. [18]

### c) Martenziticko-austenitická ocel:

Struktura oceli se skládá z cca 75 % z martenzitu a z cca 25 % austenitu. Tento druh oceli je charakteristický vysokou pevností, dobrou svařitelností, dobrou tažností a odolností proti křehkému lomu.

## 2.3 Ultra vysokopevné oceli – UHSS (Ultra High-Strength Steel)

Struktura oceli je složená z martenzitu a zbytkového austenitu. Největší výhodou těchto ocelí je velmi vysoká pevnost. Z tohoto důvodu lze použít menší množství materiálu, a tudíž dochází k úspoře hmotnosti. Což má za následek, že po deformaci dílu z této oceli ho již nelze vrátit do původního tvaru. Například při havárii automobilu musí dojít k výměně dílu, protože ho již nelze opravit.

Díky těmto vlastnostem se používají v automobilech na výztuže, prahy, rám, středový střešní oblouk a sloupky automobilu. Ultra vysokopevné oceli lze rozdělit na TWIP a martenzitické oceli.

Mechanické parametry:

- mez kluzu  $550 > \text{MPa}$ ,
- mez pevnosti  $980 > \text{MPa}$ . [8]

### 1) TWIP ocel (Twinning Induced Plasticity)

Tyto oceli jsou vysoce legované manganem (17 až 24 %) a dále jsou legovány hliníkem (zamezuje přeměně austenitu na martenzit) a křemíkem (zlepšuje pevnost). Výše uvedené legující prvky způsobují, že je ocel plně austenitická. Díky této struktuře má TWIP

ocel velmi vysokou tažnost až 125 %, velké deformační zpevnění a pevnost. Při zatížení dochází ke změně krystalografické orientaci v důsledku tvorby dvojčatění.

Používají se v deformačních zónách karoserií automobilů. Vlivem vysokého obsahu manganu jsou obtížně svařitelné z důvodu vzniku trhlin ve svaru.

Mechanické parametry:

- mez kluzu 280 až 1350 MPa,
- mez pevnosti 580 až 1470 MPa. [8]

## 2) Martenzitická ocel (Martensitic Steel)

Struktura oceli je martenzitická (minimálně 30 %) s malým množstvím feritu a bainitu. Tato ocel obsahuje do 1 % uhlíku a do 18 % chromu. Martenzit zde vzniká transformací z austenitu při válcování za tepla a následným zakalením. Po tomto zakalení jsou často oceli ještě popuštěny, aby došlo ke zlepšení tažnosti. Tím získáme ocel tvárnou při velmi vysoké pevnosti. Zvýšení pevnosti martenzitu, a tím i lepší kalitelnosti, lze dosáhnout zvýšením množství uhlíku nebo legujících prvků, jak samostatně, tak v různé kombinaci. Legující prvky jsou mangan, křemík, chrom, molybden, bór, vanad, nikl. V závislosti na podílu martenzitu v oceli má tažnost 5 až 15 %.

Nejčastěji používané martenzitické korozivzdorné oceli mají 0,25 % uhlíku a 13 % chromu. V automobilovém průmyslu se používají pro bezpečnostní prvky autokaroserií, kde se využívá vysoké pevnosti a vysoké únavové odolnosti. Mezi tyto místa patří například části předního a zadního nárazníku, boční prahové výztuže, střešní a dveřní výztuže. Martenzitické oceli mají dobrou svařitelnost.

Mechanické parametry:

- mez kluzu 720 až 1200 MPa,
- mez pevnosti 800 až 1650 MPa. [8]

### 3 ANALÝZA STRUKTURNÍCH ZMĚN VLIVEM SVAŘOVÁNÍ

Jako zkoumaný materiál byla vybrána dvoufázová feriticko-martenzitická ocel DP 450 dodaná ve formě výlisku předního podélníku automobilu. Ten je zobrazen na obrázku 5 a slouží jako nosná část pro uchycení dalších součástí automobilu, dále jako bezpečnostní prvek při čelním nárazu. Při nárazu se podélník zdeformuje, a tím absorbuje část energie, která vznikla při nárazu automobilu. Eliminuje se tak energie působící na posádku vozidla, a tím se sníží pravděpodobnost těžkého zranění posádky.

Podélník byl vyroben z výlisků plechů o různých tloušťkách spojený bodovým svařováním. Například na karoserii Škoda Octavia II. je 5000 bodových svarů. [3]



**Obrázek 5: Přední podélník**

Podle normy EN 10152 má tato ocel mez kluzu 280 až 340 MPa a mez pevnosti 450 až 530 MPa. Je stanoveno chemické složení a maximální hodnoty jednotlivých prvků. Mezi tyto prvky patří množství uhlíku 0,08 %, manganu 1,6 % a křemíku 0,4 %. [10]

Měření chemického složení bylo provedeno na vzorku základního materiálu (mimo dosah tepelného ovlivnění svarem) pomocí spektrální analýzy. Byly uskutečněny tři měření, průměrné obsahy prvků v hmotnostních % jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Chemické složení oceli

Vzorek	uhlík	mangan	křemík	fosfor	síra	chrom	nikl	měď	hliník	Titan
HCT 450X	0,130	1,933	0,200	0,022	0,002	0,187	0,018	0,017	0,026	0,022

Vlastnosti a chování ocelí je dáno její mikrostrukturou. Pomocí metalografie zjišťujeme u zkoumaného vzorku jeho vnitřní mikrostrukturu. Principem metalografie je zviditelnění vnitřní struktury materiálu pomocí naleptání.

Příprava jednotlivých vzorků se rozděluje do těchto kroků:

- výběr a vyříznutí vhodného vzorku,
- preparace vzorků,
- broušení a leštění,
- naleptání.

### 3.1 Výběr referenčního materiálu pro zkoušky, příprava vzorků

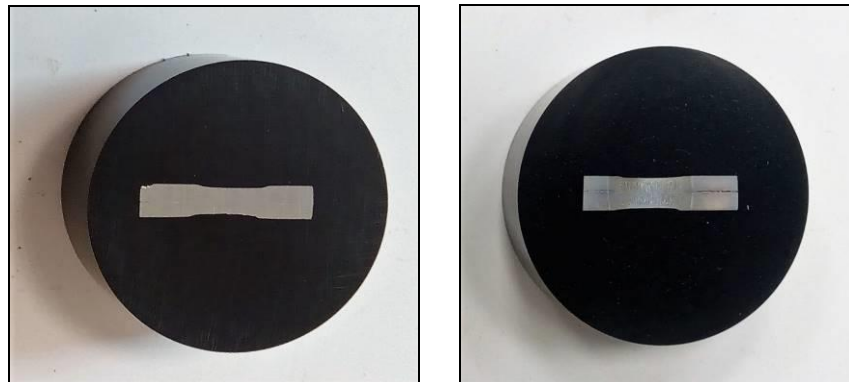
Pro analýzy vlivu svařování na strukturu materiálu byly odebrány 2 vzorky (vzorek č. 1 a č. 2) z předního podélníku, prezentující materiál o stejné tloušťce a s bodovým svarem. Tloušťka materiálu byla 16 mm. Odběr vzorků z podélníku byl proveden úhlovou bruskou s dostatečným odstupem řezné části od vzorků z důvodu zabránění tepelného ovlivnění. Pro další úpravu vzorků byla použita metalografická bruska, která byla vybavena chlazením. Na následujícím obrázku 6 je svarová čochka vzorku č. 1.



Obrázek 6: Snímek svarové čochky

### **Preparace vzorků**

Z důvodu lepší manipulace a zabezpečení požadované pozice metalografického výbrusu, tj. v ose svarové čočky, byly vzorky zalisovány. Použito bylo zařízení SimpliMet 3000, pomocí kterého bylo provedeno zalisování za tepla. Vzorky jsou zdokumentovány na obrázku 7 a obrázku 8.



**Obrázek 7 a Obrázek 8: Zalisovaný vzorek č. 1 a vzorek č. 2**

### **Broušení a leštění**

Po zalisování vzorků do bakelitu bylo nejprve nutné odbrousit přebytečný materiál až ke středu svarové čočky. První broušení bylo provedeno pomocí ručního výbrusu na pásové brusce s brusným papírem o drsnosti 60. Poté následovalo strojní broušení na stroji Grinder Polisher. Přítlačná síla byla nastavena 5N, otáčky 500 ot/min a chlazení vodou. Broušení bylo provedeno nejprve na brusném kotouči o drsnosti brusného papíru 400 a dále 1000.

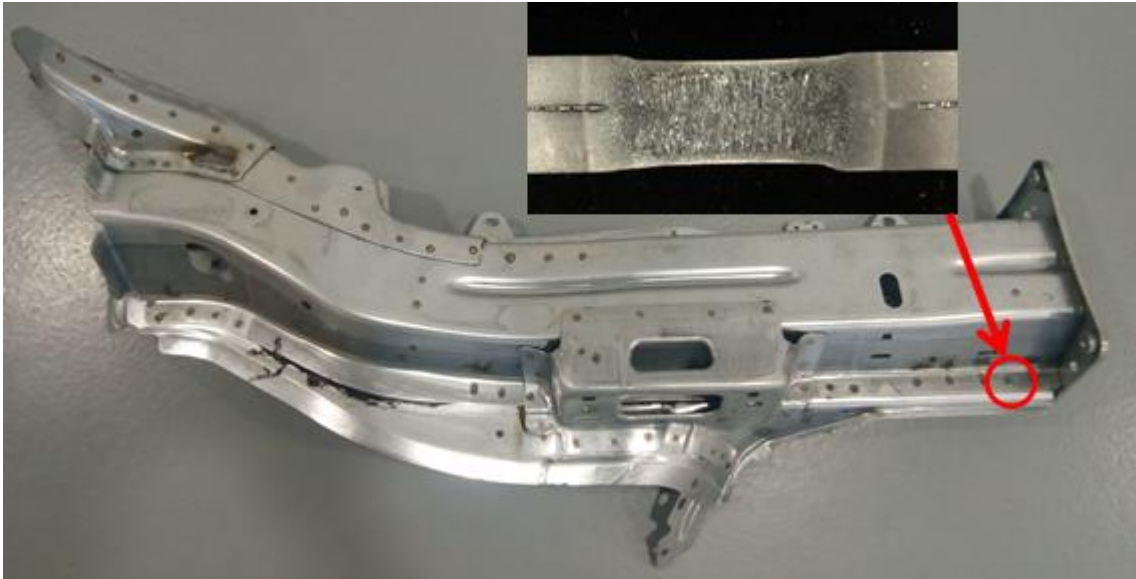
Pro leštění bylo použito stejné zařízení. Přítlačná síla byla 5N, otáčky brusného plátna 350 ot/min a chlazení pomocí technického lihu. Provedeno bylo dvoustupňové leštění - hrubé leštění bylo uskutečněno pomocí diamantové brusné pasty o velikosti zrna 3 mikrometry, jemné leštění pastou 0,7 mikrometru.

### **Naleptání**

Leptání pro zviditelnění mikrostruktury bylo provedeno pomocí Nitalu (4% roztok kyseliny dusičné v etylalkoholu).

### 3.2 Výsledky strukturní analýzy

Metalografický rozbor byl soustředěn na vliv použité technologie svařování a na strukturní změny tím vyvolané. Celkový průřez a místo odběru vzorku je zachyceno na obrázku 9.



Obrázek 9: Makrosnímek svarové čochky s místem odběru

Ve zkušebním vzorku s bodovým svarem byly analyzovány tyto změny:

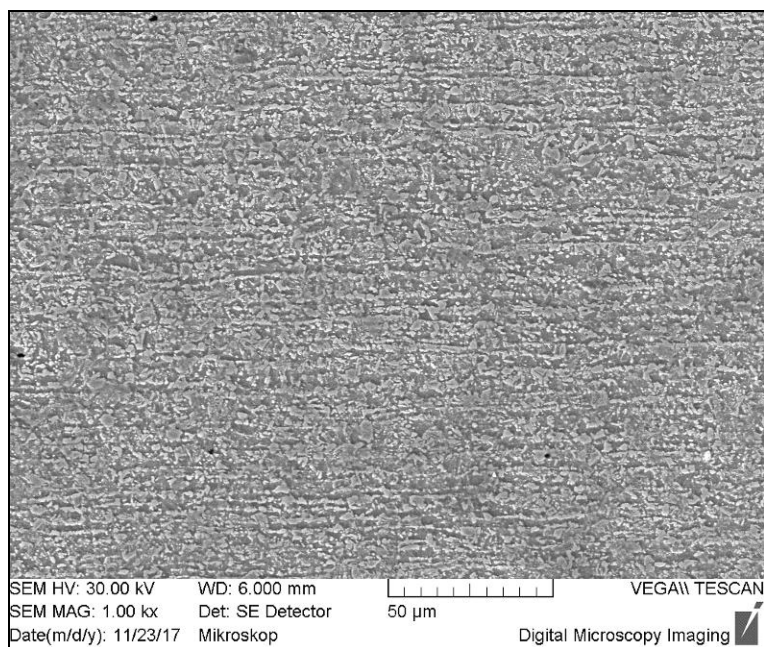
- ve svarové čochce – což znamená v nataveném materiálu, kde se můžou vyskytovat typické metalurgické vady svarového spoje (například mikrotrhliny, řediny),
- v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) – v dosahu strukturních změn vyvolaných teplotním polem svařování.

Uvedená fotodokumentace je zobrazena na následujících obrázcích a byla vyhotovena pomocí elektronové mikroskopie. Zobrazuje neovlivněný základní materiál, tepelně ovlivněnou oblast a svarový kov. Pro zabezpečení vodivosti vzorků pro potřeby elektronové mikroskopie byly vzorky povlakovány zlatem.

### 3.3 Mikrostruktura základního materiálu

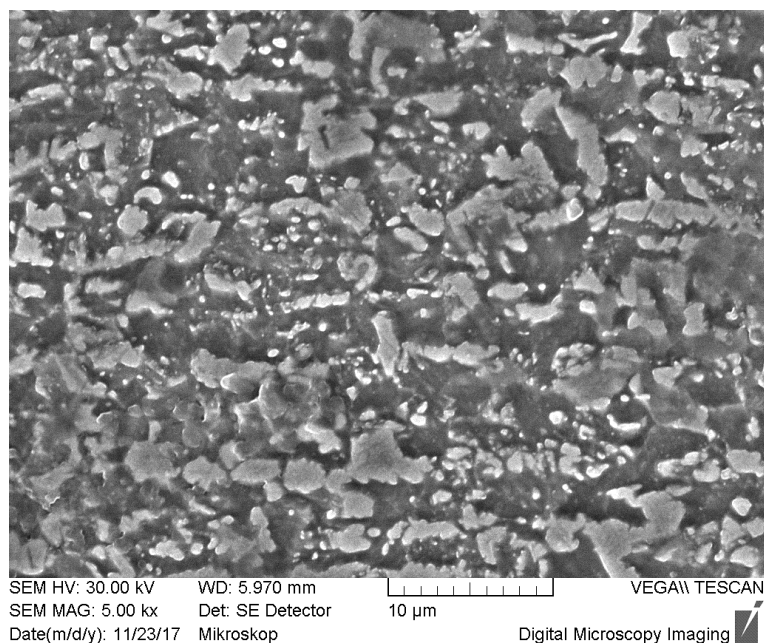
Vnitřní struktura základního materiálu je dvoufázová feriticko-martenzitická (obrázek 10). Tvar a rozměr zrn je nerovnoměrně rozložen v materiálu.

Materiál byl vyroben válcováním, proto je zde zachována řádkovitá struktura s heterogenním obsahem uhlíku.



**Obrázek 10: Mikrostruktura základního neovlivněného materiálu**

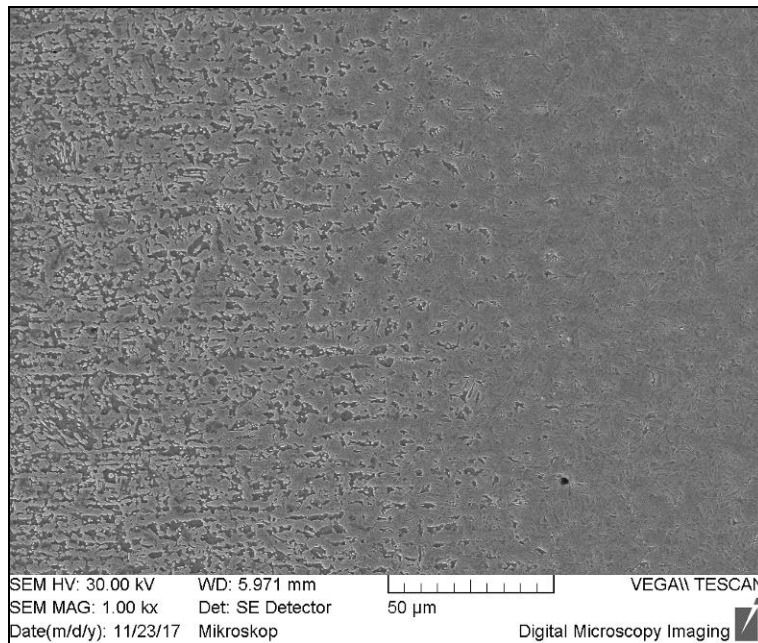
Detailnější znázornění mikrostruktury je na obrázku 11. Struktura byla přiblížena 5000 krát. Útvary martenzitu byly velice nerovnoměrné. Z hlediska houževnatosti materiálu zejména při zvýšených rychlostech zatěžování je podstatné, že jednotlivé martenzitické mikroobjemy byly izolované feritem a nedošlo k jejich propojení.



**Obrázek 11: Detail základního neovlivněného materiálu**

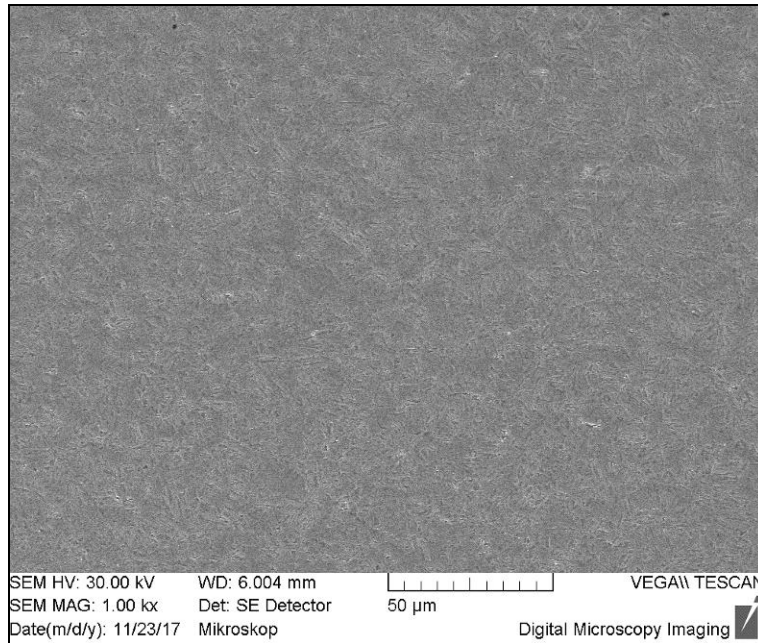
### 3.4 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti materiálu – TOO

V této oblasti došlo ke změně struktury vlivem vneseného tepla z bodového odporového svařování. Struktura se změnila z feriticko-martenzitické na martenzitickou. Tento přechod je znázorněn na obrázku 12, kde je zaznamenán postupný pokles feritické fáze směrem od základního materiálu. Rozhraní, kde dochází k pozorovatelné změně struktury, odpovídá teplotě počátku austenizace, tj. teplotě cca 700°C. Dále zde došlo ke ztrátě řádkovité struktury vlivem homogenizace materiálu.



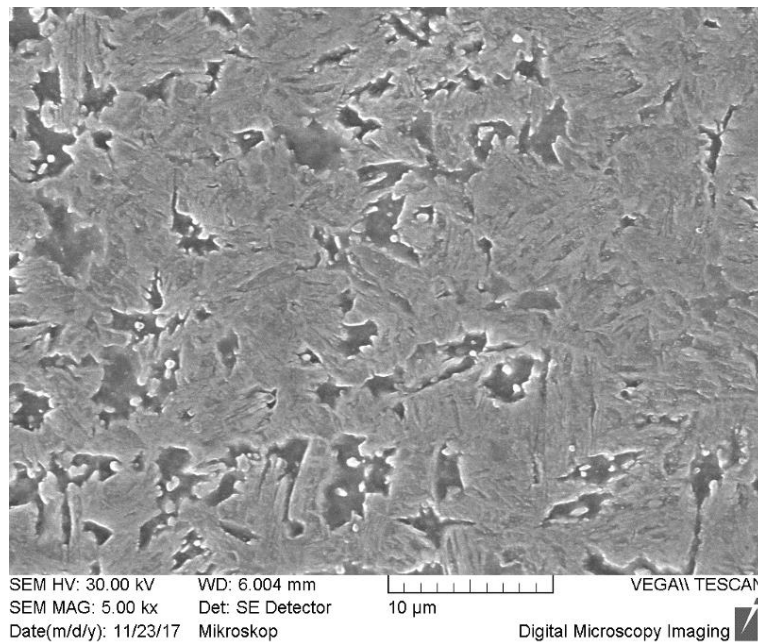
**Obrázek 12: Přechod teplotně ovlivněné oblasti**

Na obrázku 13 je homogenní jemnozrná martenzitická struktura. Pokles feritu a jemnozrnnost struktury způsobují zpevnění této oblasti.

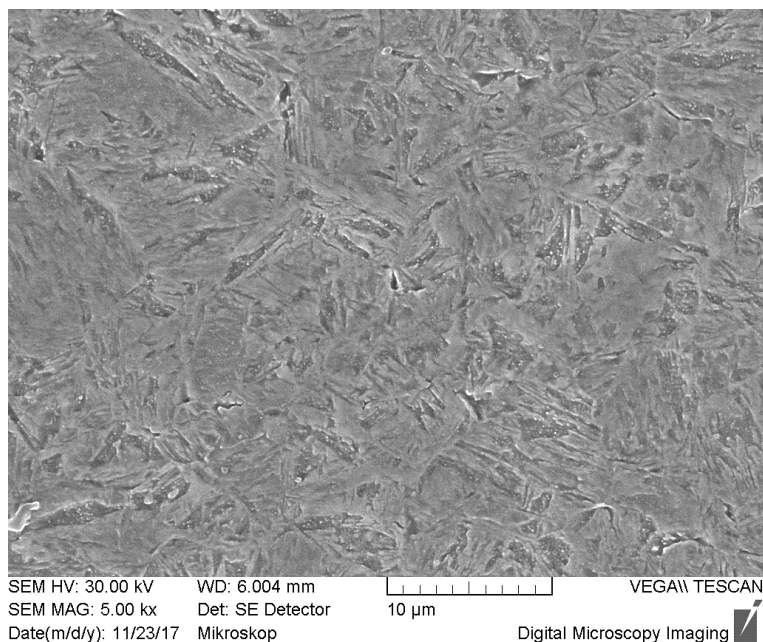


**Obrázek 13: Teplotně ovlivněná oblast**

Detailnější znázornění mikrostruktury je na obrázku 14 a obrázku 15, dokumentována je oblast v dosahu interkritických teplot (pásmo částečné austenitizace – obrázek 14) a plné austenitizace (obrázek 15). Kompletní fázová změna vedla k převážně martenzitické mikrostruktuře oceli s minimálním podílem bainitu a zbytkového austenitu.



**Obrázek 14: Detail teplotně ovlivněná oblasti - pásmo částečné austenitizace**

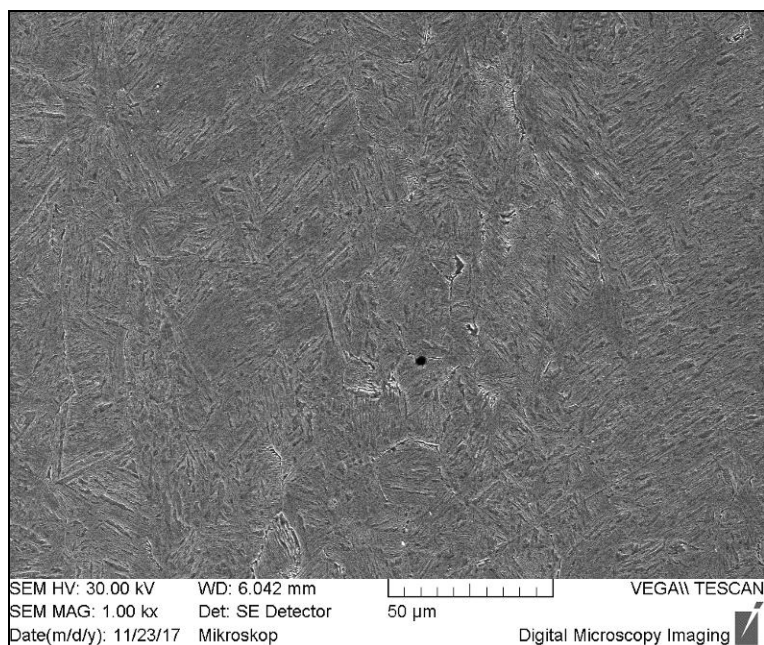


**Obrázek 15: Detail teplotně ovlivněná oblast – pásmo plné austenitizace**

### **3.5 Mikrostruktura svarového kovu**

Struktura svarového kovu je martenzitická se stopami bainitu (obrázek 16). Vlivem bodového svařování, tedy působením tepla a tlaku, došlo k roztavení základního materiálu. Po svařování proběhlo rychlé ochlazení. Toto ochlazení má za následek vyloučení feritu na hranice zrn martenzitu a k potlačení vzniku samostatných feritických útvarů.

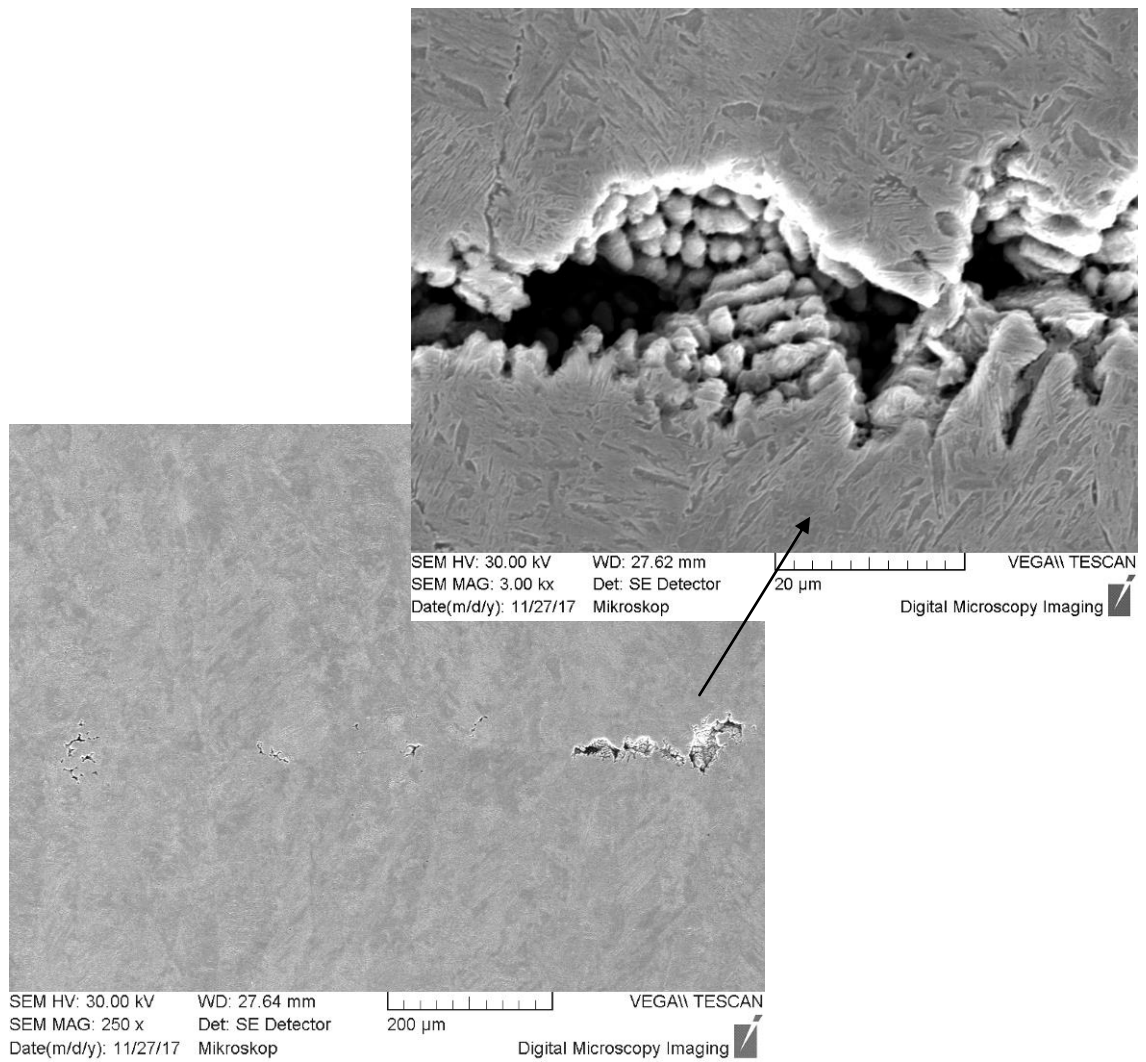
Celková mikrostruktura je hrubozrnná s orientovanými nerovnoosými zrny ve směru odvodu tepla.



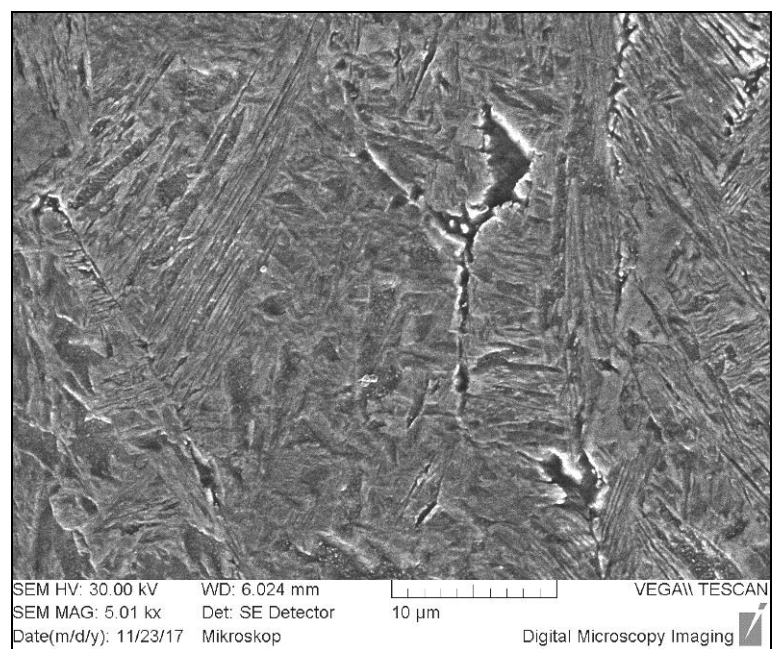
**Obrázek 16: Svarový kov**

### **U vzorku č. 2 se vyskytl ve svarové čočce defekt**

Jedná se o řediny ve svarovém kovu, vady vznikly příliš rychlým chladnutím roztaveného kovu. Iniciační mikrotrhlin v okolí vady nebyly zjištěny, což znamená, že vada nemusí mít zásadní vliv na pevnost spoje (obrázek 17). Důležitým pozitivním faktorem je okolní mikrostruktura. Protože okolní svarový kov je nízkouhlíkový martenzit, je předpoklad relativně vysoké houževnatosti (obrázek 18). Vznik vady lze ovlivnit jednotlivými parametry bodového svařování. Optimální nastavení je však problematické z důvodu svařování různých tloušťek plechových výlisků. Tloušťky jednotlivých plechů se pohybují v rozmezí 1,5 mm až 1,9 mm.



**Obrázek 17: Staženiny ve svarovém kovu vzorku č.2**



**Obrázek 18: Detail svarového kovu vzorku č.2**

## 4 NÁVRH A REALIZACE DYNAMICKÝCH TAHOVÝCH ZKOUŠEK DVOUFÁZOVÉ OCELI

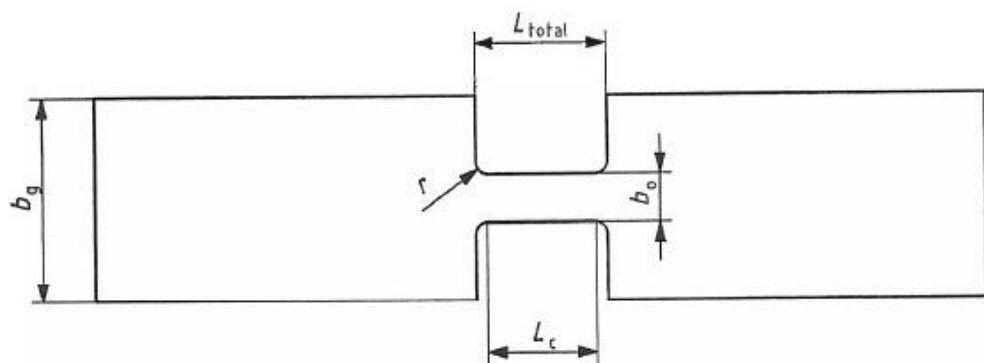
### 4.1 Návrh zkušebních vzorků

Rázové zkoušky mají zcela odlišný charakter zatížení oproti statickým zkouškám. U statických tahových zkoušek se zatěžující síla kvazistaticky zvětšuje (čas zatížení je v řádech sekund) až do dosažení meze pevnosti (do lomu). U rázových zkoušek (dynamických) působí zatěžující síla ve velmi malém časovém intervalu v řádech milisekund.

V provozu vozidla a především při dopravní nehodě je zatížení dynamického charakteru. Nastávají zcela odlišné podmínky z hlediska možného rozvoje plasticity materiálu. Ke zjištění, jak se materiál chová při dynamickém namáhání, slouží zkoušky rázem.

### 4.2 Zkoušení podle normy ČSN EN ISO 26203

Tato mezinárodní norma stanovuje metody zkoušení kovových pásů za účelem stanovení napěťově-deformačních charakteristik materiálu při vysokých rychlostech deformace. Podle této normy byl zhotoven tvar se zakótovanými rozměry vzorku.



#### Legenda

- $b_o$  počáteční šířka oblasti zkoušené délky
- $b_g$  šířka upínací části
- $L_c$  zkoušená délka
- $L_{total}$  celková délka zahrnující zkoušenou délku a přechodové oblasti
- $r$  poloměr přechodové oblasti

Zdroj: [9]

Ve vlastním návrhu experimentu jsou rozměry vzorku následující:

- $b_g$         15 mm
- $b_0$         5 mm
- $L_{total}$     9 mm
- $L_c$         5 mm
- $r$          2 mm

Z důvodu upnutí vzorku do čelistí zkušebního stroje bylo nutné upravit jejich tloušťku. Upínací přípravek umožňuje upnutí vzorků s tloušťkou 1,5mm. Odebrané vzorky měly tloušťky cca od 1,9 mm do 1,7 mm, proto je bylo nutné před samotným měřením upravit broušením na danou limitní tloušťku.

### **4.3 Vlastní měření**

#### **4.3.1 Příprava vzorků**

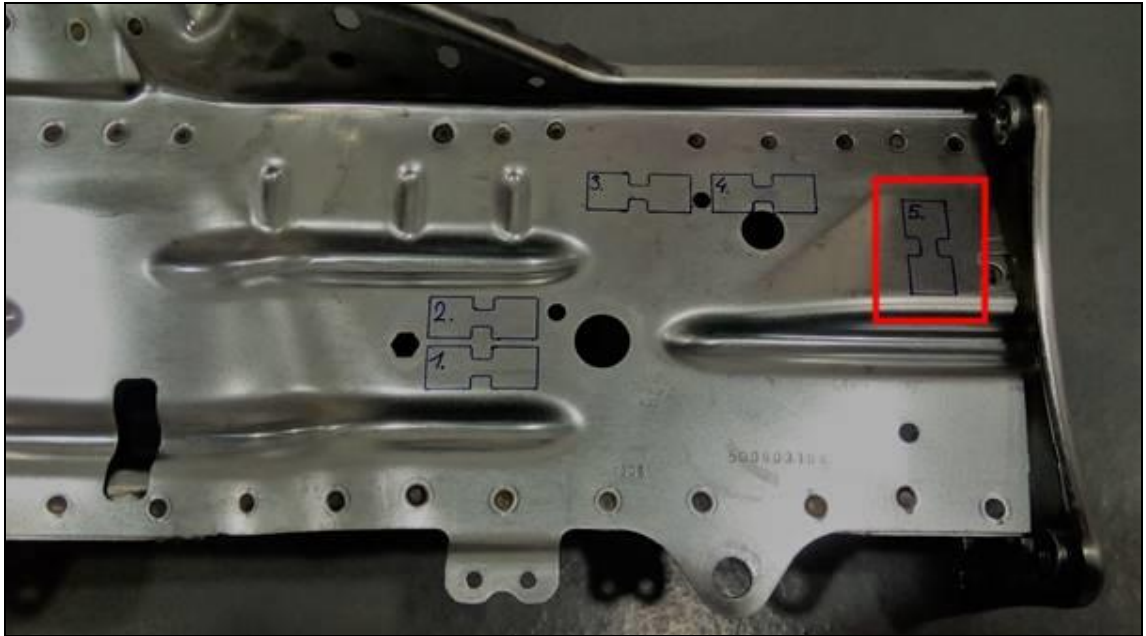
Pro porovnání jednotlivých měření a vyvození závěrů bylo zapotřebí vybrat alespoň 10 vzorků základního neovlivněného materiálu. Vzhledem k tomu, že zkoušený materiál byl již hotový výrobek (výlisek), bylo nutné zvolit vzorky se stejnou tloušťkou materiálu a s rovinným povrchem (bez deformací vzniklých během tváření). V součtu bylo odebráno celkem 15 vzorků. Umístění a očíslování jednotlivých odebraných vzorků jsou znázorněny na obrázku 19, obrázku 20 a obrázku 21. Jednotlivé pohledy jsou určeny podle skutečné pozice na automobilu.



Obrázek 19: Přední podélník – vrchní pohled



Obrázek 20 Přední podélník – pohled z vnitřní části



Obrázek 21: Přední podélník – pohled z vnější části

#### 4.3.2 Měření

Měření bylo provedeno na zkušebním rázovém kladivu Zwick RKP 45. Na tomto stroji je možné provádět zkoušky podle Charpyho, Izoda, Bruggera, rázové zkoušky tahem i zkoušky rázem klínu podle všech běžných norem DIN, EN, ASTM, ISO a BS. [5]

Standardně při dynamické zkoušce lze do upínacího zařízení upnout pouze vzorky kruhového průřezu. V našem případě však bylo nutné upnout vzorky obdélníkového průřezu. Z tohoto důvodu bylo použito upínací zařízení vyvinuté v laboratořích Výukového a výzkumného centra Dopravní fakulty Jana Pernera (obrázek 22). Do tohoto zařízení byl upnut vzorek obdélníkového průřezu pomocí upínek. Celé upínací zařízení bylo namontováno na klasické čelisti pro vzorek kruhového průřezu, což umožnilo využít plnou instrumentaci záznamu zkoušky.



Obrázek 22: Upínací zařízení se vzorkem

Na počátku zkoušky bylo kyvadlo stroje vychýleno na maximální možnou polohu (120 stupňů). Tato poloha zaručovala, že obvodová rychlost kyvadla v dolní úvrati (při nárazu jedné části upínací kleštiny se vzorkem do pevného rámu stroje) byla 5,3 m/s. Tomu odpovídá rychlost deformace vzorku podle následujícího vztahu:

$$v_D = \frac{v_0}{x}$$

[18]

Kde:  $v_D$  deformační rychlost [ $s^{-1}$ ]  
 $v_0$  nejvyšší rychlost kyvadla v dolní úvrati [ $mm \cdot s^{-1}$ ]  
 $x$  činná délka krčku [mm]

$$v_D = \frac{5300}{5} = 1060 \text{ s}^{-1}$$

Rychlost deformace cca  $10^3 \text{ s}^{-1}$  byla použita s ohledem na skutečnou odolnost vozidla u vybraných zkoušek nárazové (crashové) odolnosti karoserie. Získané hodnoty (charakteristiky) lze dále využít například při simulaci dopravní nehody metodou konečných prvků.

## 5 VYHODNOCENÍ DYNAMICKÝCH ZKOUŠEK

Výsledné hodnoty z dynamické zkoušky základního materiálu při rychlosti zatěžování  $1060 \text{ s}^{-1}$  jsou uvedeny v tabulce 2, kde  $F_{\max}$  je maximální síla, při které došlo k přetržení vzorku,  $W$  je práce spotřebovaná na přetržení vzorku a  $\sigma_m$  mez pevnosti podle následujícího vztahu:

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{F_{\max}}{t * b}$$

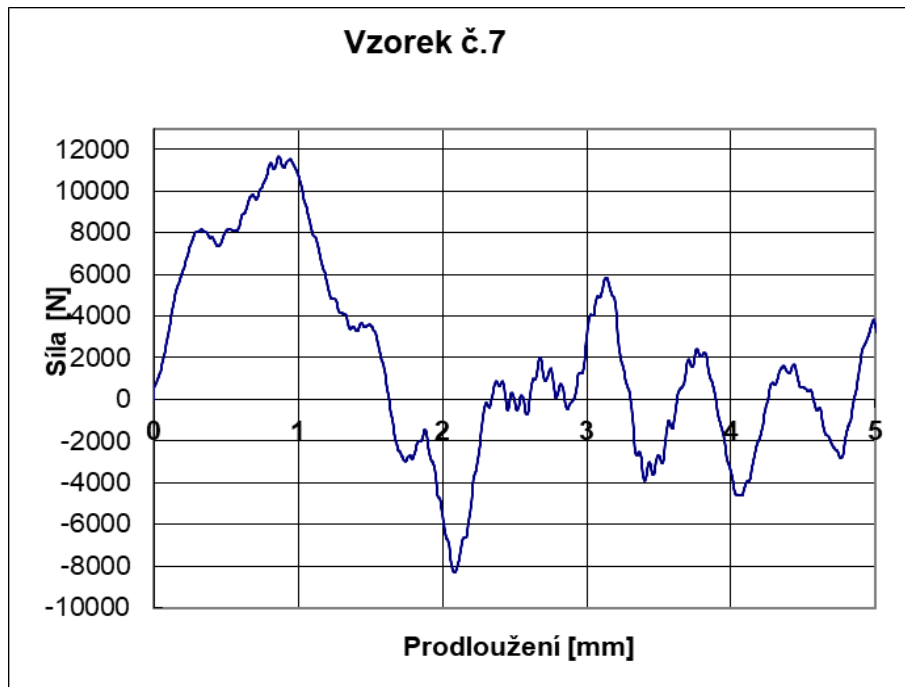
Dále jsou prezentovány nefiltrované záznamy z provedených dynamických tahových zkoušek.

**Tabulka 2: Naměřené hodnoty dynamické zkoušky**

Vzorek č.	$F_{\max}$ [N]	W [J]	$\sigma_m$ [MPa]
6	10166	9,5	1355
7	11670	9,2	1556
10	8865	12,6	1182
11	10807	10,9	1441
13	11692	11,9	1559
14	13181	9,9	1758
15	10472	12,1	1396
16	12104	13,0	1614
17	10682	9,8	1424
<b>Průměrná hodnota</b>	11071	11,0	1476
<b>Směrodatná odchylka</b>	1179,9	1,4	157,5

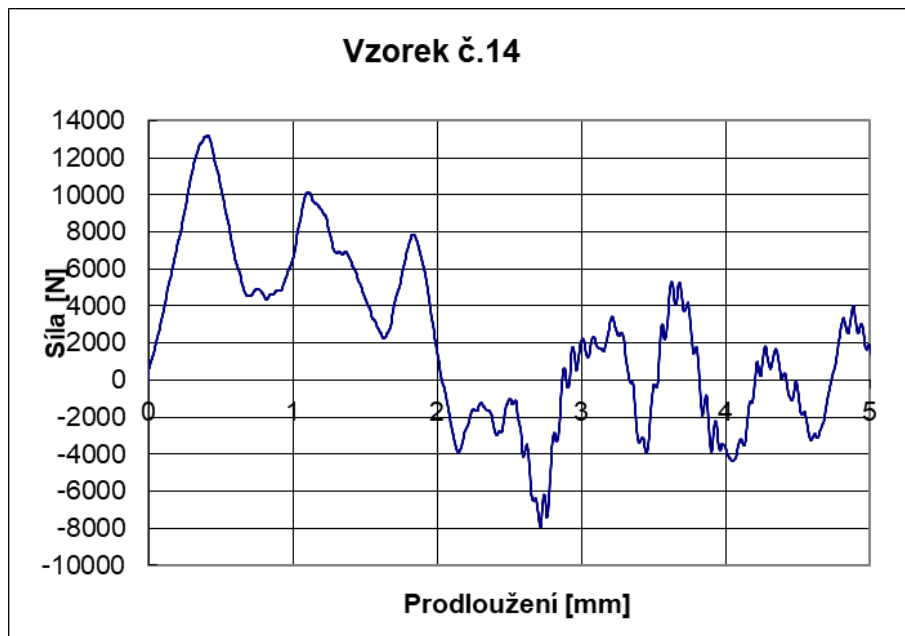
Při vyhodnocení měření bylo zjištěno dvou rozdílných průběhů deformačních charakteristik. První druh charakteristiky byl pozorován u vzorků č. 6, 7, 11 a druhý u vzorků č. 10, 13, 14, 15, 16 a 17. Pro ilustraci a další analyzování byly vybrány referenční záznamy pro oba odlišné průběhy, a to vzorků č. 7 a č. 14. Zbylé záznamy jsou uvedeny v příloze A.

Průběh záznamu vzorku č. 7 je zobrazen na obrázku 23. Ze záznamu je patrný nárůst síly až do hodnoty cca 8 000 N, kde dochází k nárůstu prodloužení, a tím způsobenému mírnému poklesu síly. V další fázi byl patrný opětovný nárůst síly až na hodnotu 11 670 N, kdy dojde k destrukci vzorku. V poslední fázi se snižují síly na nulovou hodnotu a narůstá prodloužení až o cca 1,63 mm.



Obrázek 23: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 7

Záznam vzorku č. 14 je na následujícím obrázku 24. Oproti předchozímu je zde dosaženo maximální síly 13 181 N bez přerušení. Následný pokles síly je patrný až za touto maximální hodnotou ve třech fázích (poklesu a nárůstu síly). Celkové prodloužení, kdy dojde k poklesu síly na nulovou hodnotu je cca 2 mm.



Obrázek 24: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 14

U obou vzorových průběhů jsou patrné tři fáze kmitavého pohybu. U vzorku č. 14 dochází k těmto kmitům až po dosažení mezní hodnoty síly, kdežto u vzorku č. 7 je první výkmit již před dosažením maximální síly. Po destrukci vzorků a poklesu síly na nulovou hodnotu je v obou případech patrné, že frekvence kmitů je u jednotlivých záznamů přibližně stejná. Může se jednat o vliv vlastní frekvence vzorků, respektive celého měřicího systému. Tento vliv nutno ověřit simulací a výpočtem, poté provést ověření další sadou měření.

Vliv na záznamy dynamických zkoušek dále může mít:

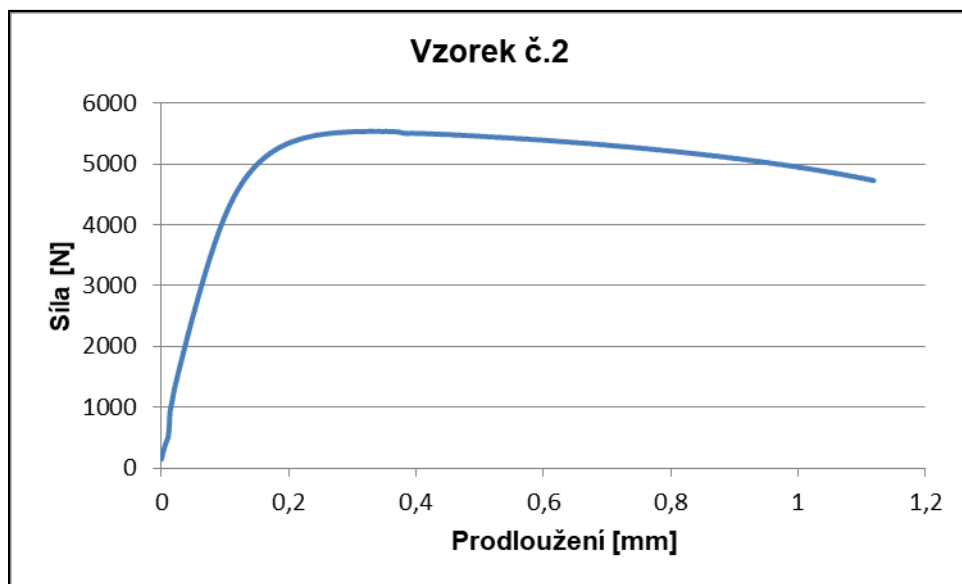
- počáteční deformace zkušebního vzorku (vzorky byly odebrány z hotového výlisku),
- montážní vůle v přípravku,
- vůle v uložení stroje,
- nepřesnost tloušťky jednotlivých vzorků (rozdíly v setinách milimetru),
- drsnost povrchu vzniklá po obroušení vzorků na požadovaný rozměr (1,5 mm).

## 5.1 Vyhodnocení dynamického zpevnění

Dynamické zpevnění bylo vyhodnoceno na základě zjištěných rozdílů meze kluzu a meze pevnosti naměřených statickou a dynamickou zkouškou při dané rychlosti zatěžování. Ze záznamů statické zkoušky byla vyhodnocena smluvní mez ( $R_{p0,2}$ ) a mez kluzu odpovídající přímo přechodu do makroplastických deformací (tj. bez smluvní hodnoty přípustné deformace –  $R_{p\text{statické}}$ ). U dynamické zkoušky byla hodnocena mez kluzu odpovídající přímo přechodu do makroplastických deformací.

### 5.1.1 Statická tahová zkouška

Statická tahová zkouška byla provedena na třech vzorcích. Záznam vzorku č. 2 je zobrazen na obrázku 25 a ostatní záznamy jsou uvedeny v příloze B. Rozměry jednotlivých vzorků a upnutí byly totožné jako v případě dynamické zkoušky. To znamená že, rovněž u statické zkoušky byla použita speciální kleština, určena pro upnutí vzorků do rázového kladiva. Toto měření bylo uskutečněno z důvodu možnosti porovnat výsledky statické a dynamické zkoušky, kdy zejména u vyšší rychlosti zatížení nutno uvažovat vliv reálné tloušťky materiálu na lomové chování.



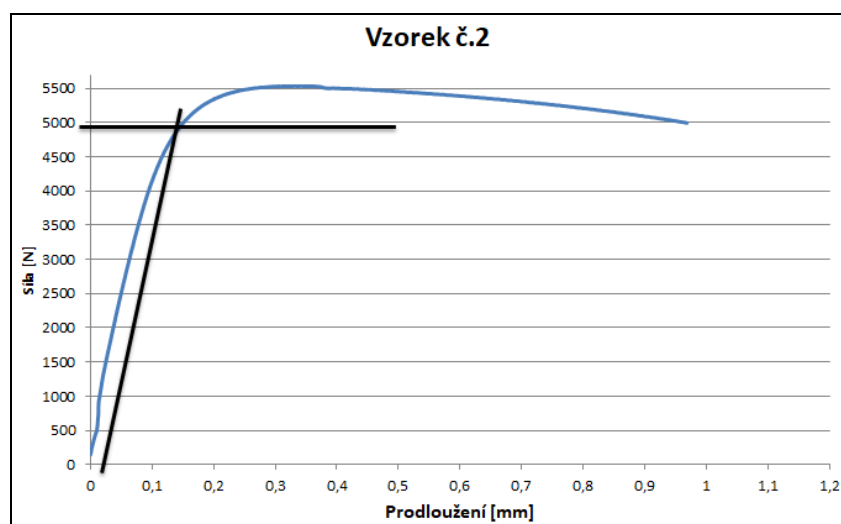
Obrázek 25: Záznam statické zkoušky vzorku č. 2

### 5.1.2 Výpočet statické meze kluzu

#### Výpočet statické smluvní meze kluzu – $R_{p0,2}$ a hodnoty prodloužení ( $\epsilon_{0,2}$ )

Vyhodnocení bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  vyjadřuje napětí v materiálu při deformaci 0,2% z celkové délky  $L_c$  podle vztahu:

$$\epsilon_{0,2} = \frac{L_c}{100} * 0,2 = \frac{6}{100} * 0,2 = 0,012 \text{ mm}$$



Obrázek 26: Postup vyhodnocení  $F_{kluzu 0,2}$  vzorku č. 2

Smluvní napětí bylo vypočítáno jako podíl této síly, odpovídající prodloužení  $\epsilon_{0,2}$  vůči výchozímu průřezu vzorku (měřeno pro každý vzorek samostatně).

$$R_{p0,2} = \frac{F}{S}$$

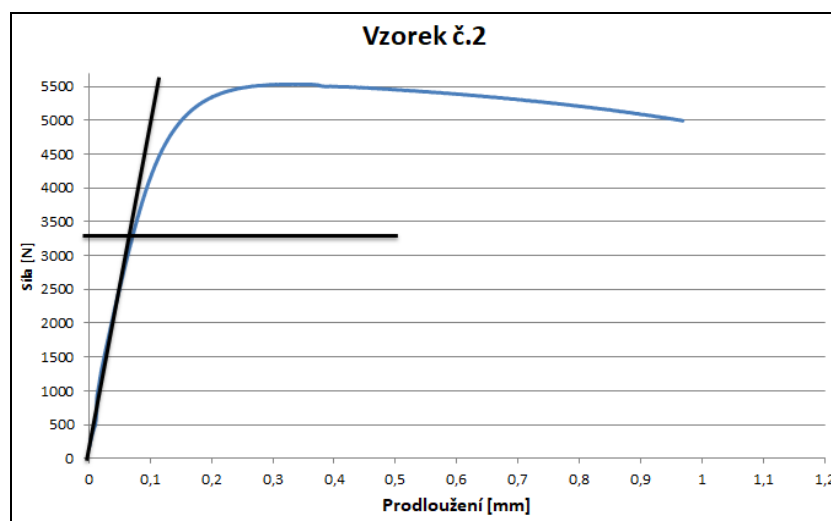
V následující tabulce 3 jsou zaznamenány naměřené hodnoty síly a vypočítané hodnoty smluvní meze kluzu a meze pevnosti.

**Tabulka 3: Hodnoty statické zkoušky**

Vzorek č.	$F_{kluzu 0,2}$ [N]	$R_{p0,2statické}$ [MPa]	$R_{mstatické}$ [MPa]
1	5000	667	814
2	4950	660	738
3	5100	680	753
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>5017</b>	<b>669</b>	<b>769</b>

#### Výpočet statické meze kluzu – $R_{pstatické}$

Druhý způsob určení meze kluzu (bez uvažování přípustné smluvní deformace) byl proveden pro možnost přímého srovnání s hodnotami po dynamickém zatěžování (obrázek 27). Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce 4.



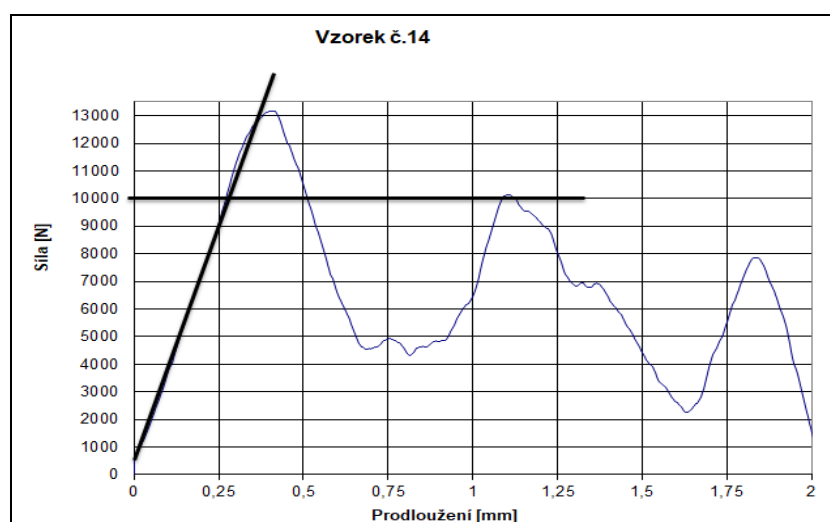
**Obrázek 27: Postup vyhodnocení  $F_{kluzu statické}$  vzorku č. 2**

**Tabulka 4: Vypočítané hodnoty ze statické zkoušky**

Vzorek č.	$F_{\text{kluzu statické}} \text{ [N]}$	$R_{p\text{statické}} \text{ [MPa]}$
1	3900	520
2	3300	440
3	3900	520
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>3700</b>	<b>493</b>

### 5.1.3 Výpočet dynamické meze kluzu

K získání síly na mezi kluzu byl použit stejný přístup, jako při určení statické meze kluzu –  $R_{p\text{statické}}$ . (obrázek 28). Tento princip vyhodnocení meze kluzu byl stanoven z důvodu porovnání statických a dynamických hodnot.



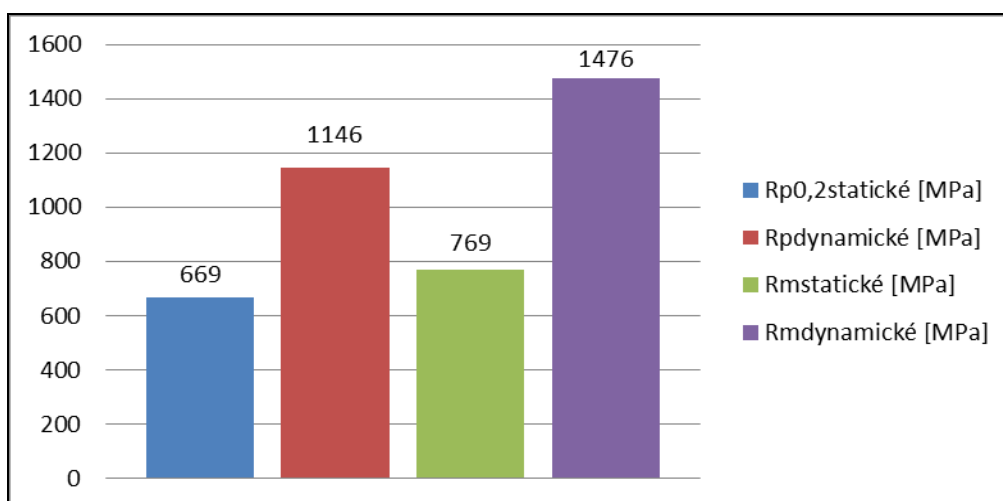
**Obrázek 28: Postup vyhodnocení  $F_{\text{kluzu dynamické}}$  vzorku č. 14**

Odečtené údaje z jednotlivých měření jsou uvedeny v tabulce 5. U vzorků č. 6, 7, 11 nebylo provedeno hodnocení z důvodu předpokládaného vlivu vlastních frekvencí na průběh zkoušky.

**Tabulka 5: Hodnoty dynamické zkoušky**

Vzorek č.	$F_{kluzu}$ dynamické [N]	$R_{p,dynamické}$ [MPa]	$R_{m,dynamické}$ [MPa]
6	-	-	1355
7	-	-	1556
11	-	-	1182
10	7100	947	1441
13	9000	1200	1559
14	9750	1300	1758
15	8700	1160	1396
16	10000	1333	1614
17	7000	933	1424
<b>Průměrná hodnota</b>	8592	1146	1476
<b>Směrodatná odchylka</b>	1173,5	156,4	157,5

Na obrázku 29 je uvedeno porovnání průměrných hodnot meze kluzu a meze pevnosti při statické a dynamické zkoušce.



**Obrázek 29: Porovnání statické a dynamické meze kluzu a pevnosti**

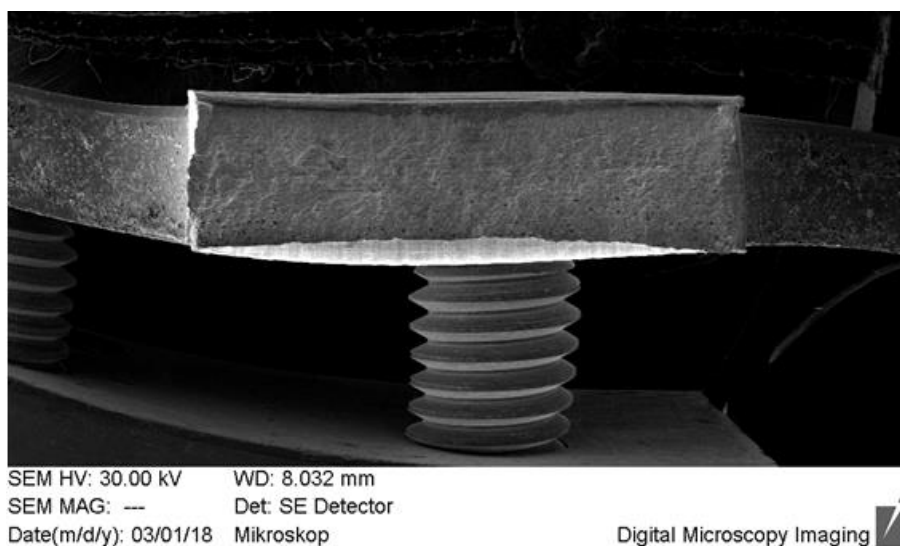
## 6 FRAKTOGRAFICKÁ ANALÝZA MECHANIZMU LOMU

Lomový proces dělíme na dvě fáze, a to iniciace trhliny a šíření trhliny. Fraktografická analýza slouží k určení typu lomu. U provedených typů zkoušek a zejména s ohledem na aplikaci testovaného materiálu je významné rozlišení lomu štěpného (k lomu stačí pouze malé množství energie) a tvárného (je třeba velké množství energie).

Dále lze touto analýzou určit příčinu vzniku lomu, popř. zdroje lokálních rozdílů v charakteru lomu, například nečistota v materiálu, různé druhy vrubů a další vlivy. Analýza byla provedena pomocí elektronového mikroskopu značky TESCAN.

### 6.1 Analýza dynamického lomu

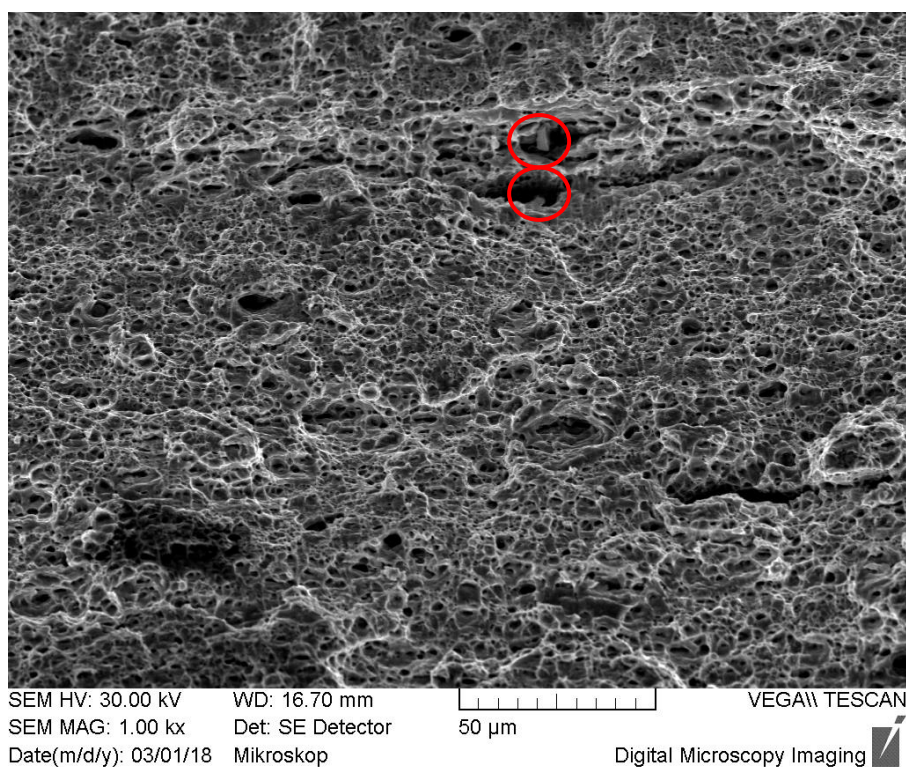
Jako referenční vzorek pro fraktografický rozbor byla zvolena lomová plocha vzorku č. 7 dokumentována na následujícím obrázku 30. Lom je symetrický a probíhal v rovině maximálních smykových napětí (pod  $45^\circ$ ). To prokazuje homogenitu materiálu a současně lze vyloučit působení řady možných negativních vlivů, jako je nepřesné upnutí vzorků apod. (kapitola 5).



Obrázek 30: Lomová plocha vzorku č. 7

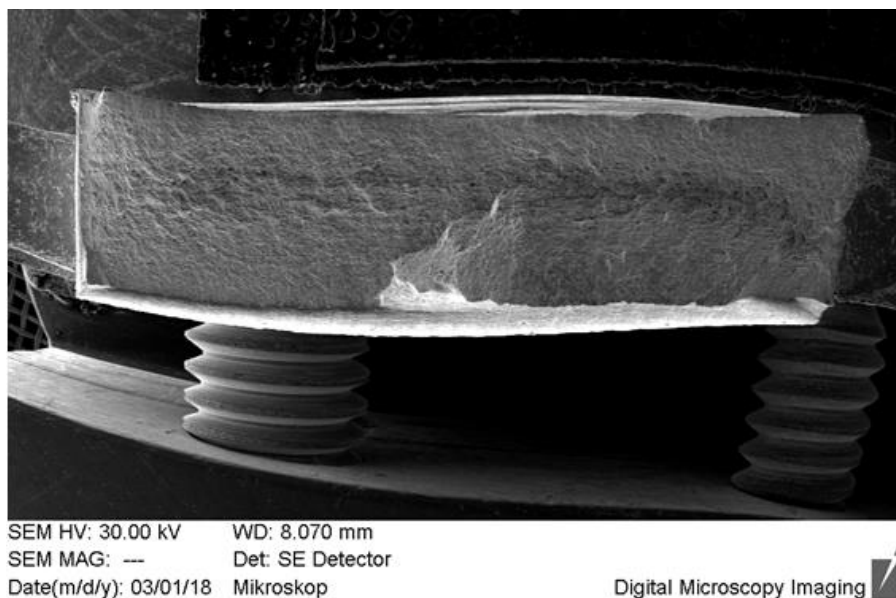
Detail lomové plochy tohoto vzorku je na obrázku 31, z morfologie lomové plochy lze vyčíst následující informace:

- důlky na lomové ploše jsou symetrické a nejeví známky deformace (ovality), které by mohly vzniknout vlivem asymetrie zatížení při dynamické zkoušce,
- více tvárných důlků (jemnější lom) než ve vzorku č. 14,
- lokálně byly zjištěny iniciace příčných mikrotrhlin, zde jsou patrné vměstky typu TiN (ověřeno chemickou mikroanalýzou) označeno v obrázku 31.



**Obrázek 31: Struktura lomové plochy vzorku č. 7**

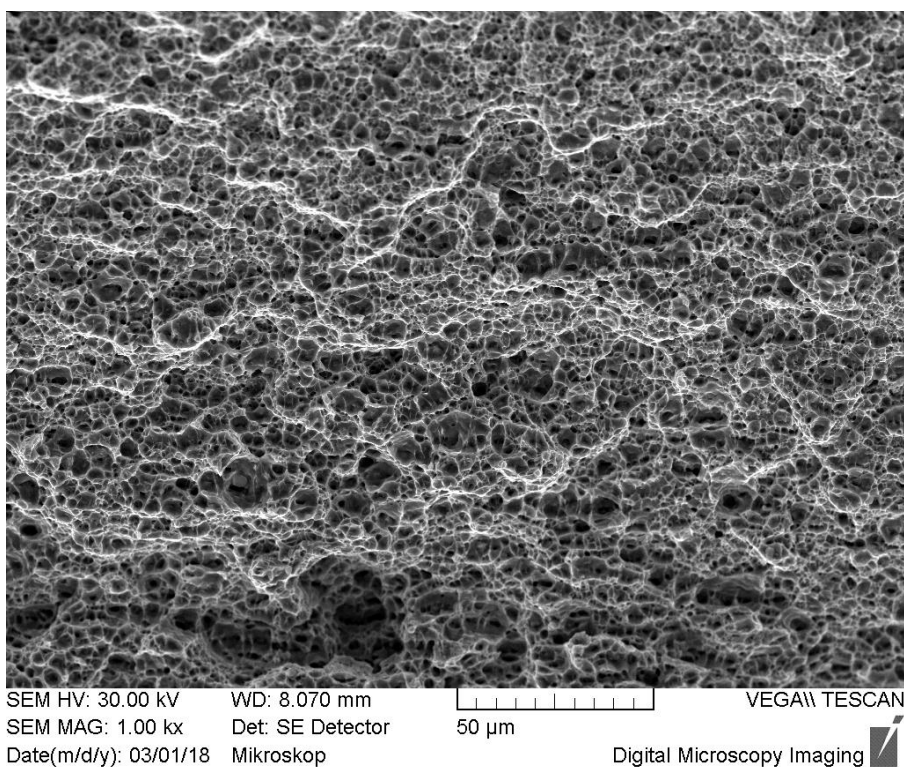
Makrosnímek lomu vzorku č. 14 je znázorněn na obrázku 32. V tomto případě lom není zcela symetrický. Ve střední části došlo k dvojitmu zlomu. Lomová plocha je však opět ve směru hlavního smykového napětí (pod  $45^\circ$ ), a to i v případě střední části vzorku.



**Obrázek 32: Lomová plocha vzorku č. 14**

Detail lomové plochy vzorku je na obrázku 33 a z hodnocení vyplývá:

- morfologie lomové plochy (tvar důlků tvárného lomu) opět nejeví známky deformace (ovality),
- nejsou patrné krystaly TiN v nečistotách jako u předchozího vzorku, tendence sekundárního větvení lomu byla ale vyšší (předpoklad vlivu nečistot) než u předchozího vzorku.



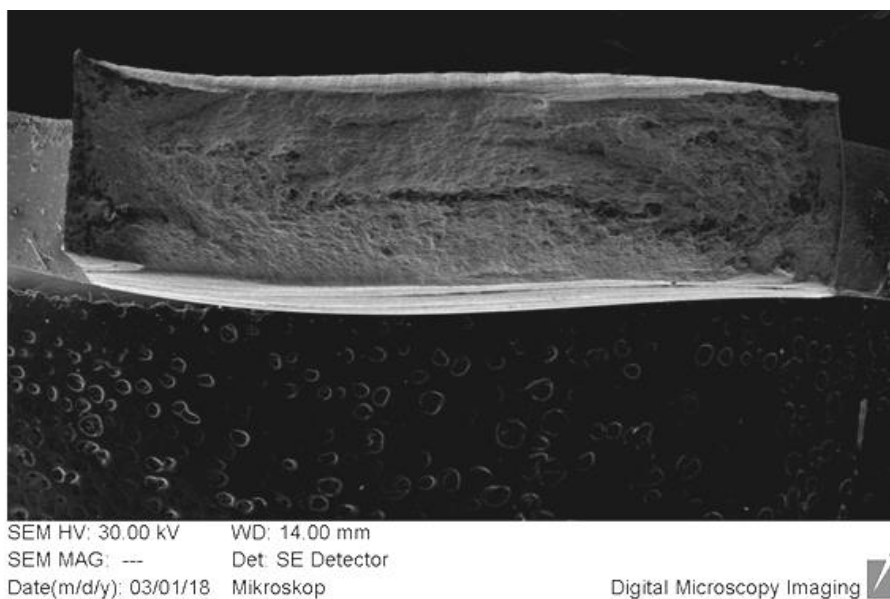
**Obrázek 33: Mikrostruktura lomové plochy vzorku č. 14**

Vyhodnocení dynamických lomových ploch:

- v obou případech se jedná o tvárný lom,
- materiál si při dané rychlosti deformace zachovává stejný mechanismus lomu jako při statické zkoušce,
- u vzorku č. 7 více nečistot než u vzorku č. 14, zjištěn výskyt nečistot typu TiN s tendencí vlivu na sekundární větvení lomu.

## 6.2 Analýza statického lomu

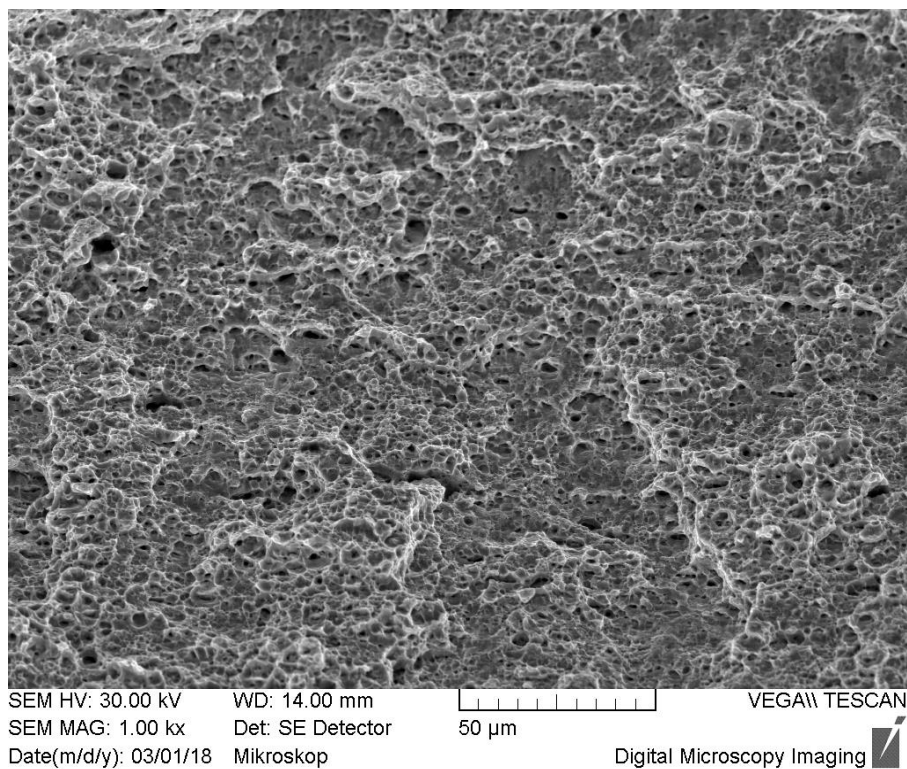
Celkový lom vzorku č. 12, je znázorněn na následujícím obrázku 34. Lomová plocha je více členitá, než bylo patrné u vzorků z dynamické zkoušky.



Obrázek 34: Lomová plocha vzorku č. 12

Detail morfologie statického lomu vzorku č. 12 je na obrázku 35 s následujícími charakteristikami:

- tvárné důlky v mikrostruktuře jsou symetrické a nejeví známky deformace (ovality) jako v případě dynamických lomů,
- nejsou patrné vměšky typu TiN jako u vzorku č. 7,
- není patrný velký rozdíl vůči dynamickým lomům.



**Obrázek 35: Mikrostruktura lomové plochy vzorku č. 12**

Vyhodnocení statických lomových ploch:

- opět došlo ke vzniku tvárného lomu jako po dynamických zkouškách,
- velmi jemná struktura lomu,
- žádná nehomogenita (není zjevná dvoufázová struktura) ani zbytky řádkovosti po válcování,
- jemné a hluboké důlky – ideální pro pohlcení energie.

## **7 POSOUZENÍ VLIVU RYCHLOSTI DEFORMACE NA ZPEVNĚNÍ OCELI**

Součástí provedených experimentálních analýz bylo vyhodnocení dosahu „zbytkového“ zpevnění materiálu ve srovnání použitých rychlostí zatěžování pomocí instrumentované vnikající zkoušky. Instrumentovaná vnikající zkouška (IIT - Instrumented Indentation Testing) je řízena normou ČSN EN ISO 14577. Měření bylo provedeno pomocí indentačního válce o průměru 0,5 mm. Rozdíl oproti běžným metodám tvrdosti je ve vyhodnocení a rychlosti odlehčování indentoru. Výhodou je že, se nemusí měřit rozměry vtisku, lze zjišťovat materiálové parametry i v relativně malých objemech.

Po celý průběh zkoušky se snímá poloha indentoru a síla, která na něj působí. Tyto měřené veličiny umožňují sledování, jak plastické, tak i elastické odezvy v materiálu při zatěžování. [13]

### **7.1 Vliv rychlosti deformace materiálu**

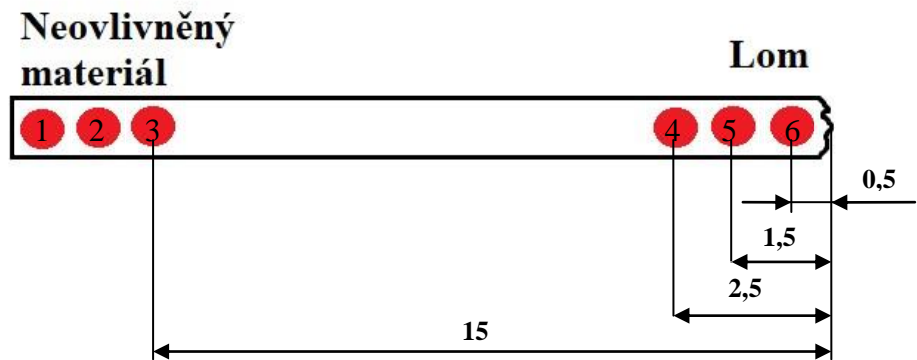
Obecně lze konstatovat, že se zvyšováním rychlosti deformace se zvyšuje odpor materiálu (dochází ke zpevnění). Zvýšení odporu materiálu je dáno tvárnou deformací vnitřní atomové mřížky oceli. Tento jev má za následek vznik vnitřního pnutí, a tím celkové zpevnění oceli. Čím je vyšší rychlost tvárné deformace za dané teploty, tím větší je účinek zpevnění a menší účinek zotavení. Zotavení má za následek uvolnění vnitřního pnutí, se zvyšováním teploty se zvětšuje i účinek zotavení.

Zároveň také dochází ke zvyšování meze kluzu a meze pevnosti materiálů. Tento růst mechanických vlastností je typický pro houževnatou ocel. Se stále se zvyšující rychlostí deformace se přibližuje mez kluzu k mezi pevnosti, až v určitém bodě jsou si tyto meze (hodnoty) rovny. To znamená, že i materiál, který za normálních okolností vytváří tvárný (houževnatý) lom vytvoří křehký lom a nedojde k trvalé deformaci.

### **7.2 Indentační měření po dynamické zkoušce**

Pro indentační měření byl vybrán válcový indentor o průměru 0,5mm. Měření bylo provedeno na třech místech neovlivněného materiálu a třikrát od místa lomu k neovlivněnému materiálu. Zakótovaná a očíslovaná místa měření jsou na obrázku 36. Na začátku byla odezva

materiálu pouze elastická, dále pak přecházela do elasticko – plastické deformace. Nakonec při odlehčování dochází pouze ke zpětné elastické deformaci materiálu.

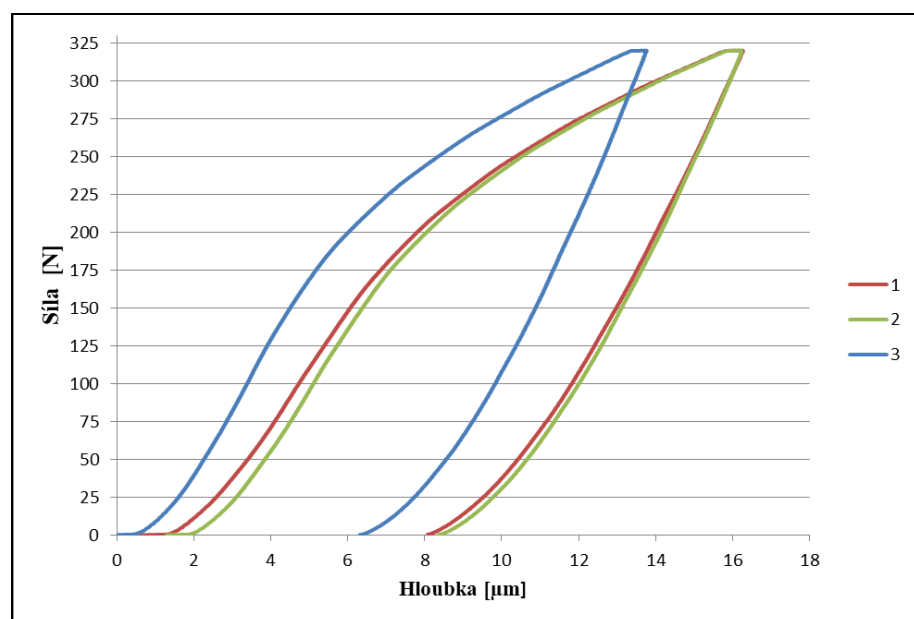


Obrázek 36: Nákres měřených míst

### Neovlivněná část

Tato část se nacházela v místech upnutí do držáku přípravku pro zkoušení, proto ji považují jako neovlivněnou dynamickým testováním. Jednotlivé charakteristiky jsou vykresleny na obrázku 37 a zobrazují závislosti síly na hloubce vniknutí indentoru. Posunutí vzorku č. 3 v ose x je dáno pouze rozdílnou výškou měřící hlavičky od měřeného vzorku.

V následující tabulce 6 jsou uvedeny hodnoty síly, při kterých dochází ke změně deformace elastické v plastickou ( $F_{DZ}$ ). Síly byly zjištěny tímto způsobem: lineární částí byla proložena přímka a v místech odchýlení od naměřené křivky došlo k odečtení síly.



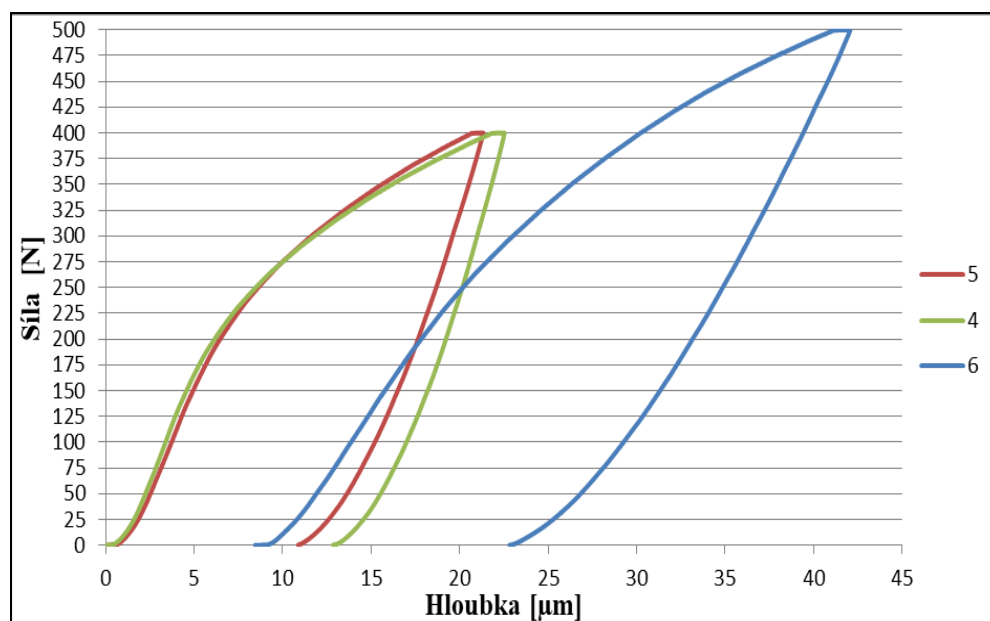
Obrázek 37: Průběhy indentační zkoušky neovlivněného materiálu

Tabulka 6: Mezní síla v základním materiálu - dynamika

Číslo měření	$F_{DZ}$ [N]
1	170
2	175
3	175
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>173</b>

### Ovlivněná část

Na obrázku 38 jsou znázorněny průběhy ovlivněného materiálu dynamickým zatížením. Modře je uveden průběh měření č. 6, který byl změřen bezprostředně u místa přetržení vzorku a posunutí v ose x, je dáno rozdílnou výškou měřicí hlavice od měřeného vzorku. Při následném měření 4 a 5 bylo postupováno směrem k neovlivněnému materiálu.



Obrázek 38: Průběhy indentační zkoušky ovlivněného materiálu

V tabulce 7 jsou uvedeny podle předchozího postupu opět maximální síly mezi elastickou a plastickou částí záznamu. Změna tvrdosti byla vypočítaná jako rozdíl tvrdosti ovlivněného materiálu vůči základnímu v procentech. Toto vyhodnocení bylo zvoleno z důvodu přesnějšího výsledku nezatíženého chybou přepočtu na napětí.

**Tabulka 7: Mezní síla v ovlivněném materiálu - dynamika**

Číslo měření	$F_{DO}$ [N]	Změna $F_{DO}$ [%]
4	170	-1,73
5	180	4,05
6	230	32,95

Z měření vyplývá, že při dynamické tahové zkoušce dochází pouze v blízkosti lomu vzorku k zvětšení síly o cca 33 % oproti základnímu materiálu. Při dalším měření směrem k neovlivněné části už materiál jen mírně zvyšuje odpor proti plastické deformaci. Dále z měření vyplývá, že použitá metoda je vhodná pro vyhodnocení intenzity i dosahu zpevnění. Nutno však provést měření na dalších vzorcích pro popsání detailnější charakteristiky zpevnění.

### **7.3 Indentační měření po statické zkoušce**

K měření byl použit stejný indentační nástroj a totožná přitlačná síla z důvodu porovnatelnosti výsledků. Měření bylo provedeno na třech místech neovlivněného materiálu a třikrát od místa lomu k neovlivněnému materiálu

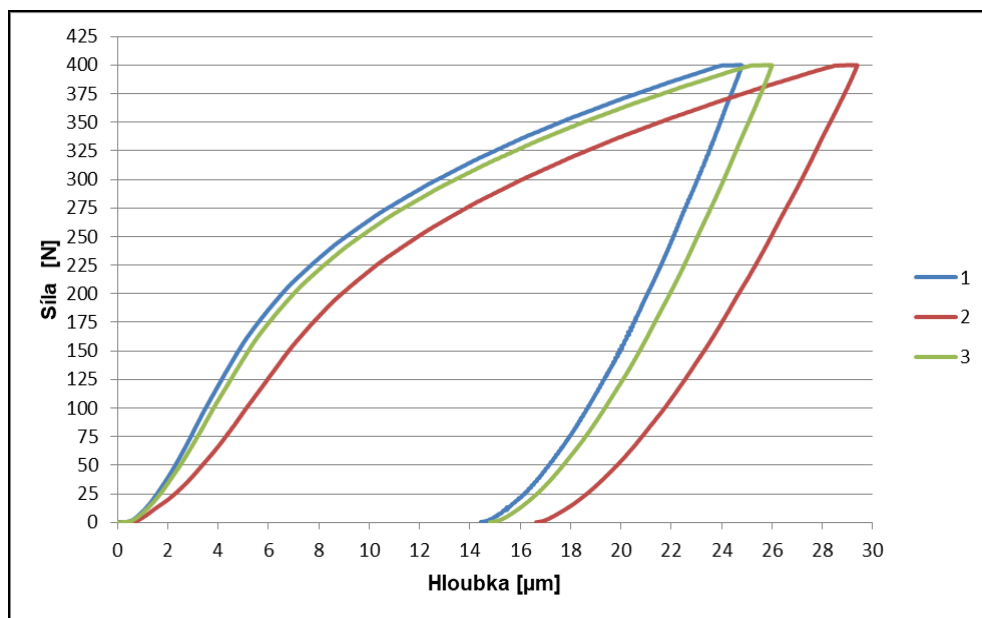
Stejně jako v případě záznamů z předcházejícího měření (vzorku po dynamické zkoušce) je na začátku odezva materiálu pouze elastická, dále pak přechází do elasticko – plastické deformace. Nakonec při odlehčování dochází pouze elastické odezvě materiálu, tj. měřitelná je čistě elastická deformace.

#### **Neovlivněná část**

Měření vzorku po statické zkoušce bylo provedeno jako v předcházejícím případě. Záznamy z měření jsou znázorněny na obrázku 39 a v následující tabulce 8 jsou zjištěné hodnoty síly. Z měření vyplývá, že síla na přechodu do plastické deformace je stejná jako u dynamické zkoušky v neovlivněné části vzorku. Tímto bylo rovněž ověřeno, že v průběhu měření nedošlo k deformaci vzorku mimo oblast měřené délky.

Tabulka 8: Mezní síla v základním materiálu - statika

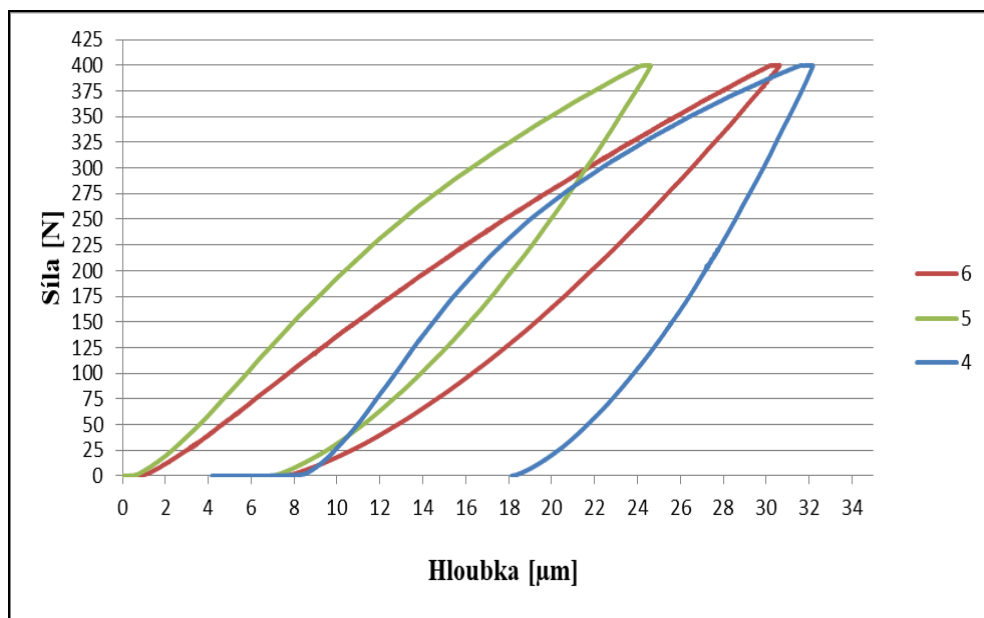
Číslo měření	$F_{SZ}$ [N]
1	170
2	170
3	185
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>175</b>



Obrázek 39: Průběhy indentační zkoušky neovlivněného materiálu

### Ovlivněná část

Na obrázku 40 jsou znázorněny průběhy ovlivněného materiálu po statickém zatížení. Průběh měření 6 byl změřen u místa přetržení vzorku. Následující měření 4 a 5 bylo postupováno směrem k neovlivněnému materiálu.



**Obrázek 40: Průběhy indentační zkoušky ovlivněného materiálu**

**Tabulka 9: Mezní síla v ovlivněném materiálu - statika**

Číslo měření	$F_{so}$ [N]	Změna $F_{so}$ [%]
4	180	2,86
5	210	20
6	250	42,86

Z výsledků vyplývá, že při statické tahové zkoušce dochází k pozvolnému zvyšování síly v materiálu. V blízkosti defektu vzorku se zvyšuje síla na přechodu do plastické deformace o cca 42,86 % oproti základnímu materiálu. V následujícím místě o 20 % a postupně se zmenšuje až na stejnou hodnotu jako v neovlivněné části. Je zřejmé, že takto provedeným měřením je možno vyhodnotit dosah a intenzitu zvýšení odporu proti další plastické deformaci. Pro konkrétní vyhodnocení je nutno provést další měření včetně statistického vyhodnocení.

## 8 ZÁVĚR

Pro analýzu odezvy dvoufázové feriticko-martenzitické oceli na jednoosé zatížení s různou rychlostí deformace bylo provedeno několik typů zkoušek.

Dynamické tahové zkoušky byly provedeny při rychlosti deformace  $10^3 \text{ s}^{-1}$ . Statické zkoušky byly provedeny při identických podmínkách z hlediska tvaru a upnutí vzorků, což umožnilo přímé srovnání meze kluzu i pevnosti. Průměrná mez pevnosti při dynamické zkoušce byla  $R_{m\text{Dynamické}} = 1\,476 \text{ MPa}$  a energie na přeražení vzorku  $W = 11 \text{ J}$ .

Z měření klasických tahových zkoušek (při kvazistatickém nárůstu zatížení) byla získána průměrná mez kluzu  $R_{p\text{Statické}} = 496 \text{ MPa}$  a statická mez pevnosti  $R_{m\text{Statické}} = 769 \text{ MPa}$ . Dále pomocí této metody byla stanovena dynamická mez kluzu  $R_{p\text{Dynamické}} = 1\,146 \text{ MPa}$ .

Ze získaných hodnot tedy vyplývá, že při dynamické zkoušce se mez pevnosti zvýšila cca 1,9 krát a mez kluzu se zvýšila cca 2,3 krát ve srovnání se statickou zkouškou.

Podobných výsledku jako u testované oceli DP 450 dosáhli i autoři Haidong Yu, Yongjin Guo a Xinmin Lai, kteří testovali DP 600 ocel. Autoři provedli statické a dynamické tahové zkoušky při rychlosti deformace od  $10^{-4}$  do  $10^3 \text{ s}^{-1}$ . Výsledky ukázaly závislost mechanického chování na rychlost deformace pro tuto ocel. Hodnoty napětí při vysokých deformačních rychlostech byly téměř dvojnásobné než u nízkých deformačních rychlostí. Z naměřených hodnot obou zmiňovaných ocelí došlo k pozorovatelnému zvýšení meze kluzu i meze pevnosti. Při dynamickém zatížení se zvýšila hustota dislokací, které ovlivňují zvýšení mez kluzu oceli. Důvodem bylo, že při vyšší rychlosti deformace se snížil potřebný čas na překonání těchto překážek.

Fraktografická analýza ukázala, že jak v případě statického, tak i dynamického zatížení došlo k porušení materiálu výlučně tvárným lomem. Průběh morfologie lomů prokázal symetrické jednoosé zatížení. V obou případech lomu nebyla zjištěna žádná nehomogenita (dvoufázová struktura či zbytky řádkovitosti). U vzorku po dynamické zkoušce byla zjištěna vyšší citlivost na vyskytující se nečistoty, především typu TiN.

Dosah zpevnění byl vyhodnocen indentační instrumentovanou zkouškou. Cílem bylo ověřit možnost použití této metody a navrhnout vhodné parametry měření. Měření tvrdosti indentačním testem proběhlo u dvou vzorků, jak po dynamické, tak i po statické zkoušce pomocí válcového indentoru. Zvolen byl postup založený na měření limitní síly na přechodu z elastické do plastické odezvy materiálu. U ovlivněné oblasti vzorku po statické zkoušce dochází k pozvolnému zvyšování síly v blízkosti defektu vzorku o cca 43 % oproti základnímu materiálu, v následujícím místě o 20 % a postupně se zmenšuje až na stejnou

hodnotu jako v neovlivněné části. V ovlivněné oblasti vzorku po dynamické zkoušce dochází ke zvyšování síly pouze v blízkosti defektu vzorku o cca 33 %. Při dalším měření směrem k neovlivněné části se v materiálu jen mírně zvyšuje síla. Navržená metoda tedy umožňuje posoudit dosah zpevnění v závislosti na rychlosti deformace.

Součástí práce byly analýzy strukturního vlivu bodového odporového svařování. Výsledky práce souhrnně dokumentují chování analyzované dvoufázové oceli na zvýšenou rychlost deformace, odpovídající nárazovým (crashovým) zkouškám.

## 9 POUŽITÁ LITERATURA

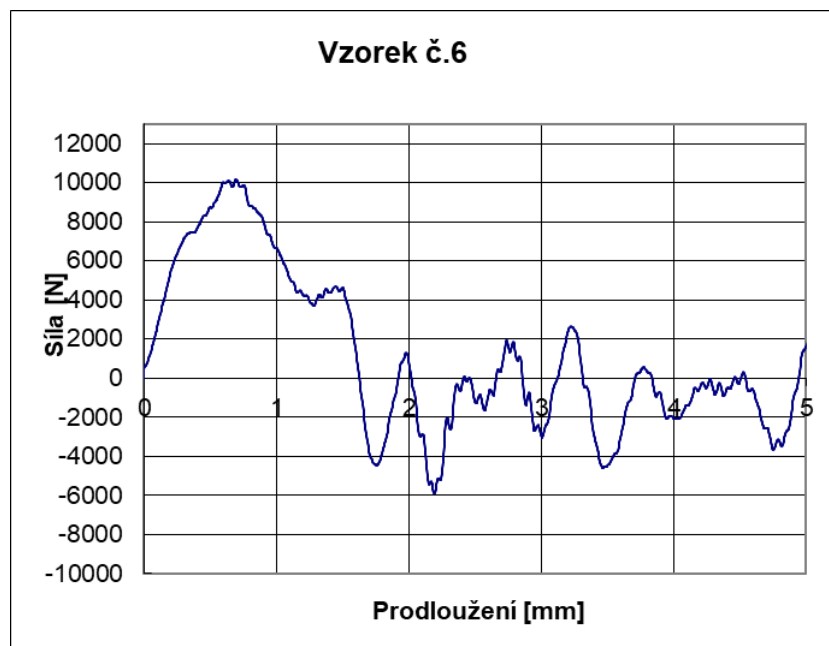
- [1] *Nauka o materiálu: Kovy a kovové materiály 2. část*. Praha: ČVUT, Žitná 4, 2002. ISBN 80-01-025683.
- [2] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Speciální kovové materiály*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-05685-0.
- [3] Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. MM Průmyslové spektrum [online]. ČVUT v Praze, 2017, (3), 90 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>.
- [4] *Speciální oceli - Duplexní oceli* [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://ebook.veda-hrou.cz/cms/17-kapitola-7-specialni-oceli-duplexni-oceli.html>.
- [5] RKP 450 – rázová kladiva. *Zwick Roell* [online]. 2018 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://www.zwick.cz/cs/produkty/produkty-pro-razove-zkousky/razova-kladiva/rkp-450-razova-kladiva-do-450-j.html>.
- [6] KUZIAK, R., R. KAWALLA a S. WAENGLER. *ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING: Advanced high strength steels for automotive industry* [online]. 2008 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://1-s2.0-S1644966512601976-main>
- [7] SAJDL, Jan. *Emisní norma EURO* [online]. In: 2018 [cit. 2018-03-04]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/emisni-norma-euro/>
- [8] GIRMAN, V a V HRABČÁKOVÁ. *KOVOVÉ MATERIÁLY AUTOMOBILOVÝCH KONŠTRUKCII – II KAROSÉRIA A KAROSÁRSKE PLECHY*. 2012. ISSN 1337 – 8953. Dostupné z: <http://www.materialing.com/sites/default/files/Kovov%C3%A9%20materi%C3%A1ly%20automobilov%C3%BDch%20kon%C5%A1trukcii%20II%20-%20Karos%C3%A9ria%20a%20karos%C3%A1rske%20plechy.pdf>
- [9] *Kovové materiály - Metoda zkoušení tahem při vysokých rychlostech deformace*. UNMZ, 2010.

- [10] KRÍŽ, Antonín. *Nauka o materiálu – I. ročník: Zkoušky rázem* [online]. In: . [cit. 2018-03-14].
- [11] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3513-1.
- [12] KUNZ, Jiří. *Aplikovaná lomová mechanika*. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-02248.
- [13] *Stanovení mechanických vlastností materiálů*. Brno, 2016. Disertační práce. Vysoké učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [14] HANUS, Petr. *Hodnocení vlivu strukturní heterogenity na pevnost svarových spojů vysokopevných ocelí*. Pardubice, 2016. Disertační práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [15] AL-ABBASI, F.M. *Predicting the effect of ultrafine ferrite on the deformation behavior of DP-steels* [online]. 2016 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: [www.elsevier.com/locate/commatsci](http://www.elsevier.com/locate/commatsci)
- [16] YU, Haidong a Yongjin GUO a kol. *Rate-dependent behavior and constitutive model of DP600 steel at strain rate from  $10^{-4}$  to  $10^3$  s<sup>-1</sup>* [online]. 2008 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: [www.elsevier.com/locate/matdes](http://www.elsevier.com/locate/matdes)
- [17] RAHMAAN, T a A BARDELCEK a kol. *Effect of strain rate on flow stress and anisotropy of DP600, TRIP780, and AA5182-O sheet metal alloys* [online]. 2015 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: [www.elsevier.com/locate/ijimpeng](http://www.elsevier.com/locate/ijimpeng)
- [18] MIHALIKOVÁ, M. a M. NÉMET. *DP 600 STEEL RESEARCH OF DYNAMIC TESTING*. Technical University of Košice, Slovakia, 2014. ISSN ISSN 0543-5846.
- [19] VYMYSLICKÝ, Tomáš. *Testování dynamické pevnosti dvoufázových vysokopevných ocelí*. Pardubice, 2015. Diplomová práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera.

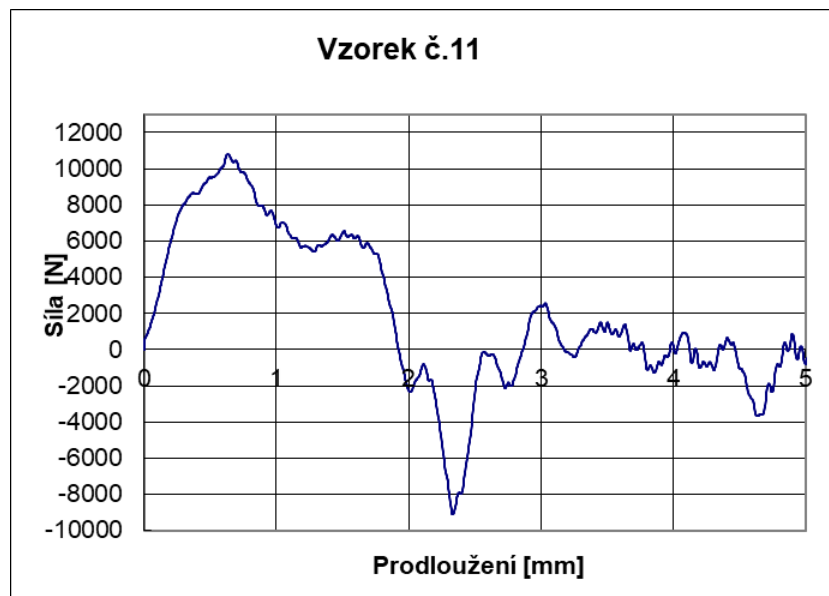
## 10 PŘÍLOHY

Příloha A Záznamy dynamických tahových zkoušek.....	63
Příloha B Záznamy statických tahových zkoušek .....	66

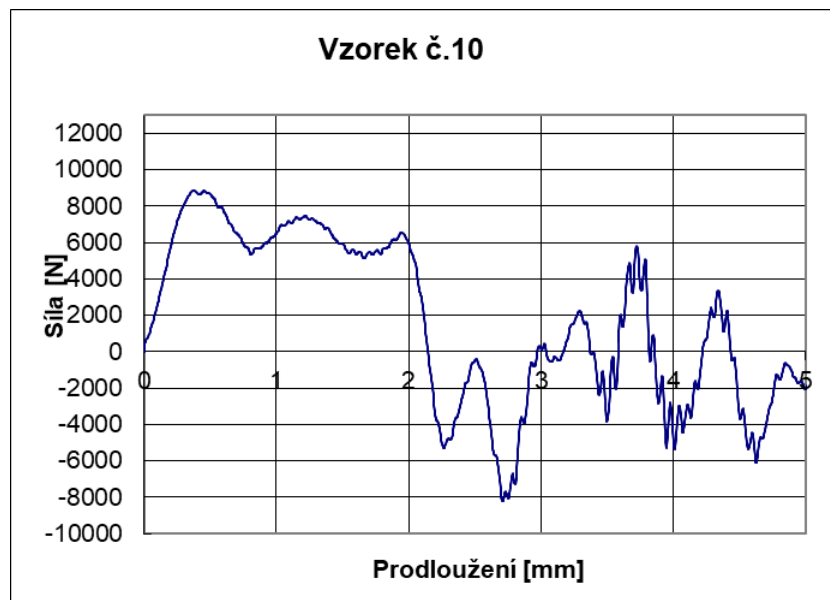
## Příloha A Záznamy dynamických tahových zkoušek



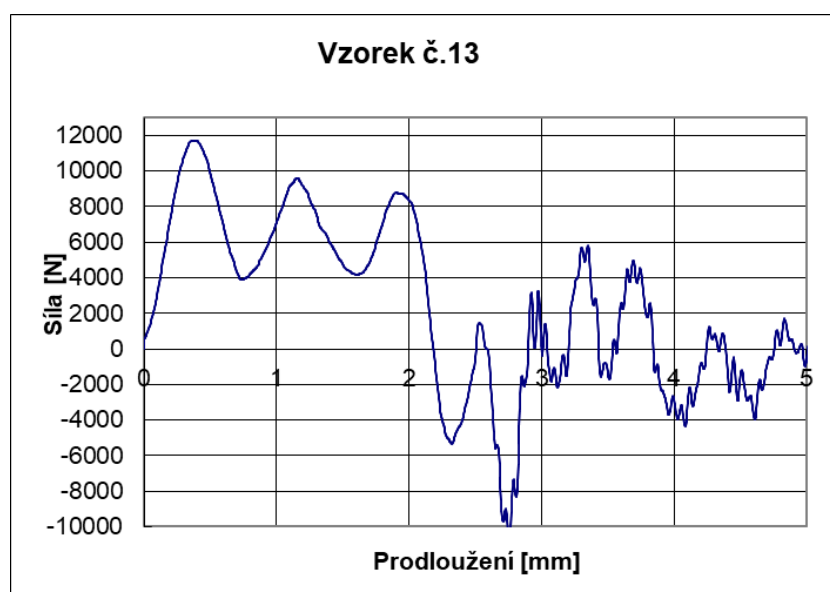
Obrázek A.1: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 6



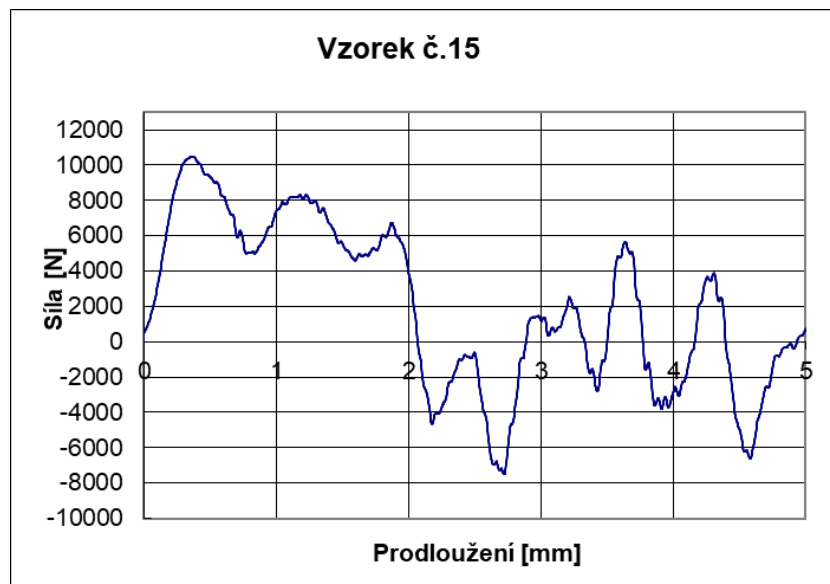
Obrázek A.2: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 11



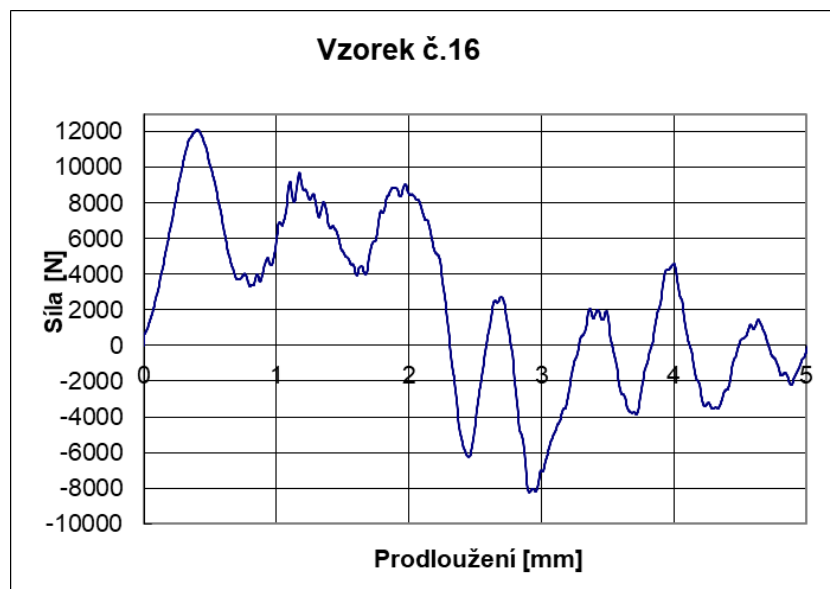
Obrázek A.3: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 10



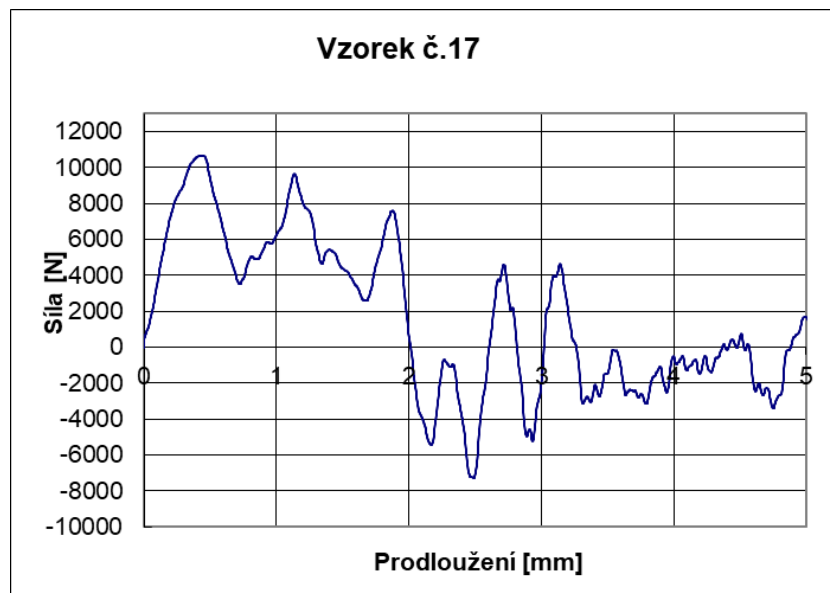
Obrázek A.4: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 13



Obrázek A.5: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 15

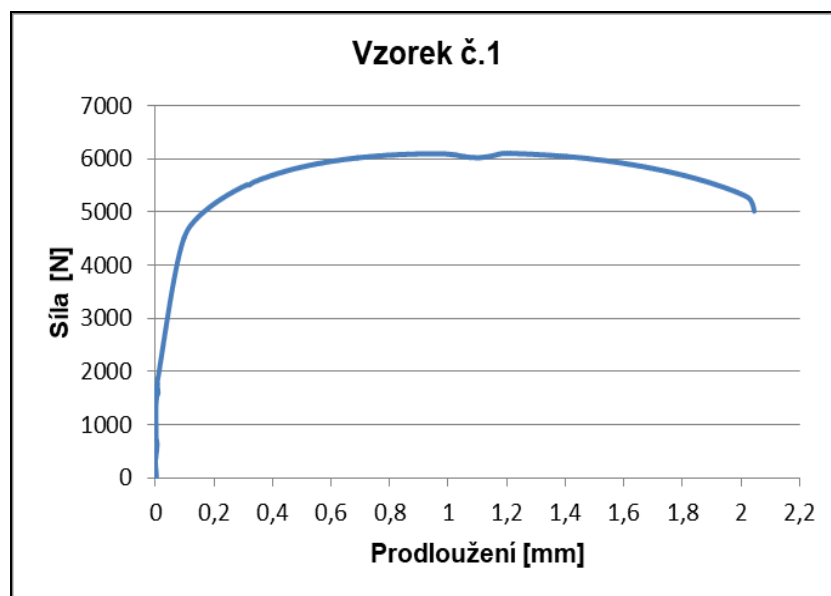


Obrázek A.6: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 16

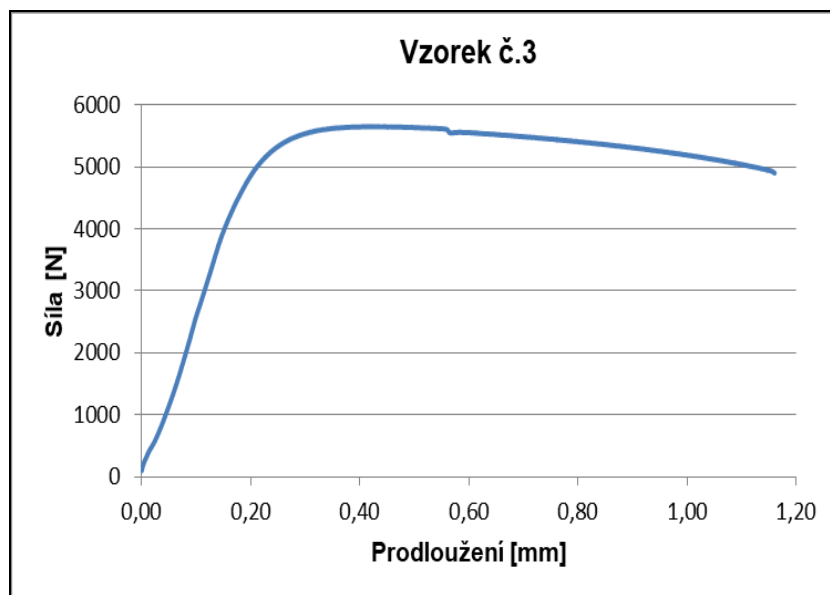


Obrázek A.7: Záznam dynamické zkoušky vzorku č. 17

## Příloha B Záznamy statických tahových zkoušek



Obrázek B.1: Záznam statické zkoušky vzorku č. 1



**Obrázek B.2: Záznam statické zkoušky vzorku č. 3**