

UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

Bc. Tomáš Mejtský

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vliv rychlosti deformace na anizotropii IF ocelí pro automotive

Diplomová práce

2022

Bc. Tomáš Mejtský

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Mejtský**
Osobní číslo: **D20524**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Téma práce: **Vliv rychlosti deformace na anizotropii IF ocelí pro automotive**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování

1. Představení a kategorizace IF ocelí, aplikace se zaměřením na automotive.
2. Podstata plastické anizotropie, mechanismy vzniku, metody a základní parametry hodnocení plastické anizotropie.
3. Experimentální analýzy referenčního typu IF oceli:
 - vyhodnocení zkoušek, zaměřením na intenzitu deformačního zpevnění a lokalizaci deformace,
 - strukturní analýzy – vyhodnocení rozdílů lokalizace a intenzity plastické deformace pod vlivem zvýšené rychlosti deformace.
4. Souhrnné vyhodnocení, konfrontace výsledků laboratorních zkoušek s limitními stavy deformace u reálných výlisků autokaroserií.

Rozsah pracovní zprávy: **50 stran**
Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] ŽÍDEK, M.: *Metalurgická tvářitelnost ocelí za tepla a za studena*. Aleko, Praha 1995, ISBN 80-85341-45-X.
[2] JANOVEC, J., MACEK, K., ZUNA, P.: *Fyzikální metalurgie*. ČVUT 2008, ISBN 978-80-01-02935-0.
[3] BOWMANN, K.: *Mechanical Behavior of Materials*. Willey, 2004, ISBN 0-471-24198-9.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.**
Výukové a výzkumné centrum v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **7. února 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2022**

L.S.

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

Ing. Jakub Vágner, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 7. února 2022

Prohlašuji:

Práci s názvem „Vliv rychlosti deformace na anizotropii IF ocelí pro automotive“ 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., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

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

V Pardubicích dne 05. 05. 2022

Bc. Tomáš Mejtský

PODĚKOVÁNÍ

V následujících řádcích bych rád poděkoval všem, jež mi poskytli pomoc a podporu ve vytvoření této práce. V první řadě mé velké díky patří prof. Ing. Evě Schmidové, Ph.D. za odborné vedení, okamžitou zpětnou vazbu a vhodně směřované připomínky k práci. Dále bych rád vyjádřil nemalé dík Ing. Filipovi Klejchovi za poskytnuté konzultace a pomoc při obsluze přístrojů potřebných k testování. Závěrem nemohu opomenout ani svoji rodinu, která mi ustavičně dodávala tolik potřebnou psychickou podporu jak při studiích, tak v životě.

ANOTACE

V první části se tato práce zabývá představením sortimentu nejpoužívanějších vysokopevných ocelí v automotive, včetně mechanických vlastností. Nedílnou součástí úvodu je představení principu a kategorizace IF ocelí (ocelí bez intersticií) s aplikací zaměřenou taktéž na automobilový průmysl. Dále se v navazující teorii pojednává o mechanismech plastické deformace, které zajišťují IF ocelím nenahraditelné místo v použití na automobilových karoseriích. Jedním z hlavních teoretických poznatků jsou pojmy plastická a plošná anizotropie specifická právě pro předmětné oceli, uvedeny jsou i základní parametry hodnocení. V praktické části jsou realizovány experimentální analýzy referenčních vzorků oceli typu IF. Tato kapitola obsahuje kromě dalších i popis řešeného problému, charakteristiku testované oceli a návrh samotného experimentu (společně s popisem použitých zkoušek). Uvedené zkoušky potřebné k popisu chování materiálu obsahují přípravu vzorků pro jejich realizaci a výsledky. V souhrnném vyhodnocení, závěru jsou diskutovány výsledky získané ze zmíněných experimentů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Autokaroserie, vysokopevnostní oceli, IF oceli, deformace, mechanismy deformace, plastická a plošná anizotropie, rychlost deformace, deformační zpevnění, lokalizace deformace, intenzita deformace

TITLE

Influence of deformation rate on the IF automotive steels anisotropy

ANNOTATION

In the first part, this work deals with the introduction of the range of the most used high-strength steels in automotive, including mechanical properties. An integral part of the introduction is the introduction of the principle and categorization of IF steels (non-interstitial steels) with an application also focused on the automotive industry. Furthermore, the following theory deals with the mechanisms of plastic deformation, which provide IF steels with an irreplaceable place in use on car bodies. Ones of the main theoretical findings are the concepts of plastic and surface anisotropy specific to the steel in question, the basic parameters of evaluation are also given. In the practical part, experimental analyzes of reference samples of IF type steel are performed. This chapter contains, among others, a description of the problem, the characteristics of the steel tested, and the design of the experiment itself (along with a description of the tests used). These tests are needed to describe the behavior of the material including the preparation of samples for their implementation and results. The results obtained from the mentioned experiments are discussed in the overall evaluation.

KEYWORDS

Car body, high-strength steels, IF steels, deformation, deformation mechanisms, plastic and planar anisotropy, strain rate, deformation strengthening, deformation localization, deformation intensity

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	11
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	13
ÚVOD	15
1. APLIKACE VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ V AUTOMOTIVE	16
1.1 Sortiment vysokopevných ocelí v automotive.....	17
1.1.1 HSS	17
1.1.2 AHSS	17
1.1.3 PHS	19
1.2 IF oceli a jejich kategorizace	20
1.2.1 Představení principu IF, IF-HS a IF s BH efektem ocelí.....	20
2. MECHANISMY PLASTICKÉ DEFORMACE, SPECIFIKA U IF OCELÍ	22
2.1 Mechanismy vzniku plastické deformace	22
2.1.1 Skluzové systémy	24
2.1.2 Použitá metoda krystalografických analýz	28
2.1.3 Mechanismy zpevnění, vlivy na plasticitu.....	33
2.2 Plastická a plošná anizotropie	37
3. EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY REFERENČNÍHO TYPU IF OCELI.....	40
3.1 Popis problému	40
3.2 Návrh experimentu, použité metody.....	43
3.3 Výchozí charakteristika testované oceli.....	47
3.4 Měření deformací, analýzy mezních přetvoření v závislosti na rychlosti deformace.....	50
3.4.1 Příprava vzorků.....	50
3.4.2 Postup měření na metalografickém mikroskopu	50
3.4.3 Výsledky měření deformací.....	52
3.5 Analýzy iniciace defektů v závislosti na intenzitě deformace	53
3.5.1 Příprava vzorku pro zkoušky na SEM	53
3.5.2 Provedení analýzy povrchu na SEM.....	53
3.5.3 Výsledky analýz iniciací defektů na SEM.....	56
3.6 Strukturní a krystalografické analýzy	65
3.6.1 Vyhodnocení strukturní a krystalografické analýzy	66
3.7 Měření lokální meze kluzu	68
3.7.1 Příprava vzorků.....	68
3.7.2 Provedení instrumentované zkoušky	69
3.7.3 Vyhodnocení záznamů z měření indentační meze kluzu.....	70

3.8 Vliv rychlosti deformace na zpevnění	72
SOUHRNNÉ VYHODNOCENÍ, ZÁVĚRY	76
POUŽITÁ LITERATURA	79
PŘÍLOHY	82

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: Sortiment použitých vysokopevnostních ocelí ve Škodě Kamiq 2021 [1]	16
Obrázek 2: Přehled mechanických vlastností vybraných vysokopevných ocelí [2].....	19
Obrázek 3: Schéma deformace krystalové mřížky skluzem [3]	23
Obrázek 4: Schéma deformace krystalové mřížky dvojčatěním [3], [4]	23
Obrázek 5: Čárové poruchy (dislokace) [3].....	24
Obrázek 6: Frank-Readův zdroj dislokací [5].....	25
Obrázek 7: BCC mřížka [7]	26
Obrázek 8: Příklad skluzové roviny BCC mřížky [8].....	26
Obrázek 9: FCC mřížka [7]	26
Obrázek 10: Příklad skluzové roviny FCC mřížky [8]	27
Obrázek 11: HTU mřížka [7].....	27
Obrázek 12: HTU (ang. HCP) mřížka [8].....	28
Obrázek 13: Difrakční obrázek EBSD (vlevo), difrakční obrázek RTG (vpravo) [9]	28
Obrázek 14: Schéma dvou interakcí (vlevo) a kanálování (vpravo) [10].....	29
Obrázek 15: Model kanálování elektronů (vlevo), vztah EBSD a ECP (vpravo) [10].....	30
Obrázek 16: Příklady závislosti krystalové orientace na difrakčním vzoru [11].....	30
Obrázek 17: Barevné kódování s inverzní mapou pólových obrazců a orientace mřížky [12] 31	31
Obrázek 18: Příklad pólových obrazců a mapy; [hkl] značí krystalografický směr [13]	31
Obrázek 19: Protínací a protlačovací mechanismus [15]	34
Obrázek 20: Křivky def. zpevnění monokrystalů mřížky FCC (vlevo) a HTU (vpravo) [7] ...	36
Obrázek 21: Křivka deformačního zpevnění polykrystalu [17]	37
Obrázek 22: Plastická a plošná anizotropie s ohledem na směr válcování [19]	39
Obrázek 23: Indentační křivka [25]	45
Obrázek 24: Schéma měření lokalizace deformace	47
Obrázek 25: Charakteristická mikrostruktura IF oceli v počáteční fázi [13]	48
Obrázek 26: Geometrie vzorku pro tahovou zkoušku	49
Obrázek 27: Skutečná křivka napětí-deformace předmětné IF oceli [13]	49
Obrázek 28: a) pořízené fotografie, b) měření v oblasti lomu, c) vytvořená koláž, d) měření koláže	51
Obrázek 29: Transformovaný graf.....	53
Obrázek 30: Příklad vytvořeného obrazu, hranice pro nastavení analýzy (červené linie).....	54
Obrázek 31: Postup úpravy analyzovaného obrazu (oblast 100-200 μm).....	56
Obrázek 32: Graf obsahu trhlin bez nečistot na čísle měření pro analýzu 10 m/s.....	58
Obrázek 33: Transformovaný graf s mezní hranicí konce trhlin	59
Obrázek 34: Fotografie výlisku s pozicemi měření	59
Obrázek 35: Porovnání oblastí OK (a), NOK (b)	60
Obrázek 36: Graf průběhu změny tloušťky výlisku tvářeného za provozních podmínek	61
Obrázek 37: Transformovaný graf s vyznačenými hranicemi	62
Obrázek 38: Transformovaný graf s odečítanou hodnotou	63
Obrázek 39: Graf pro odečet mezní hodnoty tloušťky neovlivněné oblasti	64
Obrázek 40: Mapa kvality vzoru (nahore), misorientace hranic zrn na jejich podílu (dole)	66
Obrázek 41: EBSD: a) IPF mapa v x (TD), b) IPF mapa v y (RD), c) IPF mapa v z (ND)	67
Obrázek 42: EDX analýza	68
Obrázek 43: Schéma přípravy vzorku pro měření lokální meze kluzu.....	69
Obrázek 44: Měřené linie s měřítka a) první linie, b) namoženina, c) rádius	70

Obrázek 45: Graf srovnání gradientů skutečných mezí kluzu testovaných vzorků.....	74
Obrázek 46: Příčně řezaný vzorek s vpichy.....	74
Obrázek 47: Závislost zpevnění na lokalizaci deformace	77
Tabulka 1: Chemické složení analyzovaného plechu [13]	48
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti IF oceli ze standardní tahové zkoušky [13].....	49
Tabulka 3: Deformace vzorků s přepočtem na ekvivalentní deformaci	52
Tabulka 4: Příklad upravené tabulky převedené z AnalySIS Docu do Excelu	56
Tabulka 5: Výsledky z měření povrchové analýzy vzorku 10 m/s na SEM.....	57
Tabulka 6: Analýza 10 m/s mimo deformaci.....	57
Tabulka 7: Přepočtené hodnoty analýzy iniciace defektů pro vzorek 10 m/s	57
Tabulka 8: Nastavení mikroskopu pro EBSD analýzu	65
Tabulka 9: Hodnoty z měření indentace pro nedeformovaný vzorek.....	71
Tabulka 10: Hodnoty z měření indentace pro 1. linii (a) tvářeného vzorku.....	71
Tabulka 11: Hodnoty z měření indentace pro namoženinu (b) tvářeného vzorku.....	71
Tabulka 12: Hodnoty z měření indentace pro rádius (c) tvářeného vzorku.....	72
Tabulka 13: Shrnutí hodnot z měření indentace	72
Tabulka 14: Hodnoty z tahových zkoušek.....	73

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

IF (*Interstitial free*) – Bez intersticií

HSS (*High strength steel*) – Vysokopevná ocel

AHSS (*Advanced high strength steel*) – Pokročilá vysokopevná ocel

UHSS (*Ultra high strength steel*) – Ultra vysokopevná ocel

PHS (*Press hardened steel*) – Ocel tvářená za tepla

BH (*Bake hardening*) – Dodatečné zvýšení mechanických vlastností

HSLA ocel (*High strength low alloy steel*) – Vysokopevnostní nízkolegovaná ocel

DP ocel (*Dual phase steel*) – Dvoufázová ocel

CP ocel (*Complex phase steel*) – Vícefázová ocel

TWIP ocel (*Twinning induced plasticity steel*) – Ocel s plasticitou indukovanou dvojčatěním

TRIP ocel (*Transformation induced plasticity steel*) – Ocel s transformačně indukovanou plasticitou

MS (*Martensitic steel*) – Martenzitická ocel

HF (*Hot formed*) – Tvářené za tepla

BCC, K8 (*Body centered cubic lattice*) – Krychlová prostorově středěná mřížka

FCC, K12 (*Face centered cubic lattice*) – Krychlová plošně středěná mřížka

HCU, HCP, H12 (*Hexagonal close packed lattice*) – Hexagonální těsně uspořádaná mřížka

SEM (*Scanning electron microscope*) – Rastrovací (skenovací) elektronový mikroskop

EBSD (*Electron backscatter diffraction*) – Difrakce zpětného rozptylu elektronů

EDX spektroskopie (*Energy dispersive X-ray spectroscopy*) – Energeticky disperzní rentgenová spektroskopie

RTG – Rentgen

ECP (*Electron channeling pattern*) – Model kanálování elektronů

PE (*Primary electrons*) – Primární elektrony

BSE detector (*Back scattered electron detector*) – Detektor zpětně odražených elektronů

ND (*Normal direction*) – Normálový směr

RD (*Rolling direction*) – Směr válcování

TD (*Transverse direction*) – Příčný směr

IQ (*Image quality*) – Rozlišení obrazu

CCD (*Charge coupled device*) – Zařízení citlivé na elektrický náboj

RGB (*Red green blue*) – Model barev červená zelená modrá

SE detektor (*Secondary electron detector*) – Detektor sekundárních elektronů

WD (*Working direction*) – Pracovní vzdálenost

SEM HV (*SEM High voltage*) – Vysoké napětí SEM

SEM MAG (*SEM Magnification*) – Zvětšení obrazu SEM

OK – Vyhovující stav

NOK – Mezní (nevyhovující) stav

ÚVOD

V dnešní době rychlého vývoje automobilového průmyslu je prioritou ekonomická a technická dominance na trhu. S tím je spjato neustálé optimalizování a vylepšování stávajících výrobních technologií, zvyšování bezpečnosti, snižování hmotnosti jednotlivých komponent, ceny a podobně. Mezi moderní směry vývoje patří co nejvíce zmenšit negativní dopad spalování pohonných hmot na životní prostředí. Dosáhnout menší spotřeby pohonných hmot lze i již zmíněným snížením váhy. Toto však není úplně jednoduché, protože například v případě karoserie se musí zachovat pasivní bezpečnost posádky.

Bezpečnost a hmotnost, která přímo ovlivňuje snižování spotřeby pohonných hmot, patří k nejdůležitějším faktorům při vývoji nových konceptů automobilů. Jedná se však o dva protichůdné prvky, jejichž vyhovující poměr lze řešit použitím vysokopevnostních materiálů. K docílení těchto vlastností je třeba nejdříve poznat chování materiálu, které se nejčastěji zjišťuje experimentálně pomocí zkoušek.

Nicméně i u těchto ocelí je snaha co nejvíce zdokonalit ekonomický profit z výroby. Toho se dosahuje zkrácením času při zpracovávání oceli do hotového výrobku. Rychlejší tváření však iniciuje jiné chování materiálu, které je závislé na deformační rychlosti, a tudíž i výsledné mechanické vlastnosti.

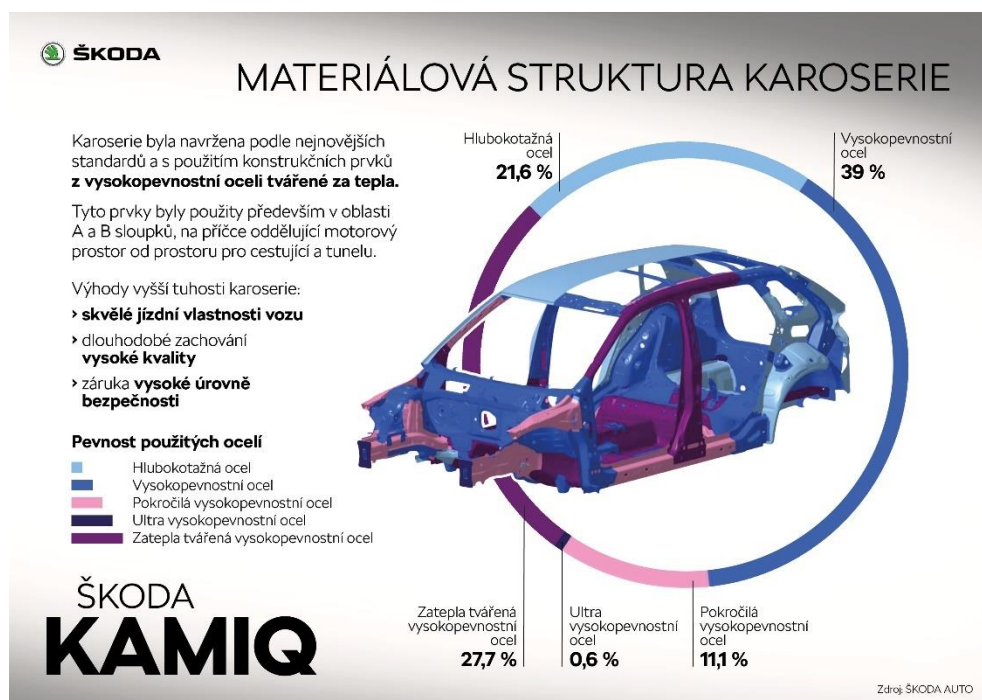
V mé práci je rozebírané použití speciálních materiálů v karoseriích, zejména soustředěné na IF oceli (Interstitial free oceli, oceli bez intersticií), jejich kategorizace a vlastnosti, se zaměřením na procesy, spojené s deformací. V teoretické části v této souvislosti je zpracována podstata plastické a plošné anizotropie, jejich mechanismy vzniku a metody hodnocení, společně se základními parametry hodnocení.

Experimentální část práce se pak zabývá analýzou referenčních vzorků IF oceli z šarže ocelového pásu přímo používaného k výrobě. Obsahuje návrh experimentu (rozsah deformačních rychlostí, optimalizaci geometrie vzorku při různé rychlosti deformace atd.), vyhodnocení záznamu zkoušek se zaměřením na intenzitu deformačního zpevnění a lokalizaci deformací, strukturní analýzy (vyhodnocení rozdílů lokalizace a intenzity plastické deformace pod vlivem zvýšené rychlosti deformace) a krystalografické analýzy, které se zabývají srovnáním vybraných parametrů anizotropie.

V závěru je uvedeno souhrnné vyhodnocení a závěry získané z výsledků se zaměřením na změny výchozí anizotropie oceli vlivem deformace při definované rychlosti deformace.

1. APLIKACE VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ V AUTOMOTIVE

Zmíněné využití vysokopevných materiálů kvůli zlehčování karoserie z důvodu úspory paliva při zachování bezpečnosti dokazuje i uvedený sortiment ocelí od společnosti Škoda v nejnovější řadě modelu Scala (viz obrázek 1).



Obrázek 1: Sortiment použitých vysokopevnostních ocelí ve Škodě Kamiq 2021 [1]

Za pozornost stojí, že nízkopevné oceli jsou využívány pouze na méně zatěžované, za to složitě tvarované prvky karoserie, jako zavazadlový prostor, střecha, boční plechy a podobně (využití hlubokotažných ocelí), tomu také odpovídají požadavky na jejich mechanické vlastnosti.

Tato karoserie obsahuje převažující procento vysokopevných ocelí, nominálně 78,4 %. Z toho jsou použity vysokopevné oceli HSS, pokročilé vysokopevné oceli AHSS (označení pro oceli s ještě vyšší pevností), ultra vysokopevné oceli UHSS (nejpevnější vyráběné oceli) a oceli tvářené za tepla PHS (často uváděné v kategorii AHSS, pouze tvářené speciální metodou pro vytvoření komplexnějších tvarů výrobku).

1.1 Sortiment vysokopevných ocelí v automotive

Příklady typů ocelí nejčastěji aplikovaných v automotive jsou:

1.1.1 HSS

HSS (high strength steel, vysokopevné oceli) jsou nejpoužívanější v automobilovém průmyslu. Nejrozšířenější HSS oceli v automotive jsou:

- IF-HS oceli
 - oceli s feritickou matricí, bez intersticií, obohacené o prvky zaručující jejich zpevnění
 - vysoký exponent deformačního zatížení dovoluje jejich použití na místech, kde je potřeba vynikající hlubokotažnosti se zachováním pevnosti (složitá bezpečnostní prvky autokaroserie)
- BH oceli
 - oceli s feritickou matricí nedosahující výrazného zpevnění při tváření, své vysoké pevnosti vděčí BH efektu (dodatečným kontrolovaným žíháním)
 - používají se například na nárazníky, kapoty, panelové díly bočních dveří atd.
- HSLA oceli
 - vysokopevnostní nízkolegované oceli s feritickou matricí, které díky legujícím prvkům mají jemnozrnnou strukturu, zapříčiňující zvýšení pevnosti
 - oproti běžným uhlíkovým ocelím jsou při stejné pevnosti až o 20-30% lehčí, navíc díky nízkému obsahu uhlíku mají i velmi dobrou plasticitu
 - využití nachází například pro výztužné díly dveří, nárazníky nebo některé části karoserie

1.1.2 AHSS

AHSS (advanced high strength steel, pokročilé vysokopevné oceli) mají uplatnění převážně užívané tam, kde HSS oceli nemají dostatečně vysokou pevnost.

- DP oceli
 - dvoufázové oceli (ferit a martenzit) využívající martenzitických ostrůvků ke zvyšování pevnosti a měkké feritické fáze k zaručení plasticity, stejně jako u BH ocelí se zde často využívá dodatečného zpevnění BH efektem při vytvrzování laku

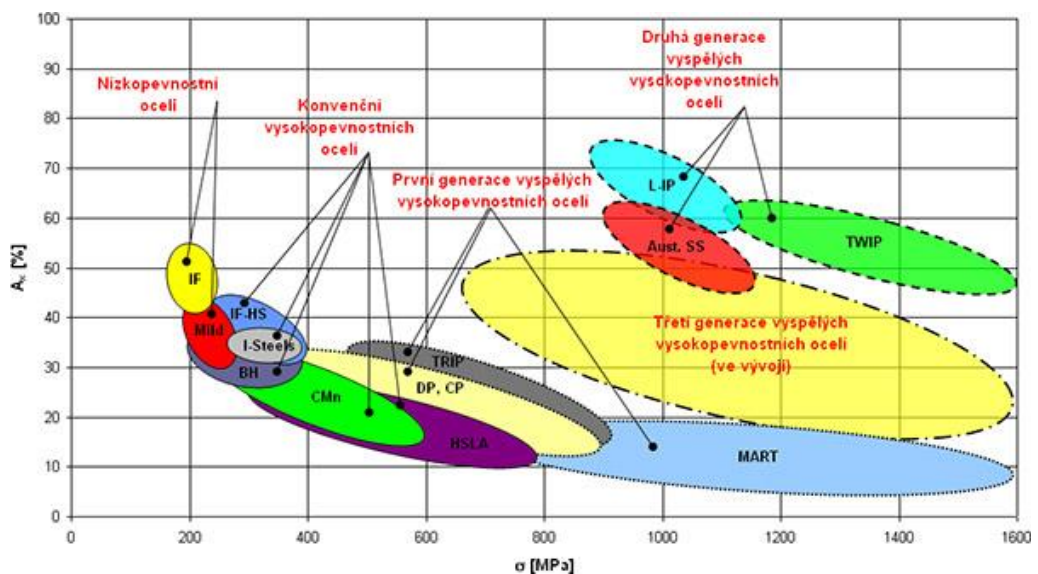
- vzhledem k jejich vlastnostem absorbovat velké množství energie a odolávat únavě se využívají na nosné a bezpečnostní prvky karoserie jako podélné nosníky, sloupky (A, B, C a D), výztuhy a podobně
- CP oceli
 - vícefázové oceli (malé množství martenzitu, někdy zbytkový austenit ve feriticko-bainitické matrici) docilují zjemnění zrna a tím zvýšení pevnosti pomalou rekrystalizací, případně precipitací mikrolegur (Ti nebo Nb)
 - využití nachází u dílů jednoduchých tvarů s malou deformací jako dveřní lišty, příruby sedadel atd.
- TRIP oceli
 - multifázové (zbytkový austenit a bainit ve feritické matrici) oceli s transformačně indukovanou plasticitou využívají přeměny austenitické fáze na pevnou martenzitickou fázi při plastické deformaci, tzv. TRIP efekt
 - podobně jako DP oceli se hodí na konstrukční a bezpečnostní díly automobilu
- TWIP oceli
 - oceli, u kterých plastická deformace probíhá pomocí mechanismu dvojčatění, což umožňuje velmi vysokou rychlost deformace a tím jemnou mikrostrukturu
 - legury obsahující v této oceli zapříčiňují plně austenitickou matrici, zaručující extrémní hodnoty tažnosti při velmi vysoké pevnosti
 - v poslední době jsou hojně využívány v deformačních zónách karoserie (mechanismus dvojčatění spotřebovává velmi velké množství energie), například B sloupek nebo boční výztuha karoserie
- MS oceli
 - martenzitické oceli, již podle názvu, obsahují převážně martenzitickou strukturu (dále někdy také malé množství feritu a bainitu) dosahovanou nejběžněji pomocí válcování za tepla a následným zakalením, tato struktura je velmi pevná ale křehká, proto se často po kalení ještě popouštějí pro zlepšení tvárnosti
 - pro svou unikátně vysokou pevnost v tahu jsou zejména využívány pro konstrukční prvky odolávající nárazům, jako přední a zadní nárazník, výztuhy dveří, atd.

1.1.3 PHS

PHS (press hardened steel, oceli vysokopevné lisované za tepla) nebo také označované jako HF (hot formed, tvářené za tepla) mají převážně využití tam, kde je požadovaná vysoká odolnost proti nárazu.

- Manganbórové oceli
 - příkladem manganbórové oceli může být ocel, která je vhodná pro vysokoteplotní termomechanické zpracování při lisování, tato vlastnost je dána právě přidáním malého množství bóru nebo manganu (jedná se o princip kdy u feriticko-perlitické struktury po ohřevu a následném tvářením za tepla dojde ke kalení při lisování, které zapříčiní výslednou martenzitickou strukturu se zbytkovým austenitem)
 - oproti konvenčním vysokopevným ocelím HSS (tvářené za studena) umožňují tyto oceli snížit hmotnost v rozmezí 30-50 % a používá se tedy především na nosné a bezpečnostní prvky karoserie (nosníky, uchycení nárazníků a součástí podvozku, A a B sloupek, atd.)

Již podle výčtu všech ocelí je zřejmé, že vysokopevnostní oceli mají široké využití v automobilovém průmyslu a často mají jednotlivé druhy totožnou aplikaci v karoserii. Konkrétní využití dané oceli se odvíjí od každého výrobce a závisí na zhodnocení oceli v poměru „cena/výkon“, kde výkonem jsou myšleny mechanické vlastnosti jako primárně pevnost, tažnost, deformační zpevnění nebo pohlcování energie při nárazu. Grafické znázornění pevnosti jednotlivých ocelí na tažnosti je na obrázku 2.



Obrázek 2: Přehled mechanických vlastností vybraných vysokopevných ocelí [2]

1.2 IF oceli a jejich kategorizace

If oceli se rozdělují do dvou hlavních kategorií, a to podle jejich pevnosti na nízkopevné a vysokopevné.

- nízkopevné
 - IF oceli
- vysokopevné
 - IF-HS oceli
 - IF oceli s BH efektem

1.2.1 Představení principu IF, IF-HS a IF s BH efektem ocelí

Základní typ IF ocelí se řadí mezi nízkopevné materiály, protože jak již název napovídá, není zde přítomno žádných nebo minimum intersticií, které by materiál zpevňovaly. Bez přidaných intersticií je feritická struktura velice čistá, zabezpečující velmi dobrou tažnost. Často se mikrolegují prvky titanu Ti a niobu Nb ke snížení uhlíku C a dusíku N na velmi nízké hodnoty, čímž jsou docíleny velmi dobré plastické vlastnosti a zvýšená normálová anizotropie (hlavní mechanismus využívající u IF ocelí). Navíc díky legujícím prvkům dochází k vyvážení dusíku a uhlíku (případně síry S) na stabilní precipitáty vhodného rozložení, což má za následek odolnost IF ocelí proti stárnutí (mechanické blokování pohybu dislokací precipitací).

Dále mají IF oceli nízký poměr meze kluzu k mezi pevnosti. Oceli s tímto nízkým poměrem disponují velkou oblastí plastické deformace (v pracovním diagramu).

Zmíněná normálová anizotropie je základním principem, jenž využívají IF oceli. Jedná se o parametr stanovující nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu k mechanickým vlastnostem v ; jeho tloušťce. Jinak řečeno se jedná o míru ztenčení plechu při jeho deformaci. Čím je normálová anizotropie vyšší, tím vhodnější je ocel pro tváření. Podrobněji je tento mechanismus anizotropie rozebírán dále v této práci.

Modifikací IF ocelí můžeme dosáhnout její vyšší pevnosti. Hlavním rozdílem mezi IF a IF-HS ocelmi je zpevňující přísada v IF-HS ocelích. Nejčastěji jsou těmito přísadami mangan Mn, křemík Si a fosfor P. O tyto prvky jsou blokovány dislokace a tím zvyšována pevnost (při přecházení přes precipitáty se spotřebovává více energie díky napěťové špičce vznikající na průchodu hranic zrn). I nadále však zůstává nízký poměr meze pevnosti a meze kluzu, zvýšená normálová anizotropie, a tudíž je stále zachována velmi dobrá plasticita a hlubokotažnost.

IF oceli s BH efektem jsou v podstatě klasické IF oceli, u kterých ke zpevnění dochází po zpracování pomocí kontrolovaného žíhání. Základem tohoto procesu je nízkoteplotní staticko – napět'ové umělé stárnutí, které stabilizuje dislokace intersticiálními atomy uhlíku a dusíku. Základní podmínkou pro funkci BH procesu je dostatečně vysoký podíl rozpuštěných atomů uhlíku v tuhém roztoku na konci výrobního procesu, protože pouze tyto atomy se na řízeném stárnutí podílejí. V automobilovém průmyslu probíhá BH efekt za teplot okolo 170 °C v rámci procesu kataforetického vypalování (moderní metoda nánosu ponorem) laku. Ke zvýšení meze kluzu dochází vlivem dvou rozdílných důvodů:

- vznik Cottrelových atmosfér na dislokacích
- následnou precipitací karbidů díky Cottrelovým karbidickým atmosférám

POZN.:

Cottrelovy atmosféry znamenají nahromadění intersticiálních atomů kolem dislokací.

2. MECHANISMY PLASTICKÉ DEFORMACE, SPECIFIKA U IF OCELÍ

V této kapitole bude rozebrána blíže teorie mechanismů zajišťující IF ocelím nenahraditelné místo při použití v automobilovém průmyslu. V první části bude rozebrána obecná teorie vzniku deformace a v druhé části bude navázáno na tyto mechanismy s aplikací na IF oceli.

U deformace pevných látek rozlišujeme tři základní typy:

- Elastická deformace
- Plastická deformace
- Creep

Při **elastické deformaci** reaguje deformované těleso na vnější síly bez trvalé změny svého tvaru. Jde o oblast, kdy se předpokládá lineární chování materiálu.

Plastická deformace je taková, při které je překročena určitá mezní hodnota (mez kluzu) materiálu a po odstranění deformačních sil se již výrobek nevrací do původního tvaru. V této oblasti již většinou neplatí základní lineární zákony chování materiálu a často je vyjádřena experimentálně.

Creep je specifická deformace vyvolaná dlouhodobým a stálým působením teploty. Je tedy závislá na vnějších deformačních silách, teplotě a času.

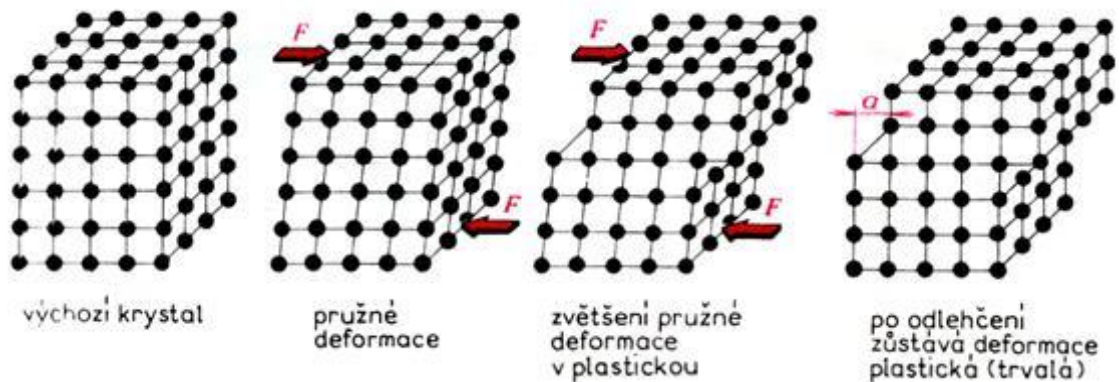
Velikost deformace obecně závisí na mnoha faktorech, kromě zmíněné teploty, času a napjatosti, i na rychlosti zatěžování, chemickém složení, zpevnění při deformaci a podobně. K zajištění soudržnosti materiálu a jeho mechanických vlastností po tváření je analyzováno tzv. deformační chování.

2.1 Mechanismy vzniku plastické deformace

Plastickou deformaci lze ve své podstatě definovat jako pohyb jednotlivých atomů vůči sobě. Vznik a pohyb mřížkových poruch je podstatou konkrétního **mechanismu** deformace.

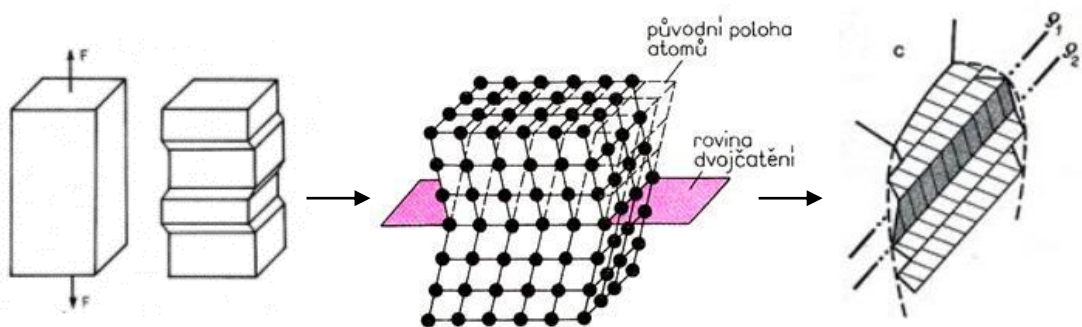
V případě **skluzového mechanismu** se ovlivněná vrstva atomů pohybuje ve směru působícího napětí, až vystoupí na povrch za předpokladu, že se po cestě nezachytí o žádné překážky v krystalu. Lze tedy uvést, že atomy se pohybují proti sobě postupně, nikoliv současně. V případě, že se pohybem zastaví o nějakou překážku, je potřeba k jejímu překročení

(pokračování plastické deformace) zvýšit napětí (podrobněji níže). Schéma principu skluzového mechanismu je obrázku 3.



Obrázek 3: Schéma deformace krystalové mřížky skluzem [3]

Princip deformace **dvojčatěním** spočívá v natočení úseku krystalu, tak aby nastala příznivá poloha pro skluz, při které se právě natočená část mřížky deformuje skluzem. Nově vzniklá mřížka má stejnou orientaci jako původní, pouze je symetricky přetočena. Hranice mezi původní orientací mřížky a mřížky natočené do polohy skluzu se nazývá rovina dvojčatění. Schéma principu je zobrazeno na obrázku 4.



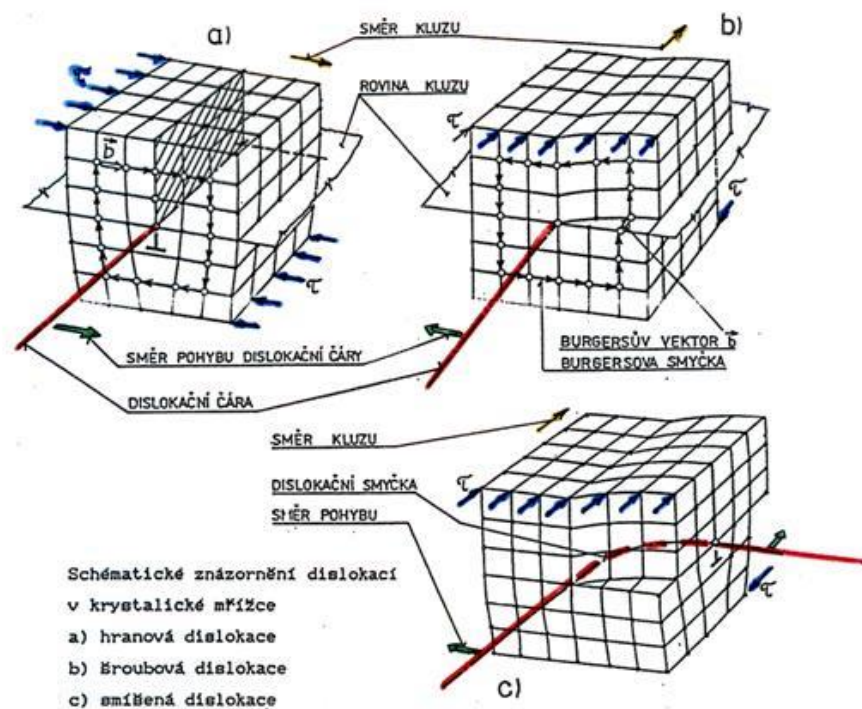
Obrázek 4: Schéma deformace krystalové mřížky dvojčatěním [3], [4]

Typ rozvíjeného mechanismu je takový, který požaduje při daných podmínkách nejmenší napětí. Při plastické deformaci studovaného typu ocelí je nejčastěji převládajícím mechanismem skluz, z tohoto důvodu bude níže uvedený text zaměřen převážně na tento jev.

2.1.1 Skluzové systémy

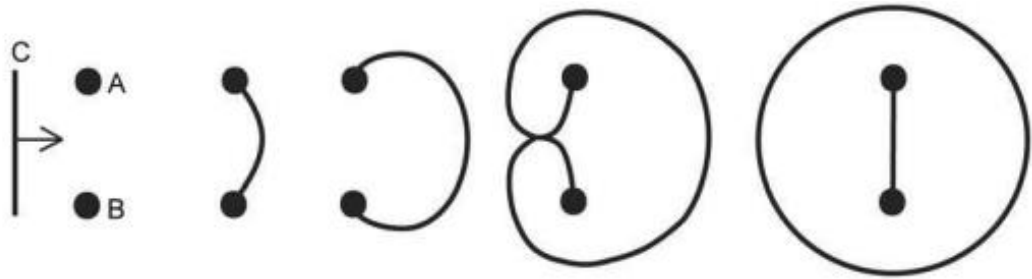
Pro plastické přetvoření je podmínkou pohyblivost čárových poruch, tzv. „dislokací“, vznikajících vysunutím atomů z pravidelných poloh krystalové mřížky některým ze zmíněných mechanismů deformace, popř. jejich kombinací. Na obrázku 5 je schéma typů čárových poruch při skluzovém mechanismu. Rovina, ve které se skluz uskutečňuje se nazývá **rovina kluzu** a je definována největší hustotou atomů (nejmenším odporem proti skluzu). Směr nejtěsnějšího uspořádání atomů ve skluzové rovině je **směr kluzu** a dohromady se skluzovou rovinou tvoří pojem **skluzový systém**. Burgersův vektor je lomená čára charakterizující spolu se směrem dislokační čáry deformaci krystalové mřížky kolem dislokace. V případě, že:

- je kolmý k dislokační čáře, jedná se o hranovou dislokaci,
- je rovnoběžný k dislokační čáře, je dislokace šroubová,
- svírá s dislokační čárou obecný úhel, jde o smíšenou dislokaci.



Obrázek 5: Čárové poruchy (dislokace) [3]

Během běžného tváření mohou dislokace vznikat při krystalizaci kovů, přeměnou shluku neobsazených rovnovážných poloh částic v krystalové mřížce (vakancí) na dislokace, při vzniku ostré trhliny v oblasti s vysokým napětím, skluzem, difúzí (šplháním) nebo jejich zdrojem může být Frank – Readův zdroj dislokací (vlivem nárazu do překážky se dislokační čára při skluzovém pohybu rozděluje a vznikají nové ve tvaru smyčky, viz obrázek 6).



Obrázek 6: Frank-Readův zdroj dislokací [5]

Kombinace skluzové roviny a skluzového směru je skluzový systém, ale to však neplatí pro všechny kombinace roviny a směru v krystalu. Nejjednodušeji probíhá skluz pouze v rovinách a směrech, které jsou nejhustěji zaplněny atomy (pokud jsou blízko u sebe, je jejich pohyb spojený s pohybem dislokací snadnější) a aktivovaný je pouze ten, který je optimálně orientován vůči vnějšímu zatížení (maximální smykové napětí) [6]. K popisu geometrie skluzových systémů jednotlivých krystalových mřížek je využíváno Millerových indexů.

Počet skluzových systémů je dán sumou součinů počtu skluzových směrů a skluzových rovin, viz rovnice (1). K popisu pak slouží zmíněné Millerovy indexy.

$$N_{s.s.} = \sum N_{směr} \cdot N_{rovin} \quad (1)$$

Kde:

$N_{s.s.}$... počet skluzových systémů [–]

$N_{směr}$... počet skluzových směrů [–]

N_{rovin} ... počet skluzových rovin [–]

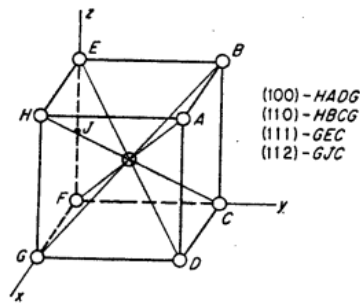
Skluzové systémy mají v technické praxi význam zejména pro základní typy mřížek kovů:

a) krychlová prostorově středěná mřížka (BCC (K8))

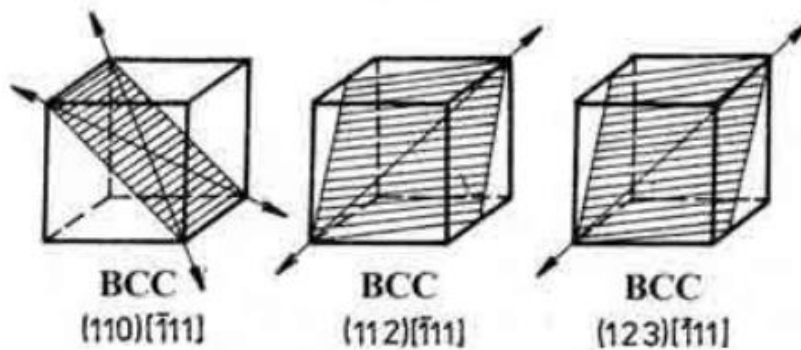
- není tvořena nejtěsnějším uspořádáním částic → obtížné tváření za studena
- typicky železo alfa αFe , chrom, wolfram, nikl, molybden

Počet skluzových systémů s. s. je v tomto případě dle obrázku (7) a rovnice (1) roven:

$$N_{s.s.} = \sum N_{směr} \cdot N_{rovin} = 6 \cdot 2 + 12 \cdot 1 + 24 \cdot 1 = 48 \text{ skluzových systémů}$$



Obrázek 7: BCC mřížka [7]



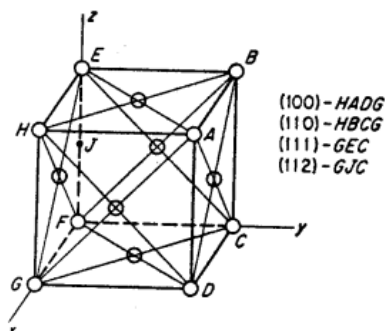
Obrázek 8: Příklad skluzové roviny BCC mřížky [8]

b) krychlová plošně středěná mřížka (FCC (K12))

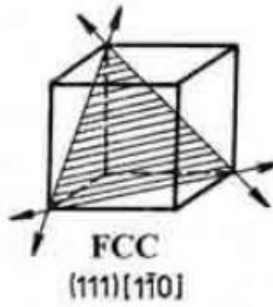
- je tvořena nejtěsnějším uspořádáním částic → nejlepší tvárění za studena i tepla
- typicky železo gama γFe , hliník, měď, stříbro, zlato

Těsnější uspořádání mřížky snižuje počet skluzových systémů a společně s malým smykovým napětím zaručuje poměrně dobrou tváritelnost materiálu. Ten je v tomto případě dle obrázku (9) a rovnice (1) roven:

$$N_{s.s.} = \sum N_{směr} \cdot N_{rovin} = 4 \cdot 3 = 12 \text{ skluzových systémů}$$



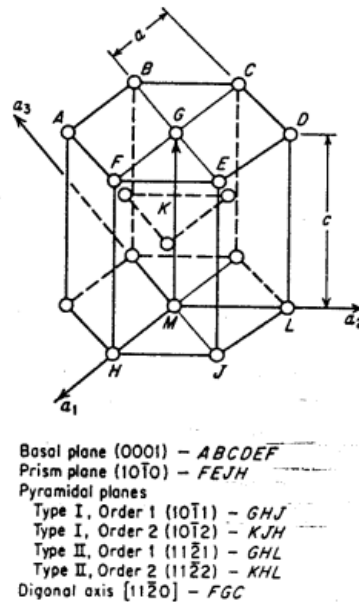
Obrázek 9: FCC mřížka [7]



Obrázek 10: Příklad skluzové roviny FCC mřížky [8]

c) hexagonální těsně uspořádaná mřížka (HTU (H12))

- typicky titan, zinek, kadmium



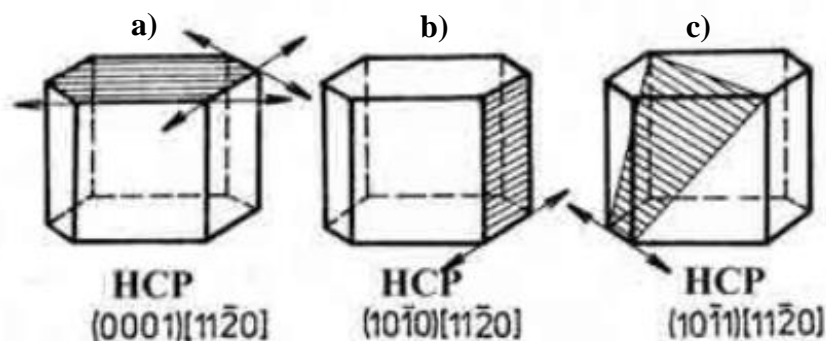
Obrázek 11: HTU mřížka [7]

V tomto případě závisí na poměru rozměru mřížky c/a , s rozlišným poměrem se mění i počet skluzových systémů. Nízké smykové napětí s možným nízkým počtem skluzových systémů dělá tato mřížka materiál zpravidla křehkým.

$$N_{s.s.(a)} = \sum N_{směr} \cdot N_{rovin} = 1 \cdot 3 = 3 \text{ skluzové systémy}$$

$$N_{s.s.(b)} = \sum N_{směr} \cdot N_{rovin} = 3 \cdot 1 = 3 \text{ skluzové systémy}$$

$$N_{s.s.(c)} = \sum N_{směr} \cdot N_{rovin} = 6 \cdot 1 = 6 \text{ skluzových systémů}$$



Obrázek 12: HTU (ang. HCP) mřížka [8]

Čím více skluzových systémů v dané krystalové mřížce existuje, tím snadněji zde bude probíhat mechanismus skluzu, tj. materiál bude měkčí.

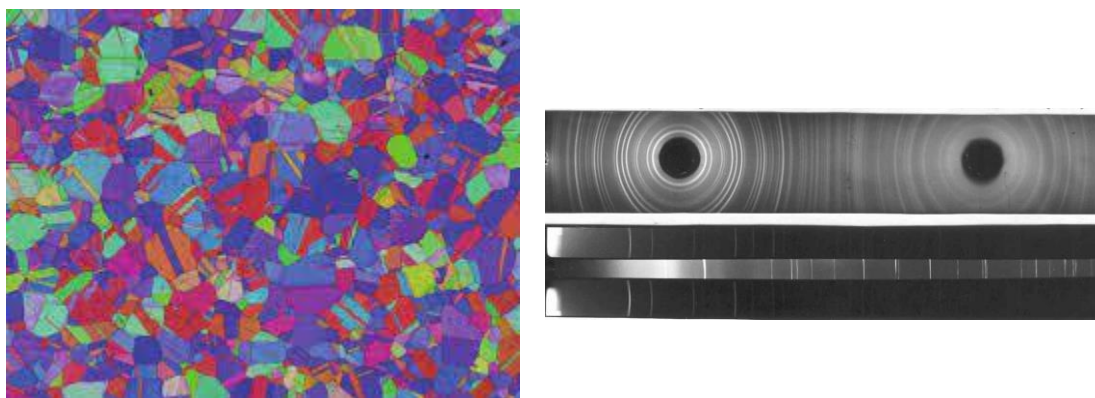
Pro plasticitu je kromě podmínky pohyblivých dislokací, také podmínka alespoň pěti nezávislých skluzových systémů.

2.1.2 Použitá metoda krystalografických analýz

V současnosti se k určení orientace krystalů využívají nejčastěji dvě metody – rentgenová **difrakční metoda** a metoda **difrakce zpětného rozptylu elektronů EBSD**.

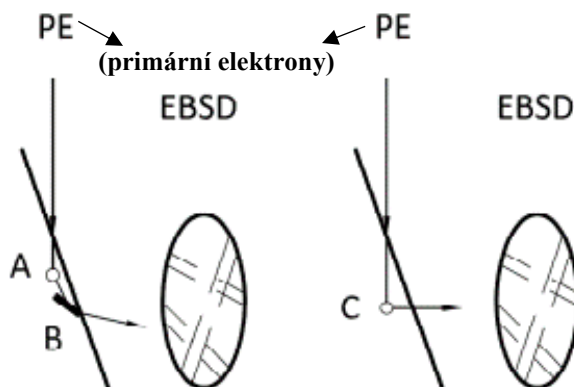
Ke stanovení orientace zrn bylo v této práci využito metody EBSD. Výhodou metody je možnost studia krystalografických parametrů, resp. jejich změn vlivem plastické deformace v přímé vazbě na mikrostrukturu oceli.

Metoda EBSD slouží k vytváření tzv. difrakčních obrazců, kterých je využito při studii krystalografických údajů jako je orientace zrn nebo případné identifikování přítomných fází. Oproti ostatním metodám, jako je například rentgenová difrakce, se primárně využívá pro získání informací z mnohem menší škály studovaných vzorků.



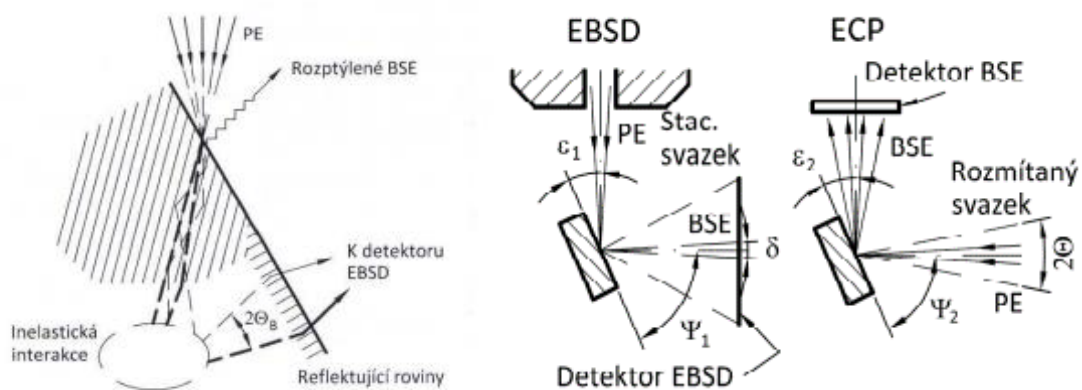
Obrázek 13: Difrakční obrázek EBSD (vlevo), difrakční obrázek RTG (vpravo) [9]

Základní podstata metody EBSD je difrakce. V současné době existují dva modely pohledů na princip metody EBSD, tedy na princip vytváření difrakčních obrazců – model dvou interakcí a model kanálování elektronů (ECP).



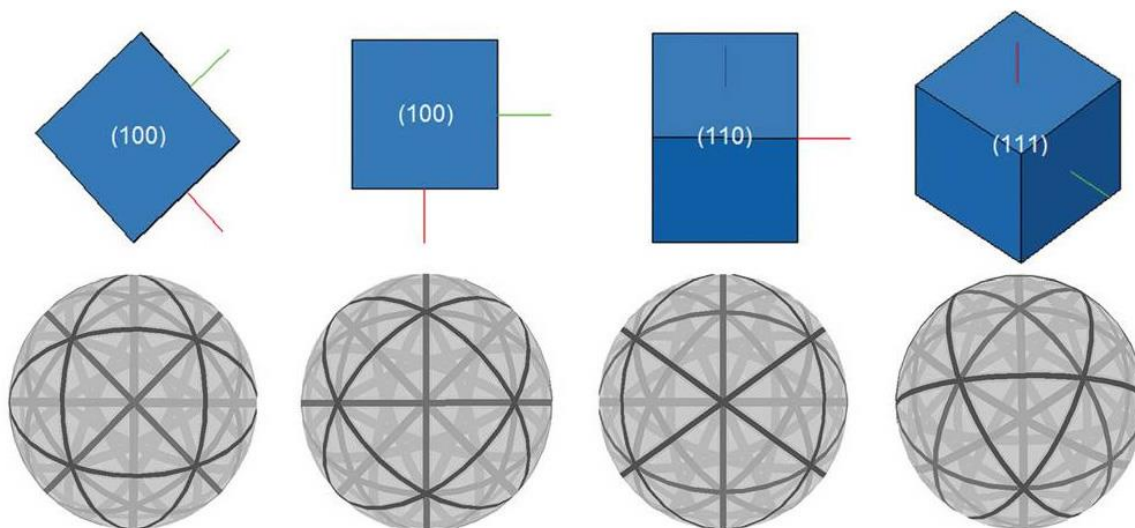
Obrázek 14: Schéma dvou interakcí (vlevo) a kanálování (vpravo) [10]

ECP model funguje na teorému reciprocity (vzájemnému působení) mezi difrakcí zpětně odražených elektronů a obrazci kanálování elektronů. EBSD i ECP vychází z kanálování elektronů (částicové pojetí je postupné procházení elektronů mřížkou) pouze s rozdílem, že uvažujeme opačnou cestu primárních elektronových paprsků (obrázek 15 vpravo). Tím lze vysvětlit, že model kanálování bere metodu EBSD jako posloupnost kanálování primárních svazků elektronů dovnitř vzorku, inelastické interakce (nep pružného rozptylu) a kanálování elektronů ven ze vzorku (obrázky 14 a 15 vlevo). Každá fáze procesu se navzájem ovlivňuje, přičemž za podstatnou, tvořící difrakční jev, se považuje kanálování pomocí kterého je modulována pravděpodobnost nepružných srážek elektronů s atomy krystalu. Rozdílná hustota pravděpodobnosti kombinací Blochových vln (dva typy vln závisující na velikosti úhlu dopadu primárního svazku elektronů) bude udávat pokles nebo nárůst intenzity snímaného signálu oproti jeho průměrné hodnotě na stínítku. [10]



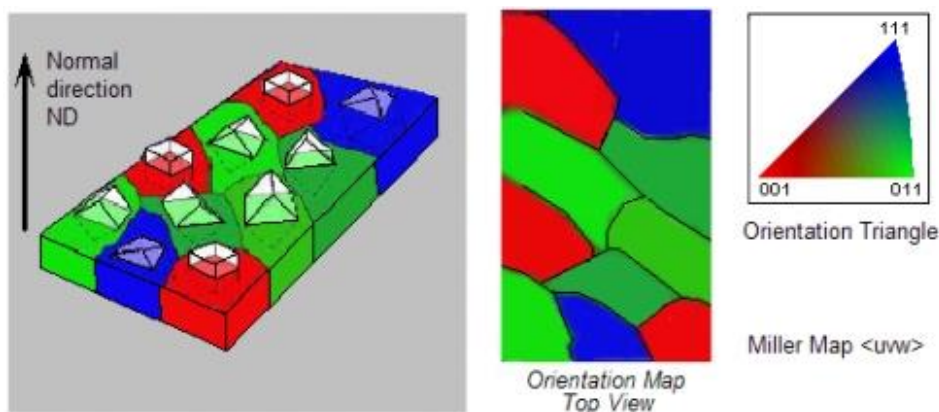
Obrázek 15: Model kanálování elektronů (vlevo), vztah EBSD a ECP (vpravo) [10]

Tvar průsečíku difrakčních rovin na detektoru SEM (případně stínítku) je gnómonická projekce difraktovaných kuželů elektronů. U EBSD je poloúhel difraktovaných kuželů elektronů tak velký, že aproximuje v přímku. Protože je difrakční tvar přímo spojený s krystalovou strukturou vzorku, tak se změnou krystalové orientace se změní i difrakční tvar. Z tohoto důvodu lze využít pozice Kikuchiho linií k výpočtu orientace krystalu v místě, kde elektronový paprsek dopadá na vzorek. Příklady vztahů orientace mřížek a difrakčního tvaru jsou reprezentovány na obrázku 16.



Obrázek 16: Příklady závislosti krystalové orientace na difrakčním vzoru [11]

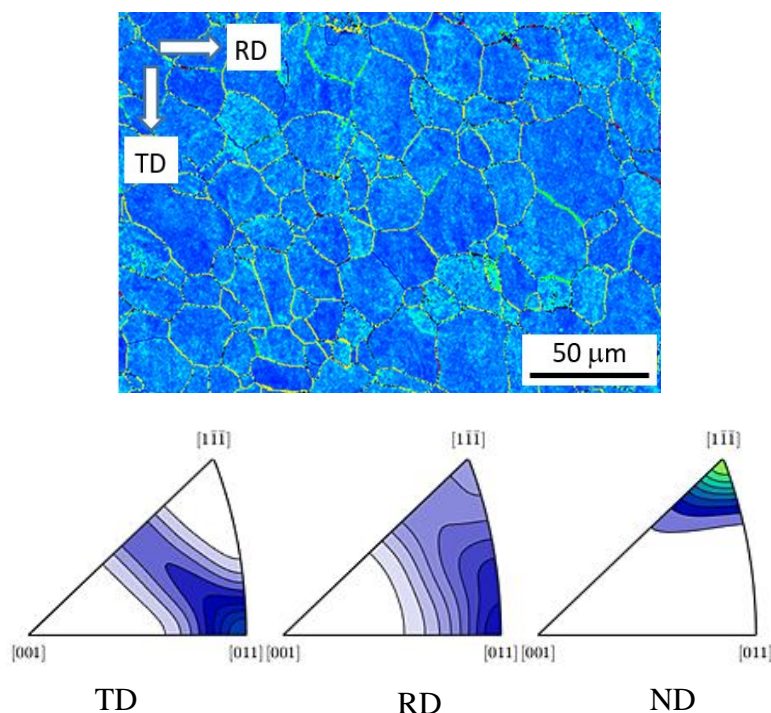
Tento princip je užíván ve většině případů automatického indexování, včetně metod EBSD. Na jeho základě pak skládáme nejběžněji využívané inverzní pólové obrazce a následně jejich mapy.



Obrázek 17: Barevné kódování s inverzní mapou pólových obrazců a orientace mřížky [12]

Na obrázku 17 je vidět grafické znázornění mapy orientace zrn, vč. barevného kódování detekovaných směrů dle Millerových indexů.

Tato mapa poskytuje přehledné rozeznání orientace zrn a sestrojuje se vždy pro jeden konkrétní makroskopický směr. K jednoznačnému určení přednostní orientace ve studovaném vzorku je třeba sestrojit alespoň dvě orientační mapy pro různý makroskopický směr. Například pro válcované plechy tomu může být směr normály plechu ND a směr válcování plechu RD. Jedna mapa slouží pro $\{hkl\}$ povrchové roviny (tj. v případě kubické symetrie směry $\langle hkl \rangle$ kolmé na povrch vzorku) a druhá pro $\langle uvw \rangle$ v referenčním směru povrchu vzorku. Obr. 18 prezentuje misorientaci ve vazbě na stavbu zrn a odpovídající pólové obrazce.



Obrázek 18: Příklad pólových obrazců a mapy; $[hkl]$ značí krystalografický směr [13]

Orientační mapy mohou sloužit rovněž ke znázornění výsledků fázové analýzy hodnocených vzorků, v takovém případě rozdíly orientací zrn nejsou brány v úvahu.

Načítání a zpracování difrakčních obrazců pomocí metody EBSD v SEM probíhá automaticky. V případě zjišťování přednostní textury (orientace zrn) se v programech pro analýzu EBSD volí **makroskopické souřadné systémy s přihlédnutím na významné směry při tváření**. [14]

Vyhodnocení analýzy se volí na základě řešeného problému a obecně jsou dva přístupy:

1. Jsou známy fáze ve vzorku a jejich krystalografická data; primárním úkolem je zjistit krystalografickou orientaci nebo objemový podíl, morfologické parametry, případně distribuci jednotlivých fází zkoumaného vzorku.
2. Nejsou známy fáze ve vzorku – dochází ke komunikaci mezi EBSD a systémem EDX (Energeticky disperzní rentgenové spektroskopie, chemická charakterizace materiálu), potenciální fáze se vyhledávají v krystalografické databázi a tím se omezí kandidátský výběr pro zkoušejícího, který posoudí stupeň shody detekovaných a systémem vybraných fází. Přínosem je soubor dat, ve kterém jsou zaznamenávány přednostně informace o kartézských souřadnicích pixelu v rámci analyzované oblasti, Eulerovy úhly pixelu, fáze pixelu, index spolehlivosti interpretace difrakčního obrazce, pomocné parametry (např. IQ – image quality, rozlišení obrazu) a polohy, intenzity píku v Houghově prostoru.

EBSD analýza v sobě nese hned několik možných informací (úhly mezi difrakčními pásy, šířka difrakčních pásů, gradient jasu na hranici difrakčních pásů, kontrast difrakčních pásů vůči pozadí, průsečíky difrakčních pásů). Na základě těchto znalostí a indexování difraktogramů (automatická detekce Kikuchiho linií Houghovou/Radonovou transformací) je možné interpretovat závěry analýzy EBSD, mezi nejdůležitější patří: [14]

- orientace krystalů v souřadném systému vzorku,
- dezorientace krystalů (stejná jako orientace ale definována vůči „cizímu“ souřadnému systému),
- detekce virtuálního „zrna“ (za určitých podmínek sdružené pixely),
- pólové obrazce (sumarizuje přednostní orientaci ve studovaném materiálu),
- inverzní pólové obrazce (závislost zvoleného směru vzorku ke směrům dané krystalové soustavy zakreslené do základního stereografického trojúhelníku),
- mapa inverzního pólového obrazce (přiřazení barvy oblastem stereografického trojúhelníku, tak že každý sledovaný pixel má svou unikátní barvu podle polohy průmětu základní osy zvoleného makroskopického směru v inverzním pólovém obrazci)

2.1.3 Mechanismy zpevnění, vlivy na plasticitu

Pevnost je schopnost materiálu trvale odolávat vnějším silám bez porušení soudržnosti částic. Je úzce spjatá s plastickou deformací a její fyzikální podstata pramení z vytváření (zanikání) a pohyblivosti krystalografických poruch (zejména dislokací). Z řady známých modelů zpevnění kovů zde budou popsány jen základní mechanismy zpevnění:

1. deformační zpevnění,
2. disperzní, precipitační zpevnění,
3. zpevnění hranicemi zrn.

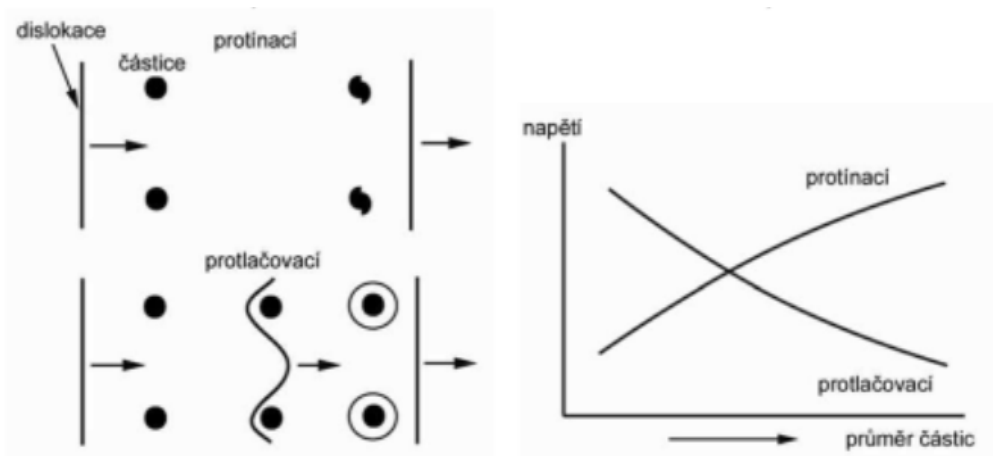
Ad 1) Deformační zpevnění

Podstata je ve zvyšování celkové hustoty dislokací vlivem činnosti zdrojů (nejčastěji je tímto zdrojem Frank-Readův zdroj) a při určitém stupni plastické deformace již není volný pohyb dislokací možný → jednotlivé dislokace si navzájem začnou překážet ve skluzovém pohybu, který se stává z tohoto důvodu čím dál obtížnějším a dalším nárůstem plastické deformace dochází ke změně mechanických vlastností (mez kluzu zaznamenává výrazněji větší růst než mez pevnosti).

Ad 2) Disperzní, precipitační zpevnění

Probíhá za přítomnosti legujících prvků, nebo precipitátů. Legující prvky v tuhém roztoku (ať už substitučně nebo intersticiálně) představují bodové poruchy vyvolávající ve svém okolí pnutí krystalové mřížky. Pokud jsou atomy legujícího prvku větší, dochází vždy k „roztahování“ okolních atomů (u substitučních v případě menších atomů legujícího prvku může docházet ke „smršťování“); to vede k obtížnějšímu skluzu, tedy zpevnění. Nejedná se však pouze o vytváření napětí v okolí bodových poruch, ale i v okolí dislokací. Dochází k tvorbě tzv. atmosfér legujících prvků v okolí dislokací. Dislokace doprovázené těmito shluky mají výrazně těžší pohyb, a tudíž dochází ke zpevnění.

Pokud jsou legující prvky obsažené i v dalších fázích (mimo tuhý roztok), pak tvoří tyto fáze další překážky pro skluz dislokací. To se děje za určitých mechanismů závislých na rozhraních (koherentních, semi-koherentních nebo nekoherentních) fází s tuhým roztokem. Základní dva mechanismy jsou pro informaci znázorněny na obrázku 19. Jedná se o protínací (na obrázku nahoře, který je význačný pro koherentní, semi-koherentní rozhraní) a protlačovací (na obrázku dole, význačný pro nekoherentní rozhraní) mechanismus.



Obrázek 19: Protínací a protlačovací mechanismus [15]

Ad 3) Zpevnění hranicemi zrn

Poslední možností zpevnění je vlivem plošných poruch krystalové mřížky, hranic zrn. Jedná se o místo, kde se mění orientace krystalové mřížky, pro pohyb dislokací je změna orientace mřížky (v případě velkoúhlových hranic zrn) nepřekonatelnou překážkou. S vyšším obsahem ploch hranic zrn (snížením rozměru zrna) dojde k omezení pohybu dislokací, a tudíž ke zpevnění materiálu.

Závislost velikosti zrna a meze kluzu definuje **Hall-Petchův** vztah (2):

$$R_{e,(p0,2)} = \sigma_i + k_y \cdot d^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Kde:

$R_{e,(p0,2)}$... (smluvní) mez kluzu [MPa]

σ_i ... napětí vyjadřující odpor kryst. mřížky proti pohybu dislokací v rámci zrna [MPa]

k_y ... koeficient vyjadřující uchycení dislokací v zrně [–]

d ... velikost zrna [mm]

Tato práce se primárně zabývá vlivem rychlosti deformace (viz „3.1 Popis problému“, zde je deformační rychlost blíže vysvětlena) na anizotropii IF ocelí. Z tohoto důvodu je **nejdůležitější zpevnění deformační**, kdy dochází vlivem zvyšující se deformační rychlosti k nárůstu odporu materiálu proti rozvoji plastické deformace (nedochází k potlačení účinků zpevnění rekrystalizací).

Jako kritérium zpevnění se u standardizovaných zkoušek využívá exponent deformačního zpevnění **n**, vyjadřuje vlastnost materiálu se rovnoměrně plasticky deformovat. V oblasti elasto-plastické deformace vychází ze závislosti skutečného napětí a skutečné deformace (Holomonův vztah):

$$\bar{\sigma} = k \cdot \bar{\varepsilon}_{pl}^n \quad (3)$$

$$n = \frac{\log \bar{\sigma} - \log k}{\log \bar{\varepsilon}_{pl}} \quad (4)$$

Kde:

$\bar{\sigma}$... skutečné napětí [MPa]

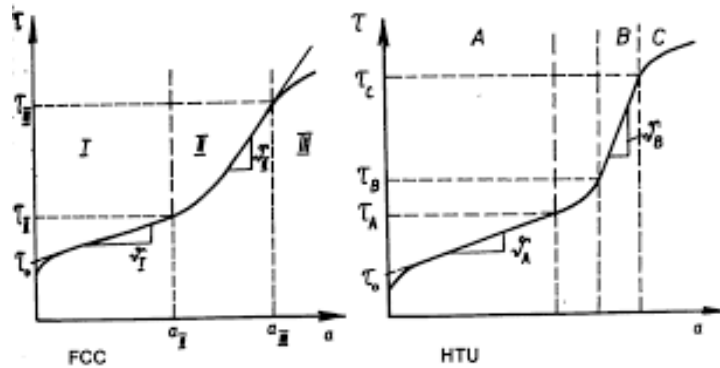
$\bar{\varepsilon}_{pl}$... skutečná deformace [mm]

k ... materiálová konstanta [–]

n ... exponent deformačního zpevnění [–]

Nominální hodnota exponentu deformačního zpevnění **přesahující 0,25** značí **výbornou tvářitelnost**, rozsah **0,215 – 0,25** poukazuje na **dobrou tvářitelnost** a hodnoty **nižší** znamenají **špatnou tvářitelnost**. [16]

Zpevňování při tváření reprezentuje tzv. křivka deformačního zpevnění. Deformační zpevňování **monokrystalu** je rozděleno do tří oblastí a jeho průběh pro dvě základní krystalové mřížky je znázorněn na obrázku 20.



Obrázek 20: Křivky def. zpevnění monokrystalů mřížky FCC (vlevo) a HTU (vpravo) [7]

Oblast I – Dislokace mají snadný skluz (nenarazí na překážky a ani se neprotínají), deformace se děje jedním z jednoduchých mechanismů a téměř stálé deformační napětí má za příčinu nízkou hodnotu zpevnění. Rozměr první oblasti je dán velikostí a orientací zrn nebo obsahem nerozpuštěných příměsí (s vyšším obsahem klesá délka oblasti).

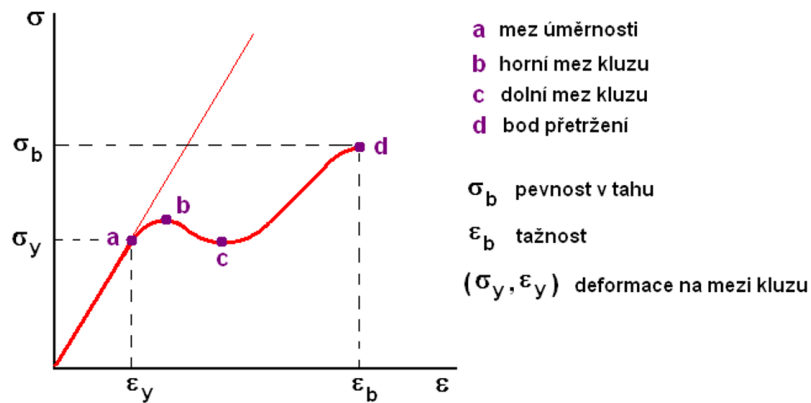
Oblast II – V této oblasti dochází k největšímu zpevnění (exponent deformačního zpevnění dosahuje maximálních hodnot vlivem zvyšování hustoty dislokací a zabraňování jejich volnému pohybu). Křivka je téměř lineární a její sklon nezávisí na napětí ani teplotě.

Oblast III – Dislokace se zvýšeným napětím dávají opět do pohybu příčným kluzem, který tvaruje křivku do parabolického průběhu. Šroubové dislokace dokáží přejít přes překážku do jiné kluzové roviny. Příčný kluz dále způsobuje částečné snížení napětí a anihilaci dislokací.

Tvar křivky deformačního zpevnění **polykrystalů** (obrázek 21) je složitá závislost napětí σ na deformaci v důsledku různých strukturních parametrů (velikost a orientace zrn, textura, rozdělení a koncentrace příměsových atomů, typ struktury, ...). V kinetické rovnici křivky se udává i závislost teploty T a rychlosti plastického tečení $\dot{\epsilon}$, viz (5). Probíhají zde stejné mechanismy deformačního zpevnění jako u monokrystalů s podstatným vlivem velikosti zrna, který je dán již uvedeným Hall-Petchovým vztahem (2).

Kinetická rovnice:

$$\sigma = \sigma(S, \dot{\epsilon}, T) \quad (5)$$



Obrázek 21: Křivka deformačního zpevnění polykrystalu [17]

2.2 Plastická a plošná anizotropie

Jak bylo již řečeno **normálová (plastická) anizotropie** je typickým parametrem, který využívají předmětné IF-oceli. Jedná se o nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu k mechanickým vlastnostem v linii kolmé na povrch plechu (tloušťce). Kvantitativně se stanovuje pomocí parametru \bar{r} (střední hodnotou normálové anizotropie) a se zvyšující se hodnotou se vylepšuje tváritelnost materiálu. Hodnoty \bar{r} pro oceli určené pro hlubokotažné účely by měly být alespoň cca 1,8.

Stanovení součinitele plastické anizotropie popisuje norma ČSN ISO 10113: Kovové materiály – Plechy a pásy; součinitel definuje jako poměr:

$$r = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_t} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \quad (6)$$

Kde:

r ... součinitel normálové anizotropie [–]

ϵ_b ... logaritmická deformace ve směru šířky [–]

ϵ_t ... logaritmická deformace ve směru tloušťky [–]

b ... šířka zkušební vzorku po deformaci na předepsaném prodloužení [mm]

b_0 ... původní šířka zkušební vzorku [mm]

t ... tloušťka zkušební vzorku po deformaci na předepsaném prodloužení [mm]

t_0 ... původní tloušťka zkušební vzorku [mm]

S ohledem na skutečnost, že měření tloušťky vzorku během zkoušky může být značně složitě a nepřesné lze za předpokladu stálosti objemu upravit vzorec (6) na (7). [18]

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{L_0 \cdot b_0}{L \cdot b}} \quad (7)$$

Kde:

L ... délka zkušební vzorku po deformaci na předepsaném prodloužení [mm]

L_0 ... původní délka zkušební vzorku [mm]

Plasticita závisí i na směru válcování plechu, popisu tvárnosti je tedy do vyhodnocování zavedena tzv. **plošná anizotropie**. Plošná anizotropie definuje nestejnou fyzikálních, mechanických vlastností materiálu v rovině tabule plechu vzhledem k význačnému směru tváření. Její původ je v krystalografické a strukturní textuře, která se odvíjí od metalurgických podmínek zhotovení výrobků.

Zjišťování plošné anizotropie probíhá pomocí standardních tahových zkoušek pod různými úhly (0° , 45° a 90°) k směru válcování vzorku. Poloha vzorků při tahové zkoušce, samotná tahová zkouška a všechny potřebné zařízení včetně postupů podléhají platným normám. Vzorec pro vyčíslení plošné anizotropie je uveden pod číslem (8). [19]

$$\Delta r_\alpha = \frac{R_{p0,2}(\alpha) - R_{p0,2}(0^\circ)}{R_{p0,2}(0^\circ)} \quad (8)$$

Kde:

α ... zvolený úhel vzhledem ke směru válcování [$^\circ$]

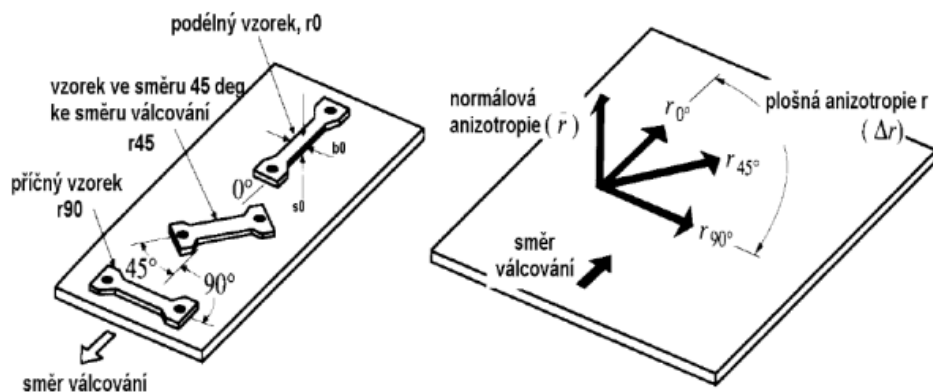
0 ... úhel rovnoběžný ke směru válcování [$^\circ$]

Δr_α ... plošná anizotropie při zvoleném úhlu α [–]

$R_{p0,2}(\alpha)$... smluvní mez kluzu při zvoleném úhlu α [–]

$R_{p0,2}(0)$... smluvní mez kluzu při rovnoběžném směru ke směru válcování [–]

Plošná anizotropie nepříznivě ovlivňuje přesnost rozměrů hlubokotažných výrobků. Při tváření osově souměrných výtažků zapříčiňuje vznik cípů na vnějším okraji. Plošná a normálová anizotropie, spolu s orientací vzorků vzhledem ke směru válcování, je na obrázku (22).



Obrázek 22: Plastická a plošná anizotropie s ohledem na směr válcování [19]

Z výše uvedeného důvodu se pro hodnocení tváritelnosti definuje střední hodnota součinitele plastické anizotropie \bar{r} a stupeň plošné anizotropie Δr :

$$\bar{r} = \frac{(r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90})}{4} \quad (9)$$

$$\Delta r = \frac{(r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90})}{2} \quad (10)$$

Kde:

\bar{r} ... střední hodnota součinitele plastické anizotropie [–]

Δr ... stupeň plošné anizotropie [–]

r_0 ... anizotropie rovnoběžná se směrem válcování plechu [–]

r_{45} ... anizotropie zjištěná při pootočení o 45° se směrem válcování plechu [–]

r_{90} ... anizotropie kolmá se směrem válcování plechu [–]

Stupeň plošné anizotropie se hodnotí na základě výsledků do tří kategorií:

- $\Delta r > 0$ – značná tvorba cípů v rovnoběžném a kolmém směru na směr válcování plechu
- $\Delta r < 0$ – značná tvorba cípů ve směrech pootočených o úhel +45° a –45° na směr válcování plechu
- $\Delta r = 0$ – nedochází k tvorbě cípů

Souhrnně platí, že vysoká (střední) hodnota součinitele plastické anizotropie a nízká hodnota (stupně) plošné anizotropie je potřeba k zajištění dostatečné tváritelnosti. [19]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY REFERENČNÍHO TYPU IF OCELI

V této kapitole bude představena metodika testování **referenčních** vzorků IF oceli, tj. návrh experimentu, provedení a vyhodnocení záznamů zvolených zkoušek, strukturní a krystalografické analýzy a v závěru bude věnována pozornost tzv. „bottleneckům“ (úskalím) prezentovaného řešení a doporučení pro jejich budoucí eliminaci. Všechny tyto body mohou sloužit k budoucímu zlepšení postupu měření nebo k jejímu zautomatizování pro snadnější aplikaci.

3.1 Popis problému

Protože výlisky mají velmi často komplexní tvar, v místech ohýbání dochází k větší koncentraci napětí. Kondice materiálu, která je spojena s vyčerpáním plasticity je pak označována jako **mezní stav**. Pokud nedokážeme zaručit, že nebude docházet k dosahování zmiňovaného stavu (v praxi se toho docíluje předdimenzováním konstrukčního prvku, to má za nevýhodu nadměrné zatěžování ostatních součástí, neekonomičnost nebo v případě nepředimenzování snížení bezpečnosti v provozu), je potřeba experimentálně stanovit „zbytkovou“ plastickou kapacitu materiálu, a to ideálně přímo ve výrobě. To by totiž umožnilo třídění vyrobených součástí v reálném čase, a tím zpřístupnění možnosti dimenzovat strojní součásti na hranici únosnosti při zachování bezpečnosti.

Se zmíněnou ekonomickou stránkou souvisí i rychlost lisování, která určuje **deformační rychlost materiálu** a jsou na ní závislé mechanické vlastnosti materiálů. Většina materiálů reaguje na vyšší deformační rychlost zpevněním, které nazýváme „dynamické zpevnění“. Při vyšší rychlosti lisování vzrůstá pevnost, ale zároveň klesá tažnost, které snížení limitně vede ke vzniku mikrotrhlin. Deformační rychlost představuje poměr mezi rychlostí pohybu nástroje a deformované délky:

$$w = \frac{v_n}{k} \quad (11)$$

Kde:

w ... *deformační rychlost* [s^{-1}]

v_n ... *rychlost nástroje* [$m \cdot s^{-1}$]

k ... *deformovaná délka vzorku* [m]

POZN.:

Dle autora práce [20] lze odvodit (celé odvození viz zmiňovaná práce str. 68-69):

$$w = d \left(\frac{dl}{dt} \right) \cdot \frac{1}{l} = \frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{dl}{l} \right) = \frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} \quad (12)$$

A uvažujeme-li reálnou tahovou zkoušku, při níž má zkušební vzorek deformovanou délku k , lze psát:

$$w = \dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\frac{dk}{k}}{\frac{dt}{k}} = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{dk}{dt} \right) \quad (13)$$

kde $\left(\frac{dk}{dt} \right)$ je rychlost v_n čelistí zkušebního stroje.

Výchozí navrženou metodou pro zjištění mezního stavu deformace byla kontrola stavu materiálu z hlediska iniciací mikrotrhlin při konkrétní redukci tloušťky plechu. Záměrem bylo rozlišit stavy „defektní“ (jsou detekovány trhliny) a „akceptovatelný“ (nejsou detekovány trhliny) a to za různých rychlostí deformace. Samozřejmostí by pak měla být univerzálnost měření pro co možná největší škálu materiálů i výlisků.

Nabízející se řešení je stanovení limitní tloušťky výlisků po přepočtu nominální hodnoty změřené tloušťky na tzv. ekvivalentní poměrnou deformaci. Nejdříve je potřeba stanovit poměrné deformace v jednotlivých směrech souřadného systému vzorku, při tom je nutné využít určitých zjednodušení, které nám pomohou stanovit vztah pro jejich určení. Prvním zjednodušením je možnost zanedbat elastickou složku přetvoření (to je možné, protože se zde vyskytují extrémně velké deformace, zapříčiňující již vzniklý lom). Dále je pak využito předpokladu izochorické (za stejného objemu) plastické deformace a poslední podmínkou je rovinné napětí ve středu šířky vzorku.

Pro určení poměrného prodloužení se kromě známého výrazu $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ využívá i diferenciální tvar vzorce $de = \frac{dl}{l}$, který popisuje okamžitý stav přetvoření a charakterizuje tzv. přirozené prodloužení e .

Pro zjištění hodnoty přirozeného prodloužení vztah integrujeme:

$$e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \left| \frac{l}{l_0} \right| \quad (14)$$

Kde l je okamžitá délka a l_0 je původní délka.

POZN.:

Je tedy možné dosadit za okamžitou délku jako součet její změny Δl a původní délky l_0 :

$$e = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \rightarrow e = \ln(1 + \varepsilon) \quad (15)$$

Při malých číslech přetvoření (málo deformace) vyplývá, že podle pravidel počítání s malými čísly se srovnáním relativního a přirozeného prodloužení dopouštíme minimální chyby a tedy:

$$e \sim \varepsilon$$

Po dosazení do vztahu pro poměrnou změnu objemu a za předpokladu stálosti objemu platí:

$$\ln(1 + \varepsilon_1) + \ln(1 + \varepsilon_2) + \ln(1 + \varepsilon_3) = 0$$

~

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0$$

Tento postup je hojně využíván při výpočtech značně rozvítých plastických deformací (jako je například lom součásti). Hlavní výhodou je jeho přesnost oproti výpočtu pomocí poměrné změny objemu, kde je nutné zanedbat součiny poměrných prodloužení.

V našem případě, v jednotlivých směrech zatížení s použitím vztahu (14) pak můžeme psát: [21, 22]

$$\varepsilon_{xx} = \ln \left(\frac{t_0}{t} \right) \quad (16)$$

$$\varepsilon_{zz} = \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (17)$$

$$\varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx} = 0 \quad (18)$$

Kde:

t_0 ... původní tloušťka vzorku [m]

t ... tloušťka sledované oblasti porušeného vzorku [m]

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$... poměrné deformace jednotlivých směrů [-]

Samotné vyhodnocování poměrné deformace v každém směru (ose) by však bylo velmi složité, proto je nutné zavést zmíněnou ekvivalentní poměrnou deformaci. Při zanedbání elastické deformace a za předpokladu izochorické plastické deformace společně s plošným zatížením přesně ve středu vzorku se využívá Von Misesova vztahu pro určení vztahu ekvivalentní poměrné deformace: [21, 22]

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2 \cdot \varepsilon_{xy}^2)} \quad (19)$$

Kde:

$\bar{\varepsilon}$... ekvivalentní poměrná deformace [-]

Následným dosazením vztahů (16) až (18) do (19) a jednoduchou úpravou získáme finální vzorec pro $\bar{\varepsilon}$:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{t_0}{t} \quad (20)$$

Druhá proměnná, která ve spojení s výše zmíněnou hodnotou poslouží k určení stavu výlisku, je vzdálenost od lomu zkoumaného referenčního vzorku.

Na základě analýzy obsahu trhlin v jednotlivě rozdělených sekcích v ose x referenčního vzorku bude možné stanovit mezní hodnotu poměrné deformace. Princip experimentu je tedy sledování tloušťky (poměrné deformace) v kritických oblastech výlisku. Poté na základě přepočtené hodnoty z hodnoty změřené a jejího porovnání vůči parametru (vzdálenost v ose x od lomu, která značí výskyt trhlin) z analýzy referenčního vzorku lze definovat mezní stav. Následně je studována intenzita deformačního zpevnění a lokalizace deformace.

3.2 Návrh experimentu, použité metody

Navrhovaný experiment je primárně určen pro hledání závislosti mezního stavu materiálu na rychlosti a lokalizaci deformace. Vzhledem k omezenému počtu vzorků se jednalo zejména o ověření vhodnosti dané metodiky pro konkrétní materiál a podmínky zatížení použitých vzorků.

K zajištění potřebných dat k vyhodnocení bylo využito zkoušek optických a zkoušek indentačních:

- 1) mikro měření pomocí světelného metalografického mikroskopu,
- 2) zkoušky provedené na rastrovacím elektronovém mikroskopu SEM,
 - 2.1) obrazová mikro analýza povrchu řezu materiálu,
 - 2.2) difrakční analýzy (EBSD) a chemické mikroanalýzy (EDX),
- 3) indentační zkoušky.

Ad 1) Mikro měření pomocí metalografického mikroskopu

Měření bylo provedeno pomocí invertovaného optického mikroskopu Neophot 21 s digitální kamerou (CCD) a software pro obrazovou analýzu AnalySiS DOCU Olympus. Důležité je optimální nastavení optiky, protože volené parametry se navzájem ovlivňují a jejich volba má pak přímý vliv na validitu obrazové analýzy. Pořízena je série fotografií s překrytím a složena do jednoho snímku pomocí grafického editoru. Tento snímek je poté integrovaným měřicím nástrojem podroben rozboru. Výsledkem měření má v tomto případě být dosah deformace, tj. závislost tloušťky na vzdálenosti x od lomu v určitých po sobě jdoucích intervalech u referenčního vzorku. Výsledné rozlišení koláže je dáno superpozicí všech původních fotografií, tudíž nedochází k poškození kvality obrazové analýzy vlivem skládání.

Ad 2) Zkoušky provedené na rastrovacím elektronovém mikroskopu SEM

Důvodem použití je schopnost topografické analýzy s vysokým rozlišením, které bylo nutné pro detekci iniciace mikro-defektů vlivem tváření. Provedeny byly následující rozborů:

Ad 2.1) Obrazová mikro analýza povrchu řezu materiálu

Provedené mikro analýzy materiálu jsou v podstatě stejného principu jako uvedené mikro měření na metalografickém mikroskopu, ale ve větších detailech, včetně obrazové analýzy. Schopnost integrovaného softwaru provádět délkové měření přímo na fotografii je stěžejní nejen pro stanovení míst potřebných k pořízení obrazů povrchu, ale i k jednoznačnému určení intervalů pro obrazovou analýzu, která probíhá v externím programu a funguje na principu binarizace obrázku do dvou barev. K tomu využívá škálu RGB, kdy pomocí rozřazení barev uživatelem, tzv. „thresholdingu“, přiřazuje jednotlivé pixely buď do první nebo druhé fáze, následuje automatické vyhodnocení jejich procentuálního a obsahového poměru. Jednou z možností je přidání i třetí fáze, která může sloužit jako pomocná k určování vyskytující se nežádoucí analyzované složky (okolní prostředí, ...) - tzv. „color coding“.

Výstupem tohoto rozboru je informace o obsahu trhlin v jednotlivě stanovených intervalech vzdáleností od lomu v podélné ose vzorku.

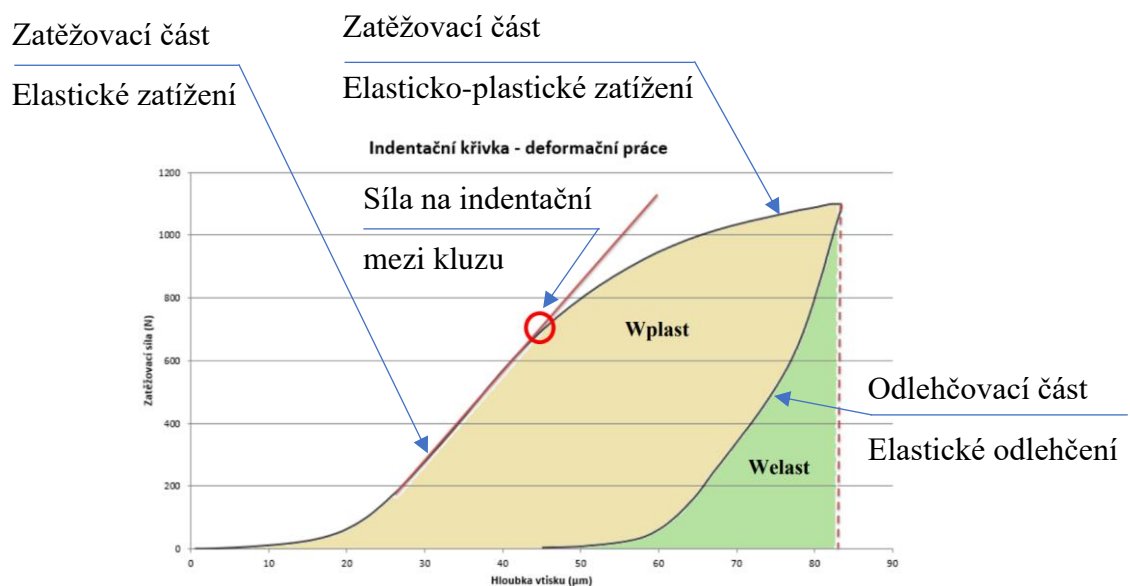
Ad 2.2) Metoda EDX (EDS)

Provedeny byly analýzy pomocí energiově-dispersní rentgenové spektroskopie, pro kvalitativní a semi-kvantitativní analýzu chemického složení.

Jejím základem je detekce charakteristického rentgenového záření (rentgenová emise) vydávaného vzorkem při dopadu elektronového paprsku. Výhodou rentgenového záření v porovnání se sekundárními, Augerovskými a zpětně odraženými elektrony je únik z větší hloubky materiálu, toho se zejména využívá pro metodu měření složení objemu. Naopak nevýhodou využití EDS je neschopnost detekce lehčích prvků než Beryllium (zejména H, Li, ...) a překrývání čar různých prvků, které je obzvlášť patrné v případě čar vznikajících při přechodu elektronů z různých energetických slupek. [23,24]

Ad 3) Instrumentovaná zkouška (indentační zkouška)

Toto měření využívá záznam indentační křivky, jedná se o záznam působící síly na indentor vůči hloubce jeho vtisku do měřeného materiálu. Indentační křivka rozlišuje zatěžovací a odlehčovací část; zatěžovací křivka se skládá z elastické i plastické části a dokumentuje tak nejen elastickou ale i elasto-plastickou deformaci, zatímco odlehčovací část je považována pouze jako odezva elastická (platí pro dále používaný válcový indentor).



Obrázek 23: Indentační křivka [25]

Kromě znázorněné práce jednotlivých odezev zatížení W_{plast} , W_{elast} (obsahy pod křivkami zatěžovací/odlehčovací oblasti) je možné ze záznamu získat tzv. síla na indentační mezi kluzu F a je udávána v [N], s uvažováním plochy podstavy vtlačovaného válce získáváme indentační mez kluzu. Tato mez kluzu neodpovídá mezi kluzu ze standardní tahové zkoušky. K získání potřebné meze kluzu (odpovídající charakteristice meze kluzu z tahové zkoušky) vycházíme z hypotézy chování materiálu při vtlačování tělesa, vyjádřeného Henckeho koeficientem (viz vztah 21). Základní hypotézou je odezva materiálu na základě skluzových čar a vtlačovaným tělesem je válcový indentor.

$$\frac{F}{S} = k_H \cdot R_{es} \quad (21)$$

Kde:

F ... síla na indentační mezi kluzu [N]

S ... obsah plochy podstavy vtlačovaného válce (indentoru) [mm^2]

k_H ... Henckeho koeficient (pro válcový indentor se rovná 2,57) [–]

R_{es} ... skutečná mez kluzu [MPa]

Následně byla použita korekce podle meze kluzu, zjištěné z tahové zkoušky:

$$R_e = R_{es} \cdot k_{TD} \quad (22)$$

Kde:

R_e ... mez kluzu odpovídající tahové zkoušce [MPa]

k_{TD} ... koeficient obdrženy dle tahové zkoušky [–]

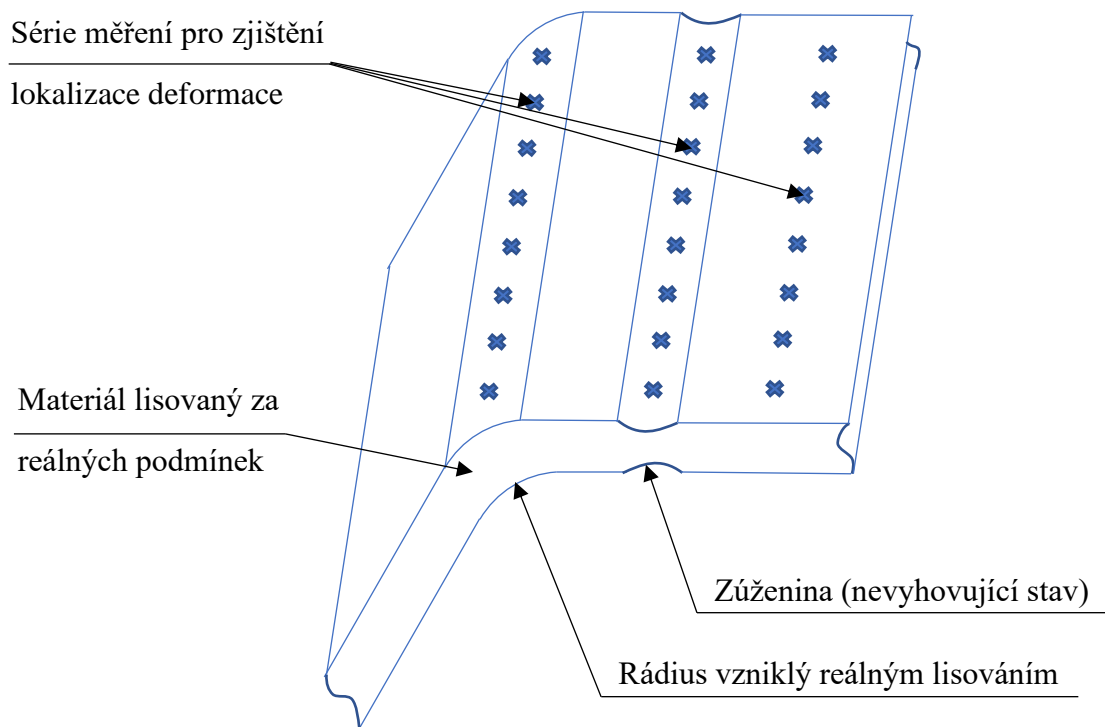
$$k_{TD} = \varnothing R_{eTD} \cdot \varnothing R_{esN} \quad (23)$$

Kde:

$\varnothing R_{eTD}$... průměrná hodnota meze kluzu z tahové zkoušky ve směru TD [MPa]

$\varnothing R_{esN}$... průměrná hodnota skutečné meze kluzu nelisovaného vzorku [MPa]

Cílem tohoto měření je vyhodnocení intenzity deformačního zpevnění a lokalizaci deformace. Intenzita deformačního zpevnění bude zjištěna pomocí posouzení indentačních výsledků mezi vzorkem před reálným tvářením proti vzorku po tvářením odebraném přímo z analyzovaného výlisku. Druhá zjišťovaná charakteristika bude měřena na základě několika měřících linií tvrdosti přes šířku vzorku. Schéma měření znázorňuje obrázek 24.



Obrázek 24: Schéma měření lokalizace deformace

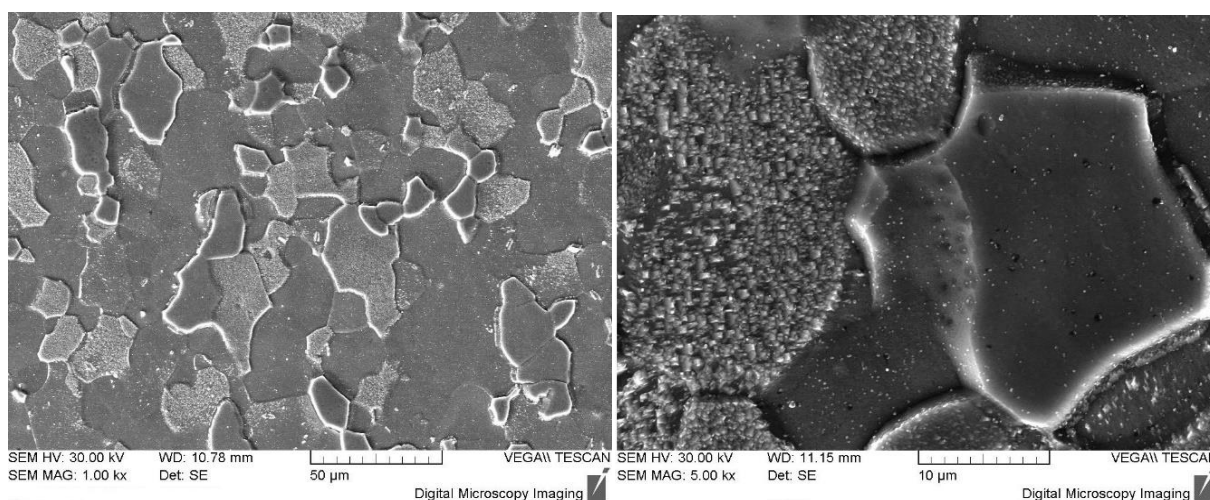
3.3 Výchozí charakteristika testované oceli

Pro experimenty vykonávané v této práci je využito IF oceli s označením třídy HX180 BD (+Z100) MBO podle normy EN 10346:2015. Použitá ocel je dodávaná jako oboustranně zinkovaný plech s tloušťkou povrchové úpravy 0,65 μm . Použitá úprava povrchu byla provedena pomocí vysokoteplotního ponorného galvanického procesu (kataforéza) s poměrným obsahem povrchového nánosu v lázni 100 g/m^2 a jemně krystalizovaným bezolovnatým zinkem pro minimalizaci efektu třpytu za účely splnění vizuálního požadavku. Po zpracování válcováním za studena je použito kontinuálního žihání. V matici plechu je pro vynikající lisovatelnost dosaženo anizotropie struktury $\langle 111 \rangle // \text{ND}$ (normal direction, normálový směr plechu).

Finální mechanické vlastnosti jsou ovlivněny dynamickým BH efektem, který je použitelný pro tuto třídu ocelí. Velmi malé množství uhlíku (10-20 ppm) je záměrně volně drženo v matici po finálním žhání. Vysokoteplotní stárnutí volného uhlíku je použito při zhruba 180 °C po dobu 20 minut. Tak malé množství uhlíku nezhoršuje tváritelnost materiálu o podstatnou hodnotu, zatímco příznivě ovlivňuje mez kluzu při BH efektu po lakování. Chemické složení plechu je uvedeno v tabulce 1, charakteristická mikrostruktura je zobrazena na obrázku 25 a mechanické vlastnosti materiálu jsou sepsány v tabulce 2. Analýzy mikrostruktury a zjištění chemického složení bylo pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM, TESCAN VEGA 5130SB) společně s energeticky disperzní rentgenovou spektroskopií (EDS, Bruker Quantanox 200). Tahová zkouška pro zjištění mechanických vlastností byla provedena a zaznamenána na trhacím stroji ZWICK/Roell Z030/TH2A vybaveném interním zatěžovacím systémem a měřícími extenzometry pro zaznamenání deformace v podélném a příčném směru při 50 Hz firmy ZWICK/Roell. Jednotlivé význačné směry při tváření a geometrie vzorku jsou zobrazeny na obrázku 26 a všechny hodnoty uváděné v tabulkách jsou reprezentovány **průměrnou hodnotou tří testovaných vzorků**. [13]

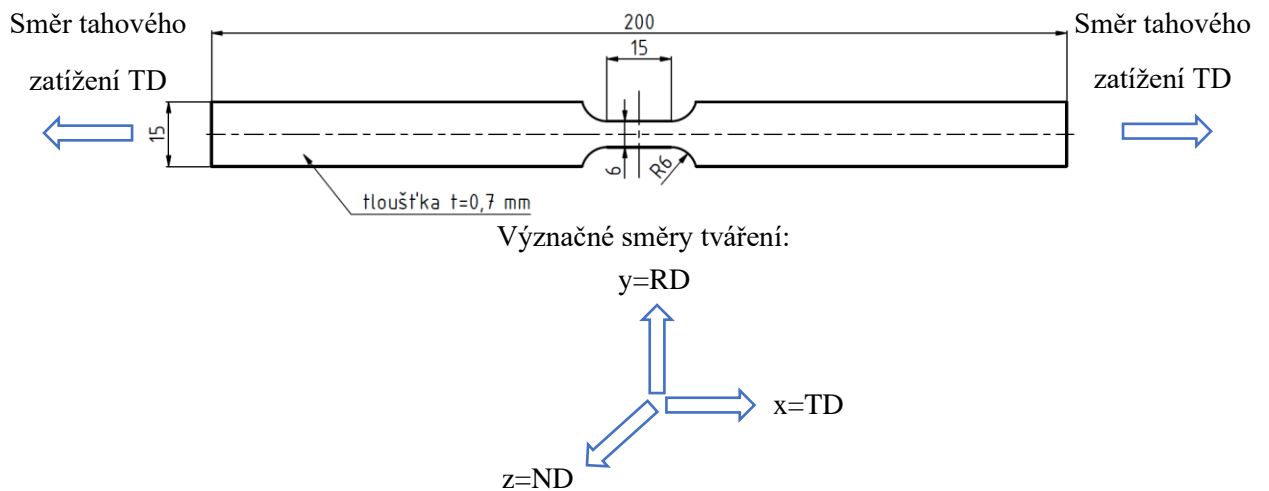
Tabulka 1: Chemické složení analyzovaného plechu [13]

	Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti
Obsah [%]	Zůstatek	0.0018	0.11	0.024	0.0062	0.0076	0.033	0.036	0.026	0.051	0.056



Obrázek 25: Charakteristická mikrostruktura IF oceli v počáteční fázi [13]

Zkoumaná plocha vzorku byla v rovině y-x (kolmo k ND, viz obrázek 26) a byla připravena pomocí broušení, papírem o zrnitosti 2500 s následným leštěním 133 a 1 µm diamantovým kotoučem. Konečnou úpravou, chemickým plošným (místo interkrystalického) leptáním 4 % Nitalem, byla zviditelněna typická čistá feritická struktura s minimálním obsahem precipitátů a nízkou hodnotou inkluzí (zejména TiN(C)), značící dobrou metalurgickou kvalitu.



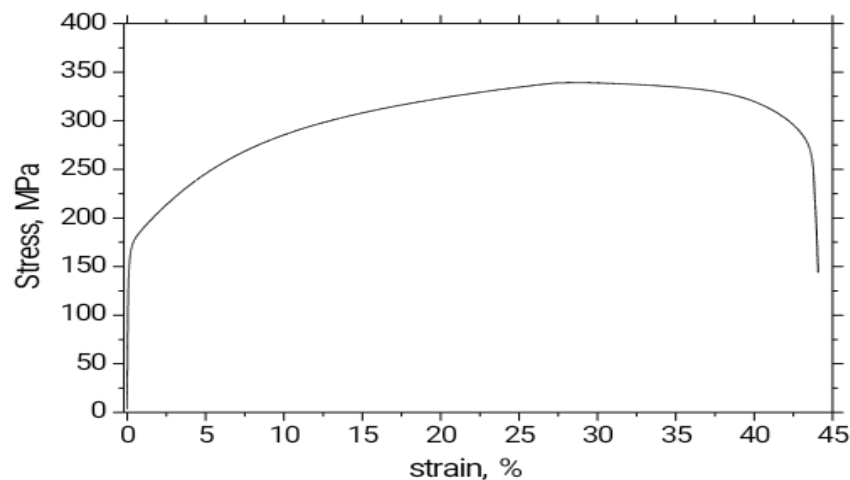
Obrázek 26: Geometrie vzorku pro tahovou zkoušku

Značení jednotlivých směrů příčných vzorků ke směru válcování je znázorněno na obrázku 26. Rozlišujeme tři hlavní směry typické pro standardní tahové zkoušky:

- X = TD (transverse direction) – příčný směr, rovnoběžný se směrem tahového zatížení (tensile load direction)
- Y = RD (rolling direction) – směr válcování plechu, kolmý ke směru tahového zatížení (tensile load direction)
- Z = ND (normal direction) – normálový směr plechu, kolmý ke směru tahového zatížení (tensile load direction)

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti IF oceli ze standardní tahové zkoušky [13]

σ_e [Mpa]	σ_m [Mpa]	A_g [%]	A_{80} [%]	n	r_p
177±8.55	284±1.62	24.62±0.2	43.04±1.01	0.22	1.83



Obrázek 27: Skutečná křivka napětí-deformace předmětné IF oceli [13]

Tahová zkouška byla provedena za pokojové teploty podle standardů EN-10002-1 a vyhodnocena ve zmíněných dvou směrech, podélném (RD) a příčném (TD), viz obrázek 26. Výsledek je zobrazen na obrázku 27 jako kontinuální (bez viditelné meze kluzu), rovnoměrná křivka skutečného napětí na skutečné deformaci význačná pro IF oceli díky jejich plastické anizotropii.

Dále jsou uvedeny jednotlivé zkoušky včetně přípravy vzorků, podmínek a přístrojů, pomocí nichž byly zkoušky realizovány. Všechny dále zmíněné analýzy byly provedeny pro sadu tří **referenčních** vzorků. Tyto vzorky se rozlišují rychlostí při testování tahovou zkouškou na:

- statické
 - rychlost čelistí trhačího stroje $v_n = 0,00003 \text{ m/s} = 1,8 \text{ mm/min}$ ($w \approx 0,002 \text{ s}^{-1}$),
- dynamické
 - rychlost čelistí trhačího stroje $v_n = 5 \text{ m/s}$ ($w \approx 333 \text{ s}^{-1}$),
 - rychlost čelistí trhačího stroje $v_n = 10 \text{ m/s}$ ($w \approx 666 \text{ s}^{-1}$).

3.4 Měření deformací, analýzy mezních přetvoření v závislosti na rychlosti deformace

3.4.1 Příprava vzorků

Na začátku nutno podotknout, že všechny směry (osy), rozměry uváděné dále v této práci jsou v souladu se směry (osami) a rozměry uvedenými na obrázku 26. Pro mikro měření pomocí metalografického mikroskopu bylo použito následujícího postupu:

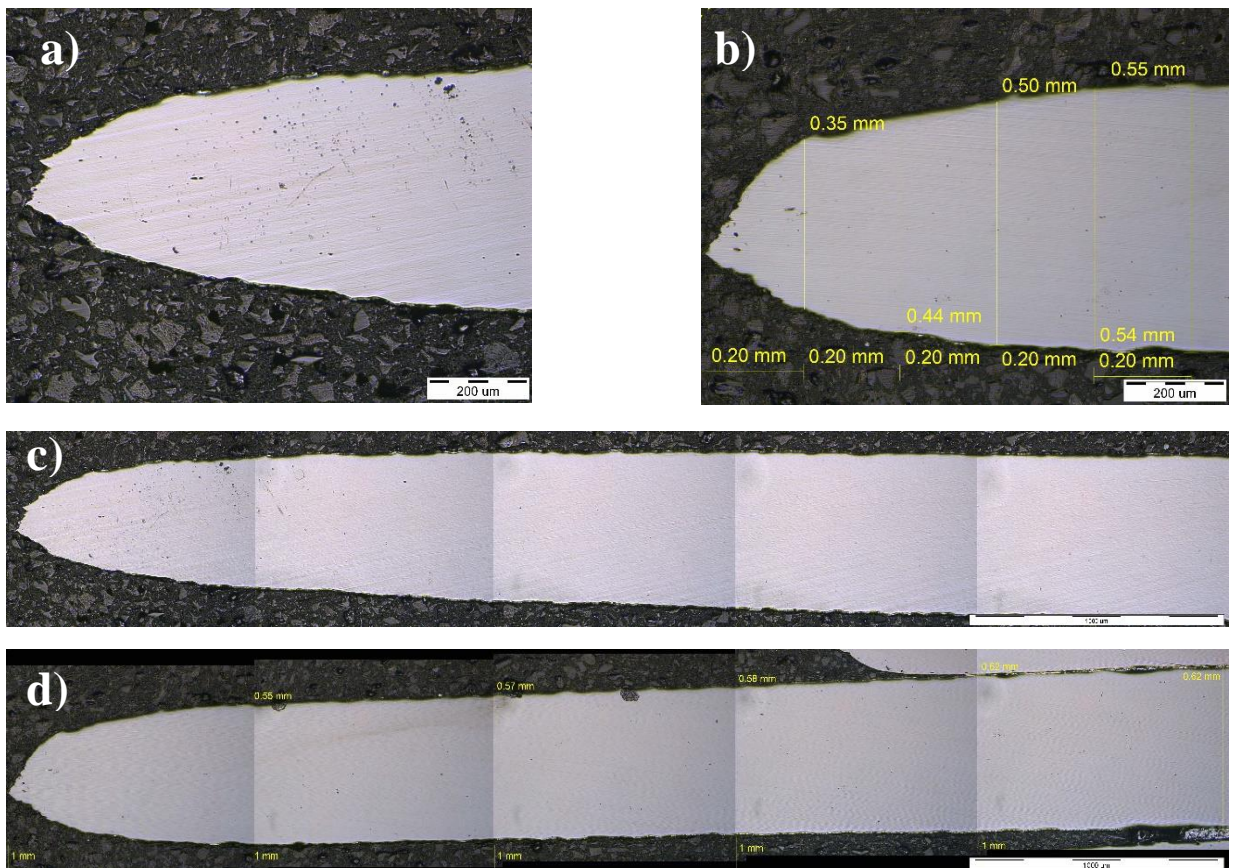
1. Předmětný vzorek byl orýsován a následně mechanicky dělen v podélné ose plechu (rovnoběžnou se směrem X, tedy TD).
2. Následovalo lisování za tepla (pomocí lisu firmy Buehler typu SimpliMet3000) do vodivé prskyřice (fy Struers-Polyfast).
3. Takto zalitý vzorek byl mechanicky broušen na metalografické brusce KOMPAKT 1031 firmy MTH sadou brusných pláten o zrnitosti 240, 600, 800, 1200, 2000
4. Mechanické leštění na leštící brusce BETA s automatickou leštící hlavou VECTOR firmy BUEHLER diamantovou pastou 5-1 μm .

3.4.2 Postup měření na metalografickém mikroskopu

Fotodokumentace pro měření byla pořízena na metalografickém mikroskopu Neophot 32 firmy VEB Carl Zeiss Jena.

Pro potřeby tohoto experimentu bylo zvoleno přiblížení 125x. Pořízena byla série snímků napříč celým vzorkem. K dosažení překrytí pořízených fotografií (tak, aby nedošlo k vytváření „slepých“ míst při analýze) byla fotodokumentace provedena v intervalech 1 mm skrze celou dokumentovanou oblast.

Pro automatické sestavení snímků v dostatečné kvalitě byl použit externí systém pro obrazovou analýzu AnalySIS Docu od firmy Olympus Soft Image Solution. Měření zúžení bylo provedeno v podélné ose vzorků (\parallel TD), v krocích 1 mm směrem od roviny lomu do nedeformované oblasti vzorků. Bohužel kapacitní limity softwaru neumožnily spojit pořízené fotografie přes celou délku vzorku do jedné, a tudíž bylo nutné rozdělit obrazovou analýzu každého referenčního vzorku do pěti na sebe navazujících oblastí se vzájemným překrytím jedné fotografie, tím bylo zamezeno zanedbání jakýchkoliv informací. Příklad pořízené fotografie, koláže a měření je vidět na obrázku 28. Jak je patrné z b), první pořízená fotografie (lomu) byla oproti ostatním vyhodnocena zvlášť na menších intervalech (0.2 mm). Je tomu tak z důvodu zpřesnění měření v důležité oblasti, kde je potřeba co nejpřesnějších výsledků.



Obrázek 28: a) pořízené fotografie, b) měření v oblasti lomu, c) vytvořená koláž, d) měření koláže

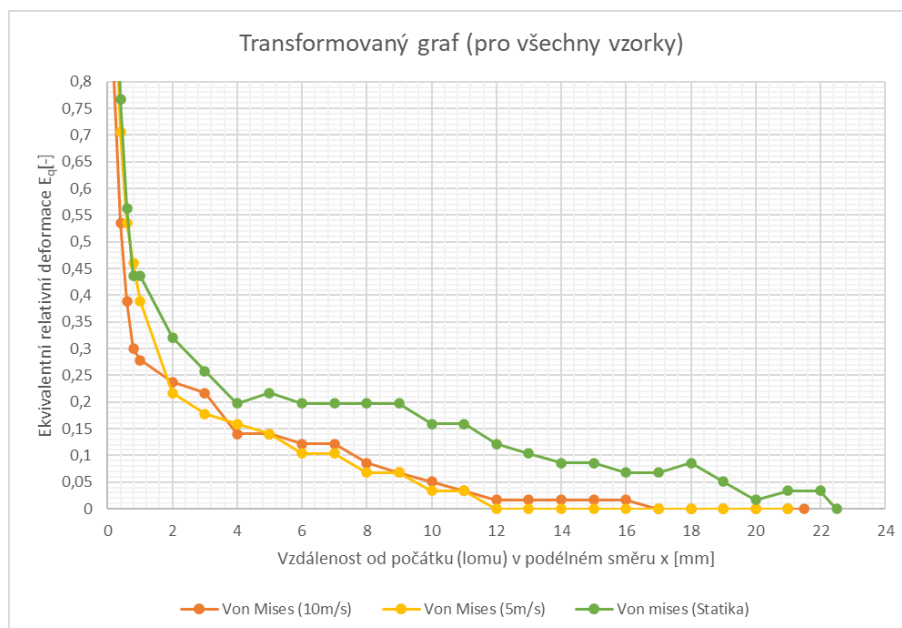
3.4.3 Výsledky měření deformací

Hodnoty deformace (zúžení) vzorků napříč celou jejich délkou (\parallel TD) pro staticky i dynamicky zatížené vzorky jsou zobrazeny v tabulce 3 a v závislosti na vzdálenosti od roviny lomu reprezentovány grafem na obrázku 29.

Tabulka 3: Deformace vzorků s přepočtem na ekvivalentní deformaci

Typ zatížení								
Statika			Dynamika - 5 m/s			Dynamika - 10 m/s		
x (\parallel TD)	y (\parallel ND)	Ekvivalentní deformace dle Von Misese	x (\parallel TD)	y (\parallel ND)	Ekvivalentní deformace dle Von Misese	x (\parallel TD)	y (\parallel ND)	Ekvivalentní deformace dle Von Misese
0	0		0	0		0	0	
0,2	0,24	1,24	0,2	0,29	1,02	0,2	0,35	0,8
0,4	0,36	0,77	0,4	0,38	0,71	0,4	0,44	0,54
0,6	0,43	0,56	0,6	0,44	0,54	0,6	0,5	0,39
0,8	0,48	0,44	0,8	0,47	0,46	0,8	0,54	0,3
1	0,48	0,44	1	0,5	0,39	1	0,55	0,28
2	0,53	0,32	2	0,58	0,22	2	0,57	0,24
3	0,56	0,26	3	0,6	0,18	3	0,58	0,22
4	0,59	0,2	4	0,61	0,16	4	0,62	0,14
5	0,58	0,22	5	0,62	0,14	5	0,62	0,14
6	0,59	0,2	6	0,64	0,1	6	0,63	0,12
7	0,59	0,2	7	0,64	0,1	7	0,63	0,12
8	0,59	0,2	8	0,66	0,07	8	0,65	0,09
9	0,59	0,2	9	0,66	0,07	9	0,66	0,07
10	0,61	0,16	10	0,68	0,03	10	0,67	0,05
11	0,61	0,16	11	0,68	0,03	11	0,68	0,03
12	0,63	0,12	12	0,7	0	12	0,69	0,02
13	0,64	0,1	13	0,7	0	13	0,69	0,02
14	0,65	0,09	14	0,7	0	14	0,69	0,02
15	0,65	0,09	15	0,7	0	15	0,69	0,02
16	0,66	0,07	16	0,7	0	16	0,69	0,02
17	0,66	0,07	17	0,7	0	17	0,7	0
18	0,65	0,09	18	0,7	0	18	0,7	0
19	0,67	0,05	19	0,7	0	19	0,7	0
20	0,69	0,02	20	0,7	0	20	0,7	0
21	0,68	0,03	21	0,7	0	21	0,7	0
22	0,68	0,03				21,5	0,7	0
22,5	0,7	0						

Pro možnost srovnání se vzorky s různou výchozí tloušťkou plechů byly hodnoty deformace převedeny do relativní deformace dle Von Misese (viz kapitola „3.1 Popis problému“, vztah (20)), závislost těchto hodnot na vzdálenosti x od lomu je zobrazena na obrázku 29.



Obrázek 29: Transformovaný graf

Z výsledků vyplývá, že se zvyšující se rychlostí zatížení (rychlostí deformace) roste i lokalizace deformace. To je nevýhoda z hlediska rozvoje deformace a nároků na plastickou kapacitu oceli při tváření.

3.5 Analýzy iniciace defektů v závislosti na intenzitě deformace

3.5.1 Příprava vzorku pro zkoušky na SEM

Pro obrazovou mikro analýzu povrchu materiálu a strukturní analýzy EDS (EDX) byly použity identické metalografické výbrusy jako pro měření deformací. Jedná se tedy o kombinaci mechanického broušení a leštění.

Pro difrakční analýzy (EBSD) bylo potřeba odstranit povrchově deformovanou vrstvu (Beilbyho vrstvu). Konkrétně bylo použito **chemicko-mechanické** úpravy použitím **suspenze koloidní siliky**.

3.5.2 Provedení analýzy povrchu na SEM

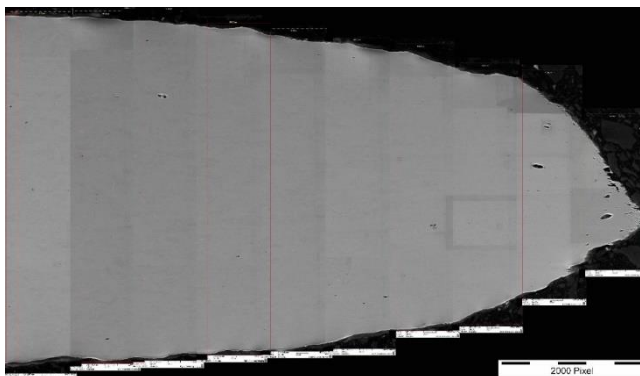
Pro dokumentaci mikro-iniciací nebylo rozlišení světelného mikroskopu dostatečné, k potřebám zkoušek byl využit rastrovací elektronový mikroskop Tescan Vega 5130SB s vlastním programem Tescan Essence™. Zkoumání vad bylo provedeno napříč jejich celým povrchem směrem od roviny lomů do nedeformovaného materiálu.

To bylo zabezpečeno postupným snímáním stavu materiálu o přesné hodnoty v podélném (\parallel TD) i příčném (\parallel RD) směru (v podélném to činí $\sim 100 \mu\text{m}$ a v příčném přes celou šířku vzorku). Pro uskutečněnou analýzu vzorku trhaných dynamicky, rychlostí čelistí 10 m/s bylo nastavení následující:

- Detektor SE (snímání sekundárních elektronů),
- WD – pracovní vzdálenost byla v průběhu měnící se vzdálenosti od lomu taky měněna mezi hodnotami 4,935 až 5,021 mm,
- SEM HV – vysoké napětí mikroskopu zvoleno 30 kV,
- SEM MAG – zvětšení obrazu 2 000 x.

Snímky byly následně upraveny pomocí grafického editoru k potřebám skládání obrazů do série. Pro tento účel, a dále k obrazové analýze fotografií ze SEM, bylo využito stejného externího programu jako při analýze fotografií z metalografického mikroskopu, tedy AnalySIS Docu od firmy Olympus Soft Image Solution. Zde již bylo možné poskládat celou zkoumanou oblast do jednoho výsledného obrazu, který reprezentuje určitou část vzorku, kde je očekáván výrazný pokles vad v důsledku tváření materiálu. Prvotně je předpokládáno, že v této části bude již na konci pouze výskyt vad vzniklých při samotné výrobě plechu. Nutno uvést, že zde nedochází k znehodnocení obrazové analýzy vlivem přidávání dalších fotografií, protože program stále zvyšuje celkové rozlišení s každým dalším přidaným pásem fotografií.

Pro možnost stanovení hranice, kde již nedochází ke vzniku vad v důsledku tváření byl zkoumaný povrch vzorku rozčleněn na pásma šířky $100 \mu\text{m}$ (krom poslední, která skýtala pouze $20 \mu\text{m}$), to umožnilo spojitě vyhodnocení napříč celou zkoumanou délkou vzorku. Červené linie (viz obrázek 30), oddělující oblasti měření, byly nakresleny ve výše zmíněném programu pro analýzu a při samotné analýze byly ignorovány (jejich plocha nezkreslovala výsledek ostatních fází).



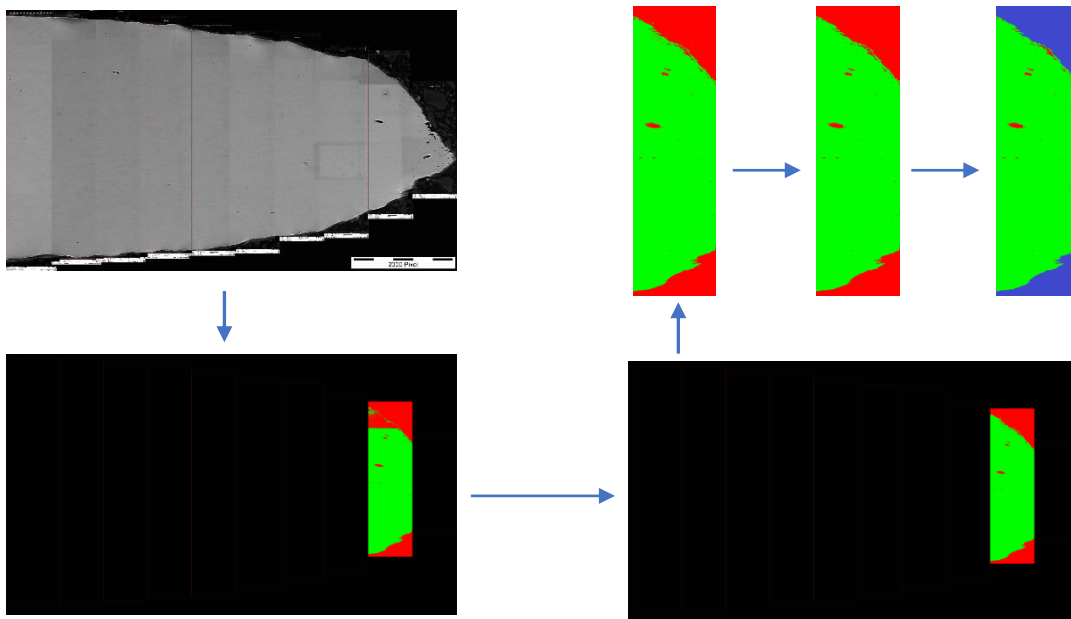
Obrázek 30: Příklad vytvořeného obrazu, hranice pro nastavení analýzy (červené linie)

Záměr analýz kladl vysoké nároky na podchycení detailů – mikroskopických iniciací; při samotném vyhodnocování se ukázalo několik problémů, které si vyžádaly upravit metodiku hodnocení:

- a) samotný software nedokázal v dostatečné přesnosti přiřadit jednotlivé barvy jednotlivým fázím, zejména v oblasti obvodu zkoumaného materiálu,
- b) materiál do kterého se zaléval vzorek má stejnou barvu jako barva vad jež vyhodnocujeme → software tak při vyhodnocování obsahu jednotlivých fází přiřazuje zalitý materiál k vadám a zakresluje tak výsledky,
- c) software ve využívané verzi nedokáže vytvářet více obrazových analýz v jedné fotografii (nutnost vyhodnocovat jednotlivé oblasti postupně).

Vyzkoušeno bylo několik postupů, jako například odečítání obsahu materiálu pomocí vestavěného nástroje programu a dopočítání ostatní fáze pomocí celkového obsahu, ale uvedený postup zakresloval výsledky, díky nutnosti ručního obtahování obvodu materiálu. Rovněž se ukázalo jako nevhodné upravování reálné fotografie nebo přesné nastavování rozřazování jednotlivých fází přímo v programu. Jako nejvýhodnější metoda se tedy ukázala úprava fotografie s již rozřazenými fázemi do jednotlivých barev pomocí standardního grafického editoru.

U původního obrázku bylo tedy v prvotním stadiu úprav dosaženo co nejkvalitnějšího rozřazení do fází (důležité bylo zachování obsahu vad, tedy nastavení červené fáze) pomocí thresholdingu. Dále byl oříznut, aby obsahoval pouze požadovanou oblast. Následovaly úpravy v grafickém editoru. Vzniklé oblasti nepřesně určených fází byly manuálně přiřazeny do správných fází a finálně byl materiál, v němž je vzorek zalit, zbarven do odlišné barvy od přechozích dvou, což umožnilo původnímu programu jednoduché rozřazení do třetí fáze. Na obrázku 31 je vidět postup úpravy od původní podoby fotografie do konečné, určené k vyhodnocování.



Obrázek 31: Postup úpravy analyzovaného obrazu (oblast 100-200 μm)

Zmíněným způsobem byl upraven každý pás (oblast) zvlášť, dohromady tedy bylo 11 měření, které každé reprezentovalo určitou oblast od lomu. Výstupem byla naměřená data obsahů jednotlivých fází v pixelech čtverečních (značeno jako [Pixel2]) i s procentuálním přepočtem vůči celkové ploše fotografie. V tabulce 4 je ukázán příklad dat z měřicího systému; barvy sloupců odpovídají barvě popisované fáze.

Tabulka 4: Příklad upravené tabulky převedené z AnalySIS Docu do Excelu

Image Name	Phase 1	Area Phase 1	Phase 2	Area Phase 2	Phase 3	Area Phase 3
	Pixel2	%	Pixel2	%	Pixel2	%
Vz10ms_0-0.1 PC O MB	701795	41,12	40324	2,36	964034	56,48

3.5.3 Výsledky analýz iniciací defektů na SEM

Jelikož závěrem z předchozího testování je, že se zvyšující se rychlostí deformace (v reálném provozu tedy tváření) roste nežádoucí lokalizace deformace, je nejdůležitější zaměřit se u zkoumání pomocí SEM primárně na vzorek, který je nejrychleji deformován. Výsledky prezentované v této kapitole budou tedy pouze obsahovat měření dynamicky porušeného vzorku rychlostí čelistí 10 m/s.

Souhrn všech naměřených obsahů trhlin v jednotlivých oblastech je znázorněno v tabulce 5. Číslo snímku udává rychlost testovacích čelistí při zkoušení vzorku, vzdálenost od lomu v podélném směru x (\parallel TD) a stav grafické úpravy fotografie. Dále jsou uvedeny obsahy [$\text{px}^2(\text{Pixel2}) / \%$] jednotlivých fází v použitém barevném kódování.

Tabulka 5: Výsledky z měření povrchové analýzy vzorku 10 m/s na SEM

Analýza č. 1 - 11(0-0,1 mm až 1-1,02 mm)						
Image Name	Phase 1	Area Phase 1	Phase 2	Area Phase 2	Phase 3	Area Phase 3
	Pixel2	%	Pixel2	%	Pixel2	%
Vz10ms_0-0.1 PC O MB	701795	41,12	40324	2,36	964034	56,48
Vz10ms_0.1-0.2 PC OP O MB	2190692	78,52	19595	0,7	579459	20,77
Vz10ms_0.2-0.3 PC OP O MB	2944015	89,83	1343	0,04	331896	10,13
Vz10ms_0.3-0.4 PC OP O MB	3350694	94,63	3471	0,1	186467	5,27
Vz10ms_0.4-0.5 PC OP O MB	3606506	94,15	2291	0,06	221534	5,78
Vz10ms_0.5-0.6 PC OP O MB	3845146	96,23	983	0,02	149538	3,74
Vz10ms_0.6-0.7 PC OP O MB	4037333	97,13	2108	0,05	117078	2,82
Vz10ms_0.7-0.8 PC OP O MB	4153754	97,32	4963	0,12	109353	2,56
Vz10ms_0.8-0.9 PC OP O MB	4281116	97,83	2701	0,06	92164	2,11
Vz10ms_0.9-1 PC OP O MB	4286417	97,08	1995	0,05	126542	2,87
Vz10ms_1-1.02 PC OP O MB	862021	98,39	869	0,1	13216	1,51

Je nutné uvést, že ne všechny defekty vyskytující se v měřené oblasti jsou vadami vzniklými následkem lomu. Mohou se zde vyskytovat i vady vzniklé při prvotním válcování do plechu. Tento nepříjemný fakt lze odstranit vyhodnocením obsahů vad ve vzdálenosti, která zaručeně odpovídá neovlivněné oblasti. Můžeme pak konstatovat, že odečtením obsahů vad v neovlivněné oblasti lomem od obsahů vad v ovlivněné oblasti lomem získáváme obsah nedokonalostí v ovlivněné oblasti zapříčiněných primárně mezním stavem. Avšak pro nezpochybnitelnost výsledků stanovených uvedeným přístupem je nutné provést testy rozsáhlejší sady vzorků. Výsledky měření z analýzy mimo deformaci znázorňuje tabulka 6.

Tabulka 6: Analýza 10 m/s mimo deformaci

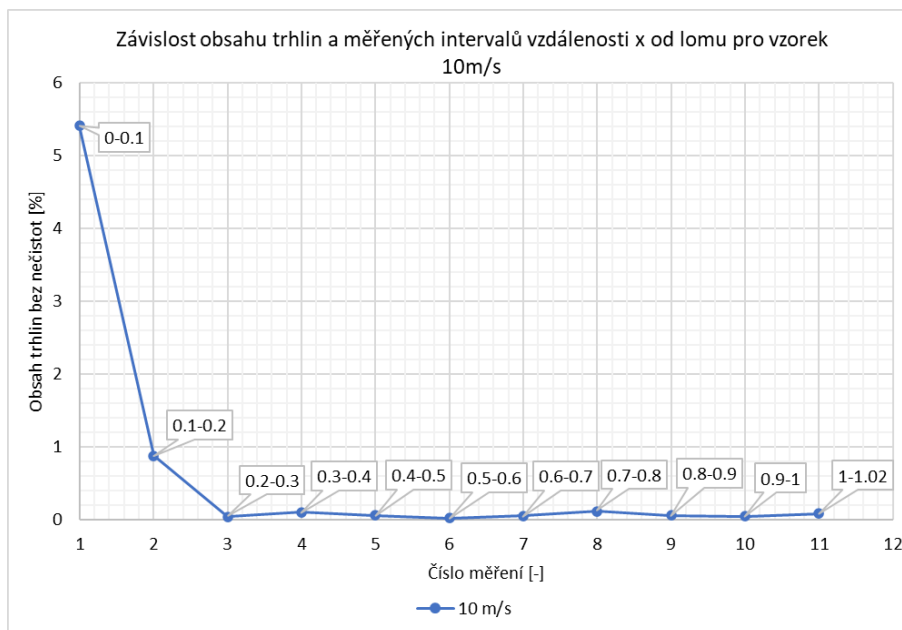
ANALÝZA MIMO DEFORMACI						
Image Name	Phase 1	Area	Phase 2	Area	Phase 3	Area
	Pixel2	%	Pixel2	%	Pixel2	%
Vz10ms_ne.ob. PC O MB	6159274	72,9	165	0,002	2095114	24,8

Po finální úpravě filtrací pozadí (odstranění fáze 3, jež by zkreslovala procentuální zastoupení sledovaných složek) byla vytvořena tabulka 7 udávající kompletní informace o obsahů trhlin vzniklých lomem v sledované oblasti.

Tabulka 7: Přepočtené hodnoty analýzy iniciace defektů pro vzorek 10 m/s

	Vztaženo k celkovému obsahu bez buckelitu			
	Obsah vzorku bez vad [px ²]	Obsah vzorku bez vad [%]	Obsah trhlin bez nečistot [px ²]	Obsah trhlin bez nečistot [%]
Analýza č.1(0-0,1)	701795	94,57	40159	5,41
Analýza č.2(0,1-0,2)	2190692	99,11	19430	0,88
Analýza č.3(0,2-0,3)	2944015	99,95	1178	0,04
Analýza č.4(0,3-0,4)	3350694	99,9	3306	0,1
Analýza č.5(0,4-0,5)	3606506	99,94	2126	0,06
Analýza č.6(0,5-0,6)	3845146	99,97	818	0,02
Analýza č.7(0,6-0,7)	4037333	99,95	1943	0,05
Analýza č.8(0,7-0,8)	4153754	99,88	4798	0,12
Analýza č.9(0,8-0,9)	4281116	99,94	2536	0,06
Analýza č.10(0,9-1)	4286417	99,95	1830	0,04
Analýza č.11(1-1,02)	862021	99,9	704	0,08

Graf na obrázku 32 ukazuje na závislost obsahu trhlin (bez nečistot) v procentech vůči číslu měření (měřené intervaly).

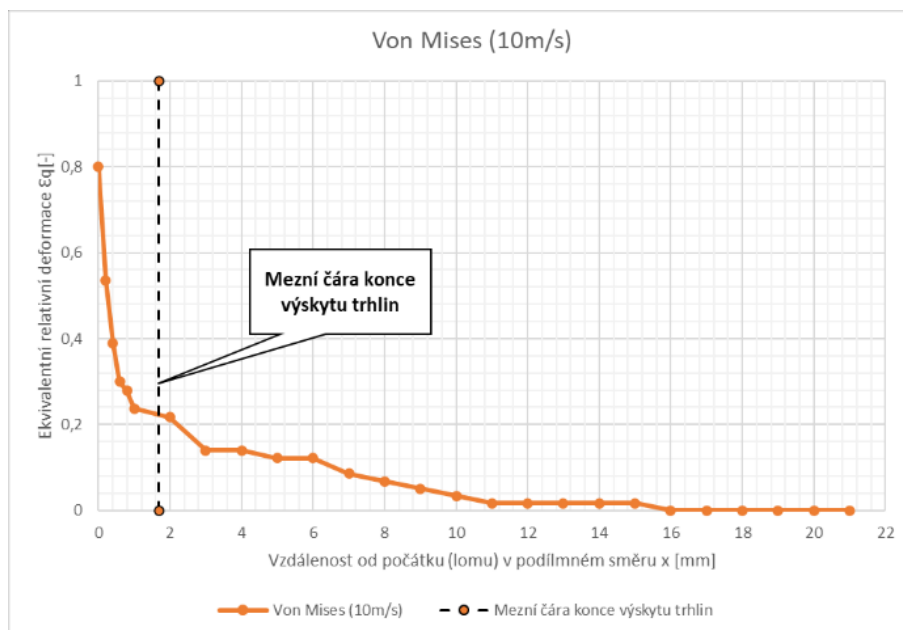


Obrázek 32: Graf obsahu trhlin bez nečistot na číslu měření pro analýzu 10 m/s

Se vzdáleností od lomu obsah trhlin klesá, a to nejvýrazněji bezprostředně v oblasti lomu. Od třetí oblasti (0,2-0,3 mm) již hodnota kolísá ale nikdy nedosáhne nulové hodnoty. To znamená, že zde pořád lom ovlivňuje strukturu materiálu. Nicméně tyto hodnoty jsou natolik nízké, že při odečtu nedokonalostí z neovlivněné oblasti nemusí již představovat ovlivnění lomem. Ke spolehlivému určení, o jaký typ vady se jedná (zda je vada v důsledku prvotního tváření na plech nebo od lomu), byly nejednoznačné oblasti vizuálně prozkoumány individuálně a jednotlivé vady vyhodnoceny.

Ukázalo se, že celá studovaná oblast stále obsahuje trhliny vzniklé v reakci na lom. Dalším zkoumáním se přišlo na hranici, kde již všechny vady vykazují pouze charakter vad vzniklých při výchozím válcování plechu. Tato **hranice** byla stanovena na hodnotu **1,69 mm** od lomu v osově vzdálenosti x (\parallel TD).

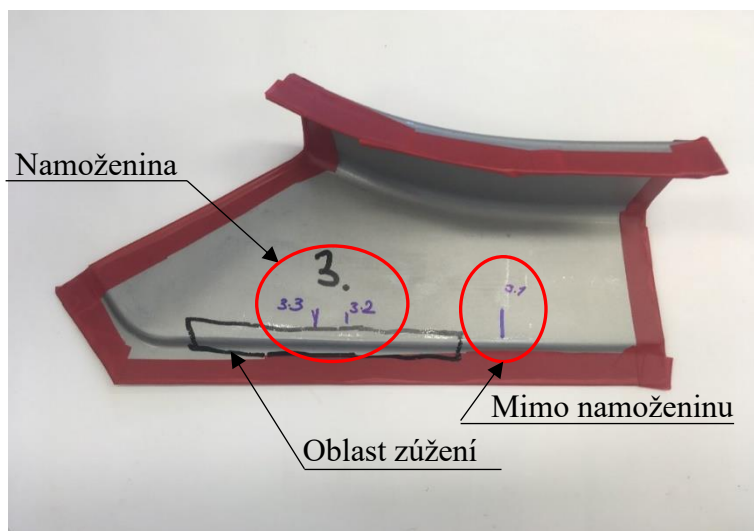
Výsledky z tohoto měření byly kompletovány s měřením odpovídajících deformací (viz kapitola „3.3 Měření deformací, analýzy mezních přetvoření v závislosti na rychlosti deformace“). Zakreslená hranice konce výskytu trhlin v již transformovaném grafu na ekvivalentní relativní deformaci z metalografického mikroskopu je na obrázku 33.



Obrázek 33: Transformovaný graf s mezní hranicí konce trhlin

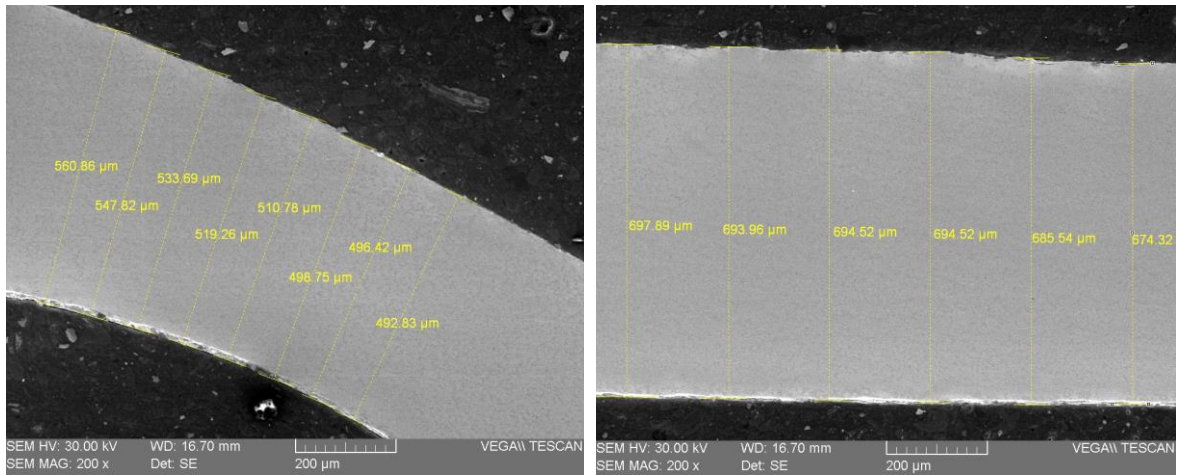
Je vidět, že výskyt trhlin vlivem lomu končí na místě, kde stále dochází ke zúžení materiálu. To znamená, že se materiál dokáže dostatečně plasticky tvářet bez tvorby trhlin.

Tato mezní hodnota také představuje hranici srovnatelnou se zkušenostmi z firmy ŠKODA AUTO a.s. Mezní stav představuje neakceptovatelnou lokalizaci deformace, vznik tzv. namoženin (místo největší změny tloušťky plechu, často mimo oblast cílené deformace výlisku). K dispozici byly referenční vzorky reálně tvářených plechů s různými „namoženinami“. Na obrázku 34 vidíme příklad takového plechu s vyznačenými místy pro měření tloušťky. Pozice 3.1 je měřená mimo místo namoženiny a pozice 3.2, 3.3 jsou přímo určené pro analýzu mezního stavu.



Obrázek 34: Fotografie výlisku s pozicemi měření

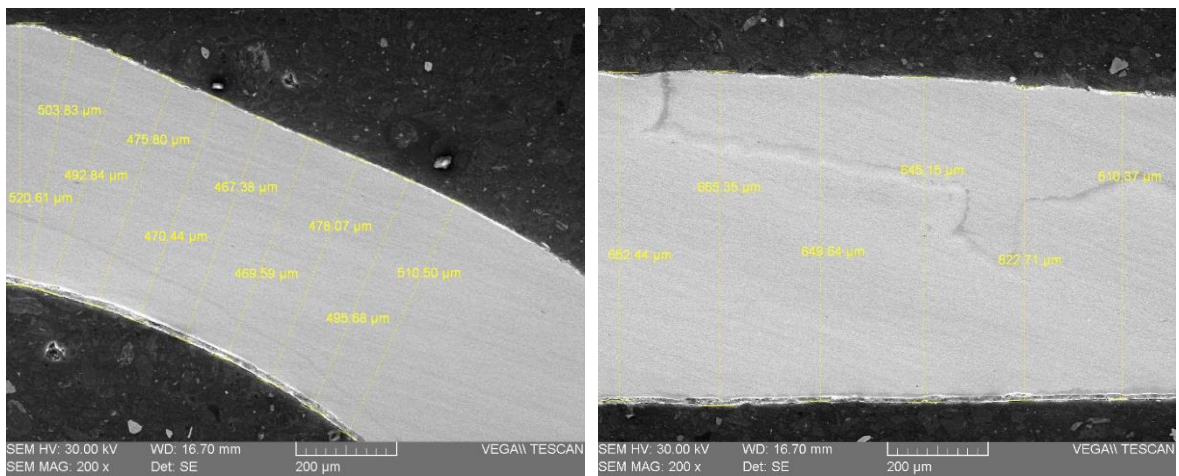
V určených místech byla změřena tloušťka plechu, v kritických oblastech (viditelné zúžení rádiusu a namoženina) bylo použito měření po 100 μm a mimo oblast zúžení nebo namoženiny po 200 μm . Měření proběhlo u všech 3 vyznačených oblastí napříč celou jejich délkou. Porovnání vyhovujícího stavu (OK - poz. 3.1) a mezního stavu (NOK - poz. 3.2) viz obrázek 35, grafické vyhodnocení závislosti vzdálenosti měření na tloušťce je na obrázku 36.



Rádus – měření po 100 μm

Mimo rádus – měření po 200 μm

a)

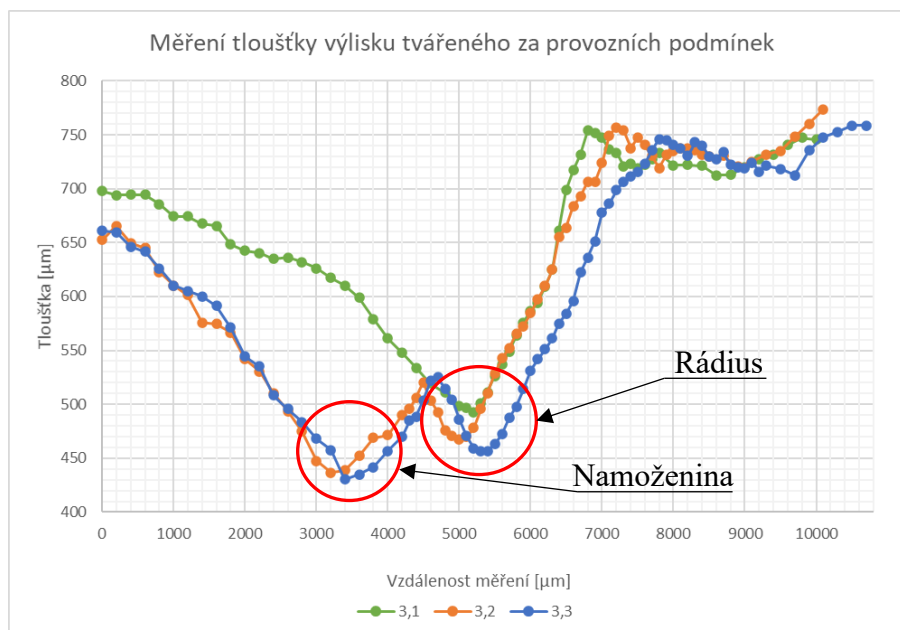


Rádus – měření po 100 μm

Mimo rádus – měření po 200 μm

b)

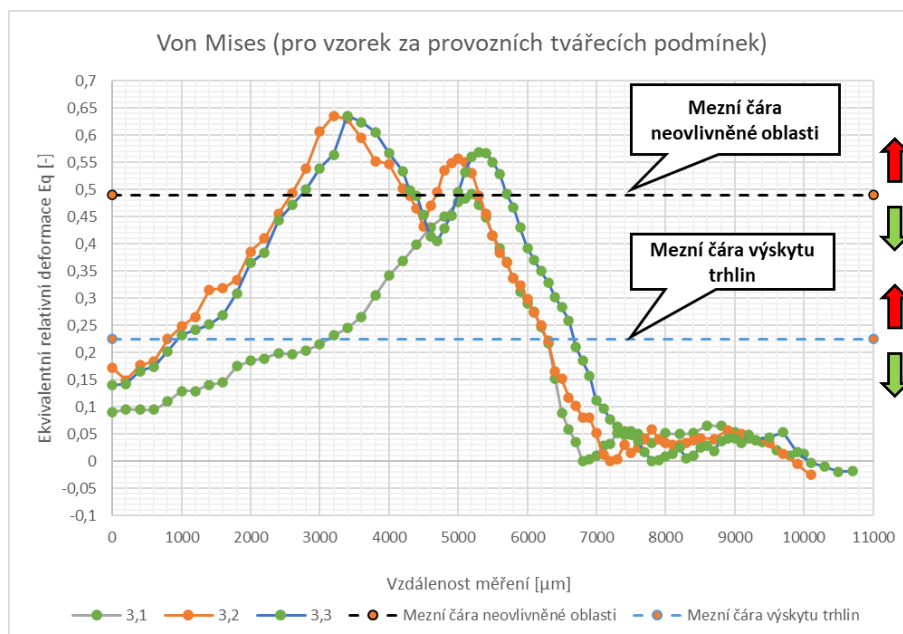
Obrázek 35: Porovnání oblastí OK (a), NOK (b)



Obrázek 36: Graf průběhu změny tloušťky výlisku tvářeného za provozních podmínek

V grafu jsou vidět dva poklesy naměřených tloušťek, měření zachycuje i redukci v ohybu plechu, který neobsahuje namoženinu (v grafu jsou vyznačeny červenými kruhy oblasti rádusu a namoženiny). Zelená křivka, znázorňující pozici 3,1, tj. pozici, která neobsahuje namoženinu (ale obsahuje samozřejmě zmíněný rádus).

Pro možnost posouzení předchozích měření s grafem z obrázku 36 je nutné ho taktéž transformovat do poměrné deformace, která je nezávislá na specifické hodnotě (typicky bezrozměrná veličina). V grafu jsou přímo vyznačeny specifické oblasti zjištěné z obrázku 33 jako průsečík mezní čáry výskytu trhlin a spojnicí naměřených bodů procházející touto čarou. Hodnota průsečíku byla odečtena na $E_q \sim 0,225 [-]$.



Obrázek 37: Transformovaný graf s vyznačenými hranicemi

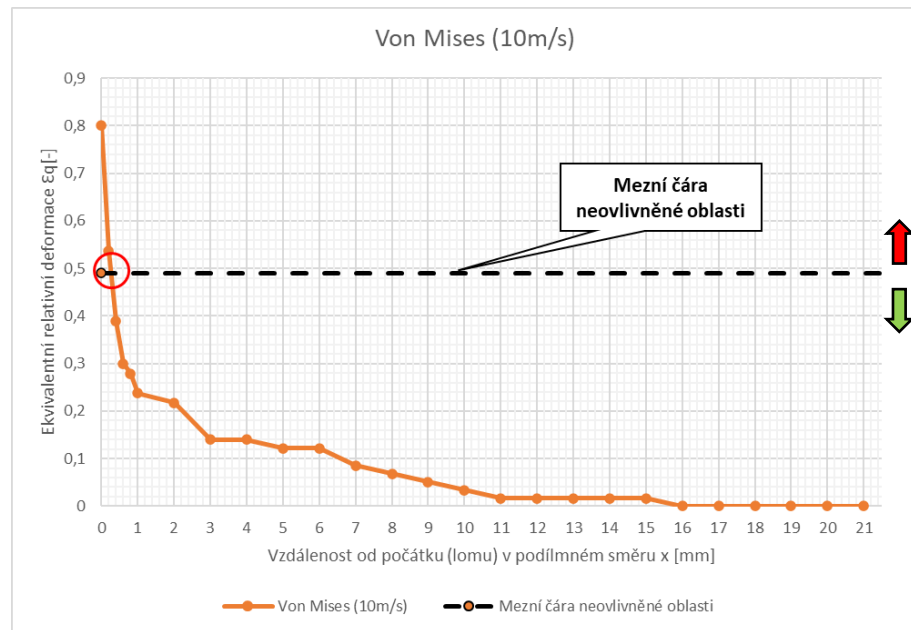
Obrázek 37 souhrnně dokumentuje veškeré informace zjištěné z obou prováděných analýz. Jak můžeme vidět, mezní čáry výskytu trhlin a neovlivněné oblasti rozděluje každá graf na dvě části:

1. **směr červené šipky:** oblast, která zaznamenala při jednoosém testování výskyt trhlin vlivem mezního stavu vzorku
2. **směr zelené šipky:** oblast, která nezaznamenala při jednoosém testování výskyt trhlin vlivem mezního stavu

Mezní čára výskytu trhlin rozděluje graf poměrně „nízko“ a zahrnuje i oblast zelené křivky značící neovlivněnou část vzorku. To znamená, že i přes fakt, že se zde vyskytují trhliny závislé na vzniklé deformaci, nemusejí nutně znamenat problém, ale zároveň konzervativně stanovují hranici, kdy by mohlo dojít k iniciaci mikro-defektů.

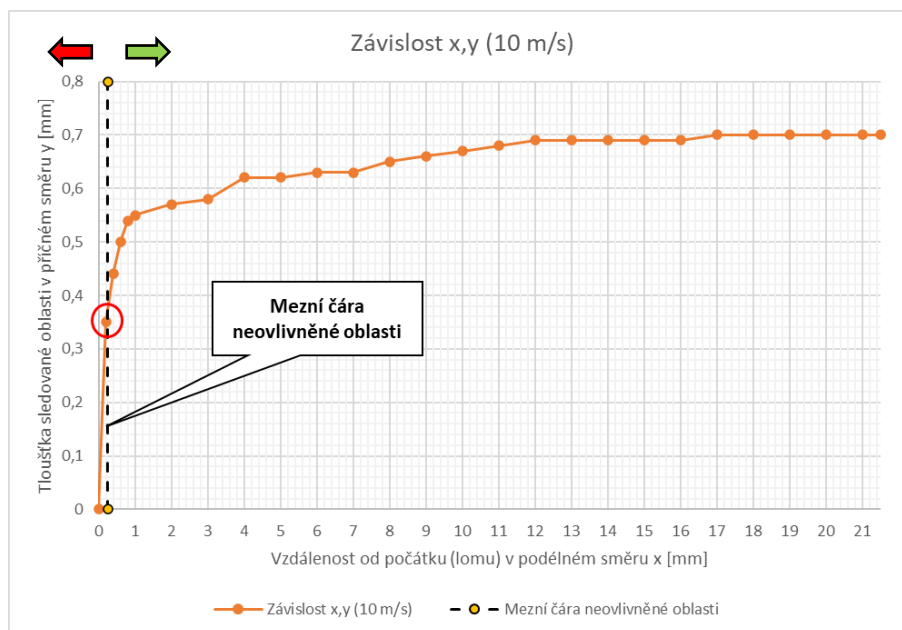
Méně konzervativním přístupem pak můžeme odečíst hranici Eq křivky, jež symbolizuje neovlivněnou oblast (v legendě označenou jako 3,3). Odečet hodnoty Eq této přímky byl stanoven na $\sim 0,49$. Na obrázku 37 je uvedená přímka znázorněna ve grafu získaného z předešlých měření.

Vyhodnocením mezních deformací reálně tvářeného vzorku (obrázek 37) dostáváme přibližný poměr mezní ekvivalentní deformace u reálné namoženiny a deformace vzorku po jednoosém dynamickém zatěžování cca 2:1. Tento rozdíl lze spojovat s vlivem rychlosti tváření a rozdílem stavu deformace. To podtrhuje i skutečnost, že u referenčních vzorků byl zjištěn zásadní vliv rychlosti deformace na lokalizaci deformace a tím i na iniciaci defektů, která byla v dané metodice považována jako identifikace mezního stavu. Stanovení konkrétní hodnoty limitní deformace by vyžadovaly velký rozsah vzorků a statistické vyhodnocení.



Obrázek 38: Transformovaný graf s odečítanou hodnotou

Průsečík s mezní čarou neovlivněné oblasti ukazuje vzdálenost od lomu (~ 0,25 mm), kde u výlisku již nedochází k nepříznivému stavu, tedy k namoženině.



Obrázek 39: Graf pro odečet mezní hodnoty tloušťky neovlivněné oblasti

Znovu stejný princip vyhodnocení byl použit i zde. Hranice neovlivněné oblasti udává číslo tloušťky oblasti v příčném směru jednoose zatíženého vzorku (cca 0,375 mm). Znamená to, že v tomto případě (plech s původní tloušťkou 0,7 mm) je možná výrazná redukce tloušťky bez detekce nepříznivého stavu.

Poslední zjiitelnou hodnotou, doplňující analýzu, je zjištění obsahu trhlin v závislosti na měřené vzdálenosti od lomu. V grafu 32 spadá hodnota 0,25 mm do třetího měření, jenž obsahuje již velice malé procento obsahu trhlin bez nečistot při prvotním tváření plechu (~ 0,04 %). Nicméně jsou zde pořád trhliny detekované v důsledku lomu.

Použitou metodou můžeme stanovit hodnotu tloušťky plechu (pomocí Eq), u které již nedochází k potencionálnímu vzniku namoženiny. Problémem je stálý výskyt trhlin v materiálu vzniklý důsledkem deformace. Dále nutno uvést, že analýzy byly provedeny pouze na referenčních vzorcích, počtem nedostatečných pro jednoznačně statistický popis výskytu trhlin, atp. Nebyl definován stav deformace/napjatosti a rychlost deformace v analyzovaných oblastech výlisku. Provedené rozbory ověřily použitelnost a univerzálnost použitého přístupu.

3.6 Strukturní a krystalografické analýzy

K doplnění informací o výchozím stavu materiálu byla provedena zkouška EBSD a EDX. Obě zkoušky jsou popsány výše v této práci.

Strukturní analýza byla provedena na rastrovacím elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA 5130 SB s nástavbou mikroanalyzátoru EDX Bruker Quantanox 200. Krystalografická analýza využila stejného mikroskopu jako strukturní, ale navíc bylo využito přístroje EBSD Quantax CrystAlign 400i.

Kompletní nastavení krystalografické analýzy je uvedeno v tabulce 8.

Tabulka 8: Nastavení mikroskopu pro EBSD analýzu

Nastavení mikroskopu			
Proud sondy	63-70 μA	Velikost kroku měření	0,27 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Sklon detektoru	0,35°	Skenovací frekvence	60,2 fps
Sklon vzorku	70°	Pracovní vzdálenost	16,7 mm
Body	2	Celkově rozlišení mapy měření	512x384 [pixel]
Urychlovací napětí svazku elektronů	20 kV	Celková velikost mapy měření	153,5x115,1 [μm^2]
Vyžadovaný počet indexovaných pásem	7	Řádkování	0,45 μm
EBSP rozlišení	800x600 [pixel]	Přiblížení	1000x

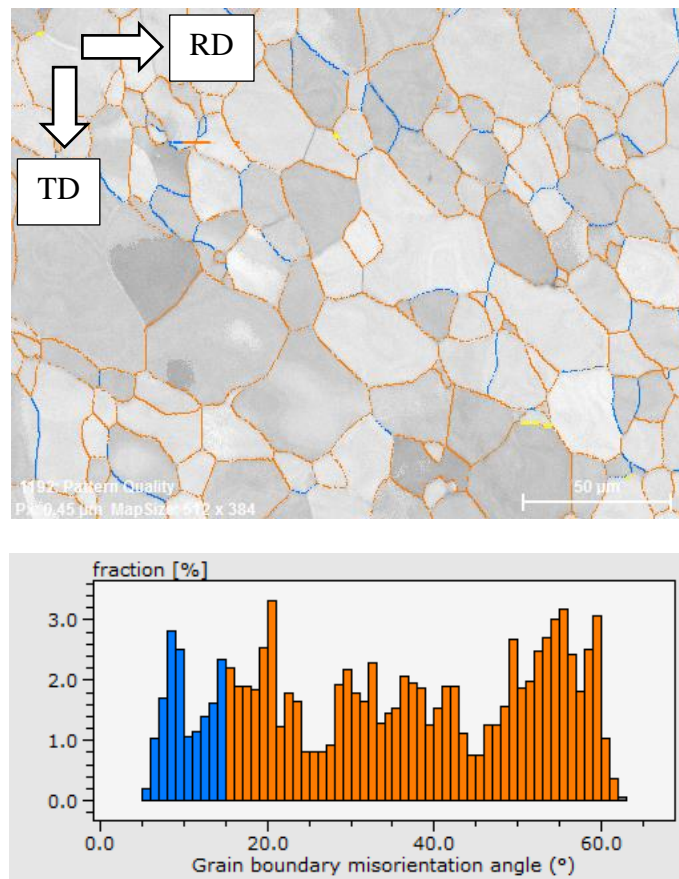
Pro strukturní analýzy bylo změněno urychlovací napětí na 30 kV, pracovní vzdálenost na 6,752 mm a přiblížení na 6000x.

3.6.1 Vyhodnocení strukturní a krystalografické analýzy

Vyhodnocení strukturní a krystalografické analýzy bude prováděno pouze pro výchozí stav materiálu. Dále všechny referenční vzorky byly testovány plošně, tedy v rovině TD-RD.

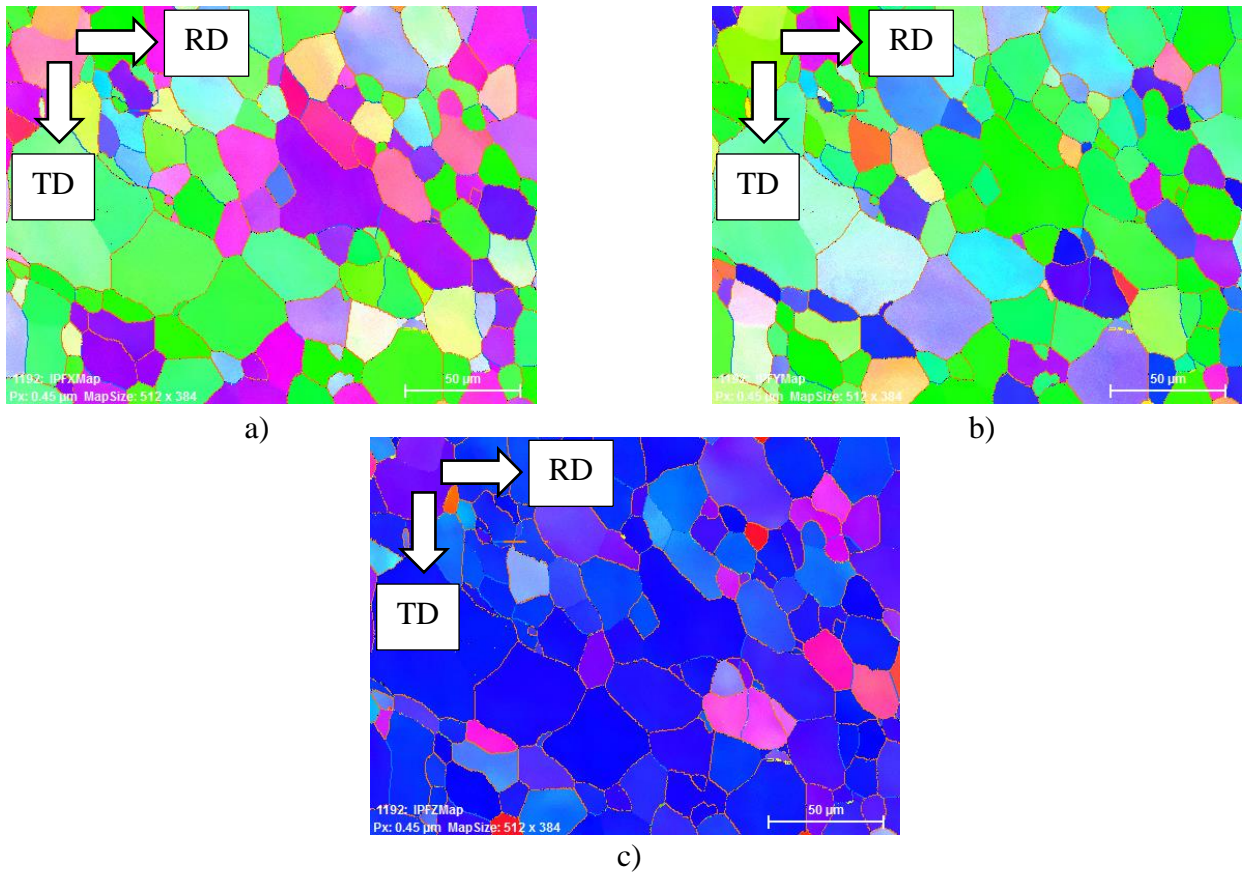
Pro popsání výchozího stavu materiálu byly zpracovány stavy misorientace a dalších krystalografických dat oceli.

Na obrázku 40 je vidět výchozí stav úhlu misorientace hranic zrn na jejich podílu. Jelikož se jedná o nedeformovaný stav, distribuce poměrů vysoko a nízkoúhlových hranic jsou relativně na stejné úrovni. Nicméně díky vývoji zpevňování a zvyšující se deformaci lze předpokládat i nárůst poměru nízkoúhlových hranic zrn (LAGB), přičemž kritická hodnota pro LAGB je pod 15° .



Obrázek 40: Mapa kvality vzoru (nahore), misorientace hranic zrn na jejich podílu (dole)

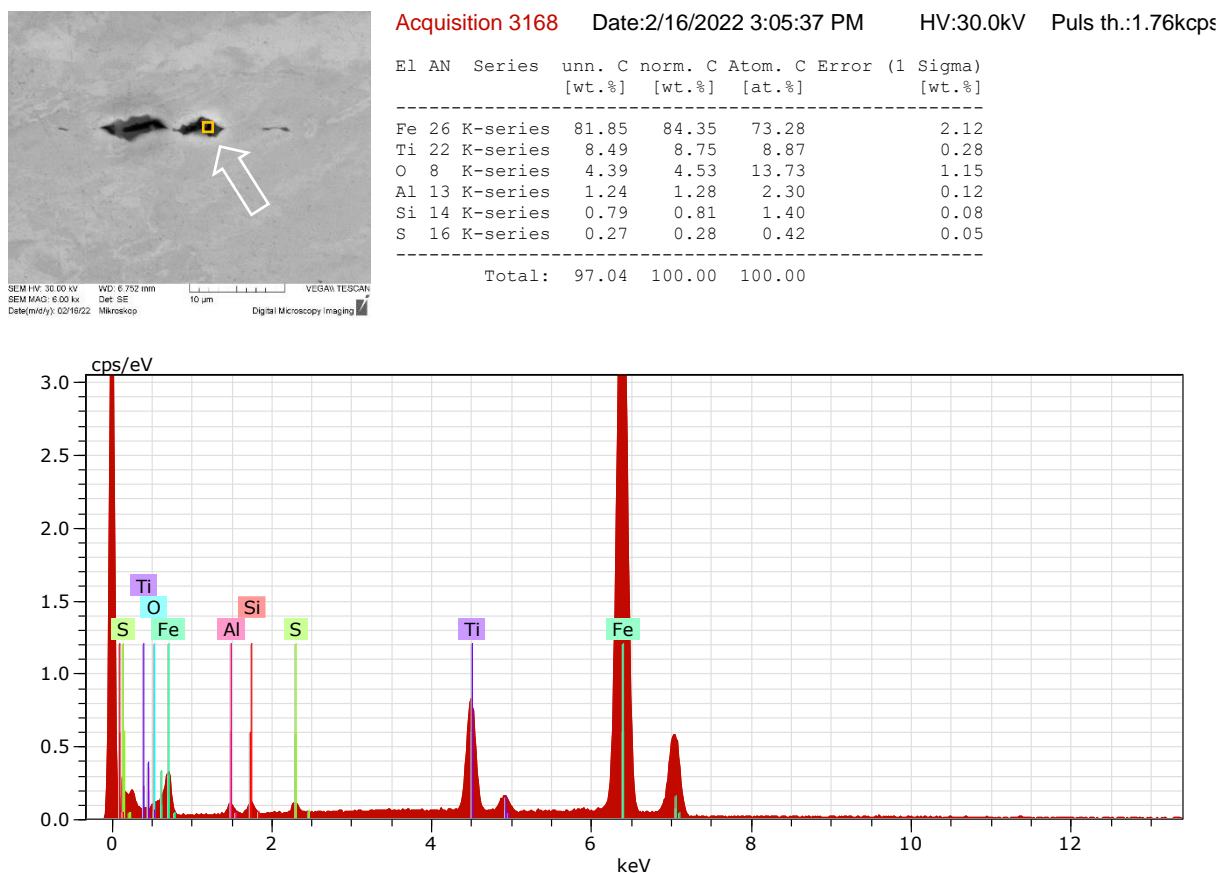
Typická anizotropie IF – ocelí je uvedena na mapách inverzních pólových obrazců vztaheným ke směrům x (TD), y (RD) a z (ND) (viz obrázek 41). Výsledky byly prováděny na jednoose tahově zatížených vzorcích.



Obrázek 41: EBSD: a) IPF mapa v x (TD), b) IPF mapa v y (RD), c) IPF mapa v z (ND)

Jak bylo již řečeno, IF-oceli vděčí za svou výbornou tváritelnost bezintersticiálnímu charakteru a krystalové struktuře. Krystalová struktura dovoluje dosažení požadované plastické anizotropie. Vysoká hodnota normálové anizotropie a nízká hodnota plošné anizotropie je spojována právě s velmi dobrou tváritelností tenkých plechů. K dosažení vysoké normálové anizotropie je důležitá přítomnost γ vláken, popřípadě $\{111\}$ krystalografické struktury. Právě tento úkaz lze vidět na zmíněných obrázcích. Jedná se o zřejmou převahu orientace krystalů, tj. γ vláken, v rovině vztahené ke směru ND (modrá barva, obrázek 41–c), naopak v ostatních vztahných směrech nebyla pozorována zřetelná převaha barev, což je projev smíšené krystalografické orientace.

Chemická mikro-analýza typicky se vyskytující nečistoty, vedoucí k iniciaci defektů vlivem tváření na určeném místě, je na obrázku 42.



Obrázek 42: EDX analýza

Z EDX analýzy, jak bude diskutováno v poslední kapitole, je patrné, že iniciace mikrotrhlin je v podstatě především ovlivněna výskytem vměstků typu TiS. Analýza byla provedena dále na dvou doplňujících vzorcích, které reprezentovaly stav vzorků za hranicí přípustnosti deformace; výsledky vedly ke stejnému závěru.

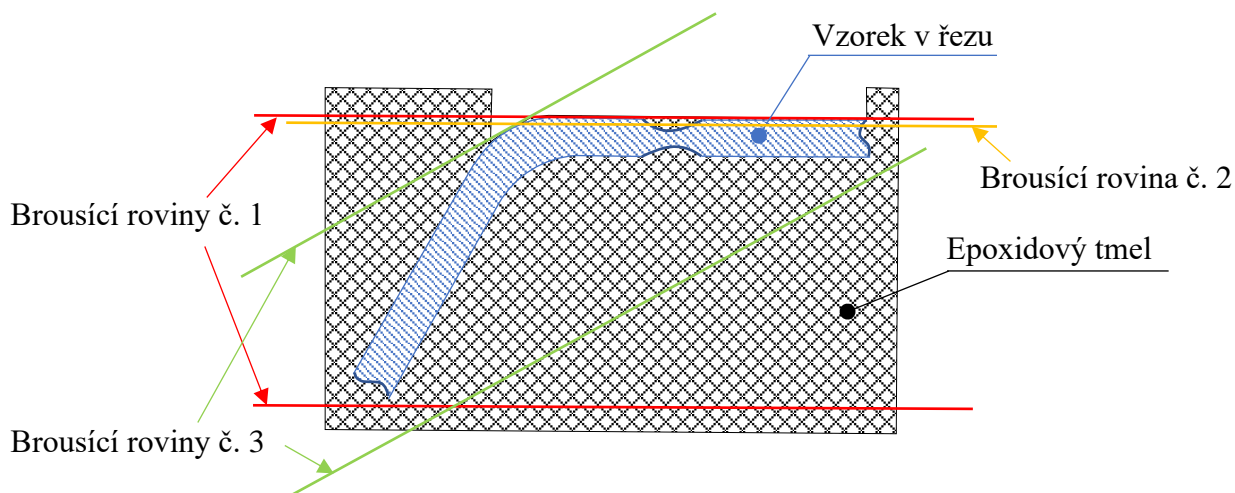
3.7 Měření lokální meze kluzu

3.7.1 Příprava vzorků

Lokální mez kluzu byla měřena instrumentovanou zkouškou válcovým indentorem; pro zkoušku byly připraveny dva vzorky. První vzorek byl plech ve výchozím stavu před lisováním, druhý vzorek je již po tváření za reálných podmínek v provozu, který byl firmou ŠKODA AUTO a.s. označen za nevyhovující z důvodu existence mezního stavu (namoženiny). Oba vzorky se od sebe tedy liší pouze tvarem, nikoliv použitým materiálem.

Vzorek výchozího stavu oceli byl mechanicky broušen na metalografické brusce KOMPAKT 1031 firmy MTH brusným plátnem o zrnitosti 600.

Vzorek reálného výlisku byl po odmaštění zalit do dvousložkového epoxidového tmelu EPOXY REPAIR AQUA od firmy BISON. Vzorek byl broušen ve třech krocích – po sobě jdoucími brousícími rovinami č.1, 2 a 3 (provedení viz obrázek 43).



Obrázek 43: Schéma přípravy vzorku pro měření lokální meze kluzu

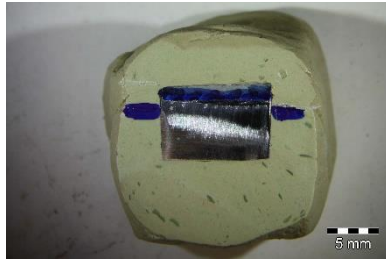
3.7.2 Provedení instrumentované zkoušky

Instrumentovaná zkouška byla provedena na univerzálním stroji s motorizovanou hlavou pro měření tvrdosti typu ZHU 2,5 firmy Zwick/Roell. Zvolené přiblížení optické jednotky bylo 1:20.

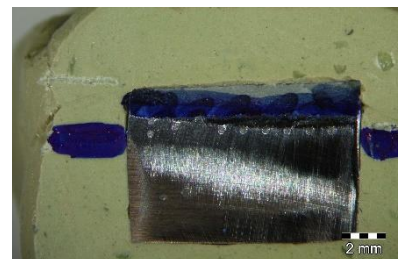
K samotné indentaci byl použit válcový indenter ze slinutého karbidu o průměru 0,3 mm. Prvním krokem u měření bylo nastavení optimální hodnoty zatěžující síly pro dosažení oblasti změny z lineární části na nelineární; zvoleno bylo zatížení v rozsahu 100-130 N, v závislosti na linii měření (každé sadě měření bylo potřeba zadat jinou zatěžující sílu). Provedena byla sada minimálně osmi měření ve třech liniích. V případě více měřících bodů, na obrázku níže, šlo o měření využitá ke zmíněné korekci zatěžující síly.



a)



b)



c)



Obrázek 44: Měřené linie s měřítky a) první linie, b) namoženina, c) rádius

3.7.3 Vyhodnocení záznamů z měření indentační meze kluzu

Oba vzorky byly naměřeny dle kapitoly „3.7.2 Provedení instrumentované zkoušky“, výsledky jsou uvedeny v tabulce 9 až 13. Všechny indentační grafy jsou uvedeny v přílohách A-D. Písmeno uvedené v závorce, v názvu tabulky, odkazuje na obrázek 44 (pouze u dat ze vzorku deformovaného tvářením za reálných podmínek).

Tabulka 9: Hodnoty z měření indentace pro nedeformovaný vzorek

Nedeformovaný vzorek		
Koeficient k [-]	2,57	$R_{es} = \frac{F}{S \cdot k_H}$
Obsah indentoru S [mm ²]	0,07069	
Č. měření	Odečtené hodnoty síly na mezi kluzu F [N]	Skutečná mez kluzu R _{es} [MPa]
1.	47	259
2.	45	248
3.	42	231
4.	43	237
5.	39	215
6.	39	215
7.	40	220
Průměr	42,1	232
Sm. odchylka	3,078	16,945

Tabulka 10: Hodnoty z měření indentace pro 1. linii (a) tvářeného vzorku

1. linie (a)		
Koeficient k [-]	2,57	$R_{es} = \frac{F}{S \cdot k_H}$
Obsah indentoru S [mm ²]	0,070685835	
Č. měření	Odečtené hodnoty síly na mezi kluzu F [N]	Skutečná mez kluzu R _{es} [MPa]
1.	88	484
2.	85	468
3.	77	424
4.	83	457
5.	77	424
6.	77	424
7.	83	457
8.	83	457
Průměr	81,6	449,3
Sm. odchylka	4,173	22,969

Tabulka 11: Hodnoty z měření indentace pro namoženinu (b) tvářeného vzorku

Namoženina (b)		
Koeficient k [-]	2,57	$R_{es} = \frac{F}{S \cdot k_H}$
Obsah indentoru S [mm ²]	0,070685835	
Č. měření	Odečtené hodnoty síly na mezi kluzu F [N]	Skutečná mez kluzu R _{es} [MPa]
1.	90	495
2.	99	545
3.	100	550
4.	100	550
5.	98	539
6.	95	523
7.	91	501
8.	96	528
9.	100	550
Průměr	96,6	531,5
Sm. odchylka	3,877	21,339

Tabulka 12: Hodnoty z měření indentace pro rádius (c) tvářeného vzorku

Rádius (c)		
Koeficient k [-]	2,57	$R_{es} = \frac{F}{S \cdot k_H}$
Obsah indentoru S [mm ²]	0,070685835	
Č. měření	Odečtené hodnoty síly na mezi kluzu F [N]	Skutečná mez kluzu R _{es} [MPa]
1.	79	435
2.	74	407
3.	82	451
4.	81	446
5.	80	440
6.	76	418
7.	82	451
8.	82	451
9.	78	429
Průměr	79,3	436,7
Sm. odchylka	2,872	15,811

Tabulka 13: Shrnutí hodnot z měření indentace

Shrnutí hodnot		
Měření	Sm. odchylka skutečné meze kluzu [MPa]	Průměr skutečné meze kluzu [MPa]
Nedef.	16,945	232
1. linie	22,969	449,3
Namoženina	21,339	531,5
Radius	15,811	436,7

3.8 Vliv rychlosti deformace na zpevnění

V této kapitole budou diskutovány výsledky především zaměřené na vliv rychlosti deformace na zpevnění daného vzorku, vyvozené z následujících vyhodnocení:

1. srovnání mezi pevnostmi z tahových zkoušek statických (1,8 mm/min) a dynamických (5, 10 m/s),
2. srovnání skutečné meze kluzu výlisku v měřených oblastech,
3. srovnání skutečné meze kluzu výlisku v měřených oblastech s indentační mezi kluzu nezatíženého plechu,
4. výsledky měření indentace jednoosově zatíženého vzorku,
5. posouzení meze kluzu výlisku v kritickém místě vůči mezi kluzu ze statické zkoušky.

Ad 1) Srovnání mezi pevnostmi z tahových zkoušek statických (1,8 mm/min) a dynamických (5, 10 m/s)

Statická tahová zkouška byla provedena na trhacím stroji ZWICK/ROEL Z-030. Rychlé dynamické zkoušky využily elektro-hydraulický systém AH 40-100 M062 s kontrolním systémem Inova TestControl. Rychlosti deformace jednotlivých zkoušek jsou uvedeny výše v této práci.

V tabulce 14 je znázorněno společně s naměřenými hodnotami porovnání mezi pevnostmi pro jednotlivé rychlosti zatěžování. V příloze E, F jsou k dispozici grafy z dynamické zkoušky a odečet síly k výpočtu meze pevnosti (jedná se o kvadratický průměr zvýrazněných hodnot). Hodnota síly na mezi pevnosti odečtena z provedené statické tahové zkoušky (příloha G).

Dle předpokladu se dosahuje nejvyšší pevnosti v případě nejrychlejšího zatížení (deformační rychlosti). To je způsobeno omezením schopnosti materiálu distribuovat dostatečně rychle dislokace napříč vzorkem, díky čemuž zde dochází k lokalizaci deformace i napětí, k deformaci zrn a tím i většímu zpevnění. S klesající rychlostí deformace klesá mez pevnosti; mezi maximální rychlostí zatížení (10 m/s) a statickou rychlostí zatížení byl naměřen rozdíl 138,06 MPa, což činí pokles zpevnění z nejvyšší hodnoty o 47,7 %. Důležitý rozdíl, téměř 31 %, je však vidět mezi statickou a již první dynamickou hodnotou (5 m/s). Mezi oběma dynamickými hodnotami nebyl zjištěn žádný podstatný rozdíl. To vede k předpokladu, že rozhodující vliv rychlosti deformace na jejím šíření je spojen s 5 m/s (333 s⁻¹). K potvrzení této teorie je však zapotřebí mnohem širší škála testovaných vzorků.

Tabulka 14: Hodnoty z tahových zkoušek

Souhrn hodnot tahových zkoušek			
Typ tahové zkoušky	Max. síla F ze statické tahové zkoušky [N]	Obsah průřezu vzorku S [mm ²]	Mez pevnosti R _m [Mpa]
Statická tahová zkouška (0,00003 m/s)	1215,81	4,2	289,48
	Kvadr. průměr síly F z rychlé tahové zkoušky [N]		
Rychlá tahová zkouška (5 m/s)	1757,57	4,2	418,47
Rychlá tahová zkouška (10 m/s)	1795,68	4,2	427,54

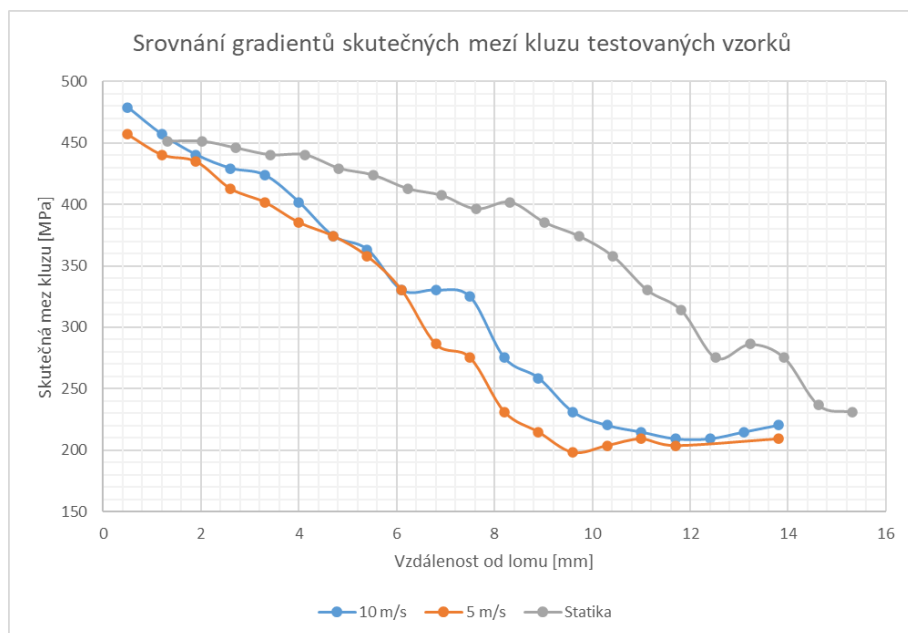
Ad 2, 3, 4) Srovnání skutečné meze kluzu výlisku v měřených oblastech / s indentační mezi kluzu nezatíženého plechu; výsledky měření indentace jednoosově zatíženého vzorku

Tabulka 13 z přechozí kapitoly udává souhrn informací o naměřených hodnotách v oblastech měření indentace u reálného výlisku.

Z hodnot naměřených ve třech zmíněných liniích lze konstatovat očekávaný závěr, že k největšímu zpevnění dojde v oblasti namoženiny, kde dojde i k největší deformaci. Dále je zde vidět, že výsledky v oblasti rádiusu a rovinné části plechu jsou si velice podobné. To zejména díky velmi dobré tvářitelnosti (vysoká hodnota normálové a nízká hodnota plošné anizotropie).

Oproti tomu bylo naměřeno vysoké zvýšení skutečné meze kluzu mezi nedeformovaným plechem a kritickým místem výlisku. V místě maximálního ztenčení tloušťky plechu (namoženina) došlo ke zvýšení meze kluzu o 129 %. Nicméně i v místě rovinné části a rádiusu došlo k výraznému zpevnění. To zaznamenávalo zvýšení o 94 % v prvním případě a 88 % v druhém případě. K bližšímu popsání efektu rychlosti deformace na zvýšení pevnosti a distribuci deformace byla provedena indentační měření na vzorcích zatížených jednoosým tahem za stejných deformačních rychlostí jako výše uvedené (tj. $0,002 \text{ s}^{-1}$, 333 s^{-1} a 666 s^{-1}).

Měření gradientu skutečné meze kluzu je na obrázku 45. Provedení měření na příčně řezaném vzorku (rovina TD-ND) zachycuje obrázek 46.



Obrázek 45: Graf srovnání gradientů skutečných mezí kluzu testovaných vzorků



Obrázek 46: Příčně řezaný vzorek s vpichy

Skutečná mez kluzu blízko lomu jeví cca 99 % nárůst v porovnání se skutečnou mezí kluzu nedeformovaného plechu a také s nedeformovanými částmi vzorků z tahových zkoušek. Dosah plastického toku očekávaným způsobem prezentuje vliv rychlosti deformace (u dynamických hodnot materiál nemá dostatek času na přenášení napětí). Výrazné změny gradientu indentační meze kluzu nebyly pozorovány u dynamických měření. Z toho lze usoudit, že podstatný rozdíl v šíření deformace je přiřazen již rychlosti deformace 333 s^{-1} (5 m/s). Toto tvrzení je potřeba podpořit dalším testováním.

Ad 5) Posouzení meze kluzu výlisku v kritickém místě vůči mezi kluzu ze statické zkoušky

K porovnání mezí kluzu kritické části výlisku s mezí kluzu z tahové zkoušky je zapotřebí nejdříve provést korekci reálné meze kluzu podle výsledků standardní tahové zkoušky (kapitola „3.2 Návrh experimentu, použité metody“), tj. použitím poměru průměrné meze kluzu při jednoosém zatížení ve směru TD, které bylo stanoveno na 157 MPa a průměrné hodnoty meze kluzu stanovené indentací nedeformovaného materiálu (232 MPa), tj. v poměru 0,68.

Průměrná hodnota meze kluzu odpovídající tahové zkoušce v kritické oblasti (namoženině) pak vychází 359,7 MPa. V porovnání s přepočtenou hodnotou skutečné meze kluzu ze staticky trhaného vzorku u lomu, která činí 305 MPa, dochází u reálného výlisku k 18 % nárůstu pevnosti, a to dokonce bez porušení spojitosti.

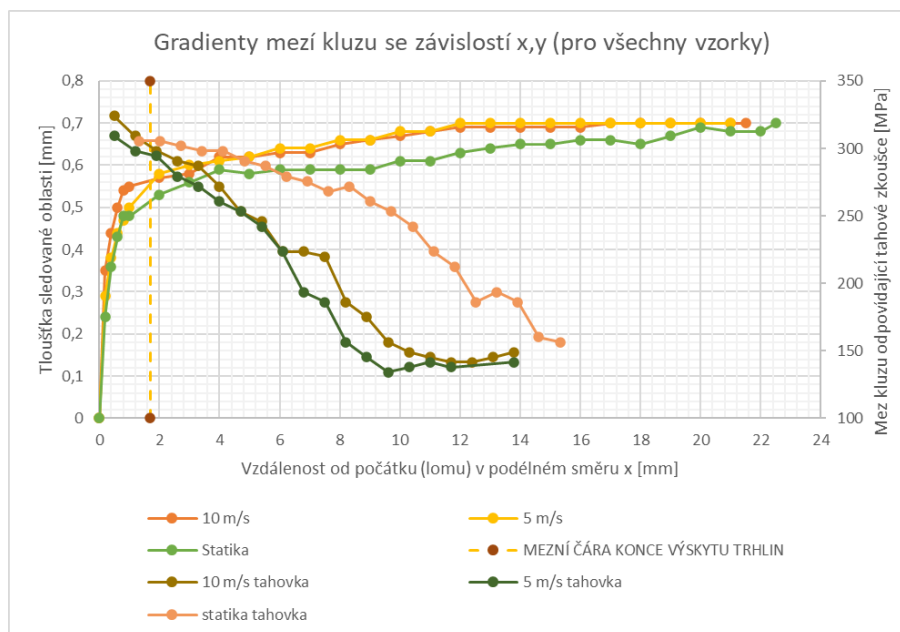
SOUHRNNÉ VYHODNOCENÍ, ZÁVĚRY

Práce je zaměřena na studium lokalizace plastické deformace a s tím spojený mezní stav přetvoření u materiálu, u kterého je dosahováno vysoké plasticity výchozí anizotropií.

Idea hodnocení mezního stavu, tak jak byla představena, vycházela z analýzy iniciace mikrotrhlin v daném stavu plastické deformace materiálu. Myšlenka vycházela z přechozích zkušeností, kde tvorba defektů odrážela problém lokalizace plastické deformace v daných podmínkách lisování i následného zpracování výlisků. Výsledky analýz prováděných na výlisku byly kombinovány s analýzami z jednoosově zatížených vzorků identického materiálu při různých rychlostech deformace. V kontrastu s výsledky obdobných experimentálních prací, například [21,22] se ukázal rozhodující vliv nečistot. Z výsledků provedených analýz dále vyplývá, že limitaci deformace nelze v daném případě postavit pouze na základě detekce mikroskopických nespojitostí.

Rozhodujícím efektem je lokalizované zpevnění, a to pod vlivem rychlosti deformace. Lokalizace plastického přetvoření materiálu byla hodnocena měřením lokální meze kluzu. Byla stanovena pomocí dvou možných metod. V nynějším stadiu nelze z důvodu malého počtu vzorků (pouze referenčních) jednoznačně stanovit limity obou parametrů, tj. zpevnění v kombinaci s iniciací mikrodefektů. Provedené analýzy v této práci ukazují výhody a nevýhody použitého přístupu, možnosti kombinace analýz pro komplexní stav materiálu.

Na obrázku 47 je souhrnně dokumentována závislost všech měřených parametrů – gradient meze kluzu v závislosti na deformaci sledované oblasti a dosahu iniciací defektů. K největšímu zpevnění dochází právě v bezprostřední vzdálenosti u lomu. Bohužel gradient měřený pomocí konkrétní použité indentační metody nelze změřit přímo v oblasti lomu z důvodu nedostatečných rozměrů oblasti.



Obrázek 47: Závislost zpevnění na lokalizaci deformace

Pomocí krystalografických analýz (EBSD) byl potvrzen požadovaný typ anizotropie ve výchozím stavu materiálu.

Provedená zkouška celistvosti výlisku byla navíc doplněna o chemickou mikroanalýzu inkluzí, spojených s iniciací nespojitostí. Cílem tak bylo najít způsob rozlišení horní hranice (překročení) kapacity materiálu k deformačnímu přetvoření pod řídicím vlivem lokalizace deformace v reakci na parametry tváření ve výrobě (rychlost deformace, lubrikace, atd.). Na základě výsledků těchto analýz lze konstatovat, že na rozdíl od iniciace v reakci na misorientaci na rozhraní zrn, které jsou obecně uváděny u výzkumů daného typu ocelí, dochází k iniciaci mikrotrhlin přednostně na inkluzích (tzn. iniciace mikrotrhlin je výrazným způsobem ovlivněna místní metalurgickou kvalitou oceli). Nutno podotknout, že nelze tuto skutečnost vyloučit již ve výchozím stavu oceli. Zdá se, že přednostně nedochází k podnícení mikrotrhlin na dominantně se vyskytujících a velikostně převládajících vměstcích typu TiN (TiNC), ale na měkčích vměstcích typu TiS. Tato dvě tvrzení je však nutno ověřit větším rozsahem měření.

Indentačními zkouškami bylo zjištěno, že efekt zpevnění je v případě kritické části u výlisku větší než u jednoosově zatížených plechů, a to i přes fakt, že u výlisků nedošlo k trvalému porušení spojitosti materiálu. To souvisí s větším rozsahem homogenní deformace u tahové zkoušky ve srovnání s výliskem, což ovlivňuje plastickou kapacitu materiálu. Skutečné plastické omezení lisovaného dílu z IF oceli je spojeno s různými napěťově – deformačními podmínkami a zvýšenými rychlostmi deformace.

Dalším závěrem z měření indentace je nárůst lokální meze kluzu v maximálním zúžení výlisku vůči nedeformovanému plechu o 129 %. U měření gradientu jednoosově zatížených vzorků pak bylo zjištěno, že významná změna zpevnění (s omezením rozvoje plastické deformace) se děje již při přechodu ze statické rychlosti zatěžování ($0,002 \text{ s}^{-1}$) na nižší testovanou rychlost zatěžování (333 s^{-1}).

S určitým zjednodušením můžeme také zjistit upřesnění rychlosti deformace, kterou jednoosově zatížené vzorky skutečně podstupují. Graf na obrázku 47 totiž nese i informaci o reálném dosahu deformace vzorku, toho lze využít při výpočtu deformační rychlosti. Pro různé rychlosti zatížení (při uvažování symetrického rozvoje deformace od místa lomu) pak vycházejí deformační rychlosti:

- Statika z původních $0,002 \text{ s}^{-1}$ na $0,00075 \text{ s}^{-1}$
- Dynamika 5 m/s z původních 333 s^{-1} na 208 s^{-1}
- Dynamika 10 m/s z původních 666 s^{-1} na 294 s^{-1}

I přes fakt, že se pořád jedná o průměr deformační rychlosti, kterou materiál podstupuje v průběhu deformace, se takto přepočtená charakteristika více přibližuje reálnému průběhu. Z výsledku je patrné, že se zvětšující se deformací dochází k úbytku deformační rychlosti, tudíž původní hodnoty se zdají být jako velice přeceněné a materiál reálně podstupuje výrazně (v případě 10 m/s o více než 50 %) menší rychlost deformace přes celý průběh testu.

Na závěr nutno ještě znovu podotknout, že měření uváděná v této práci jsou provedena na sadě referenčních vzorků. K jednoznačnému potvrzení zejména kvantitativních závěrů uvedených v této práci je potřeba provést další analýzy použitím větších sad vzorků.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ŠKODA KAMIQ – Infografika [online]. Mladá Boleslav: © ŠKODA AUTO, 2019 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-mapy/skoda-kamiqtiskova-mapa/infografiky/attachment/kamiq_cz_materialova_struktura
- [2] ANON. *Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl, Nízkopevnostní oceli* [online]. Dostupné z: <https://workswell.cz/rozdeleni-oceli-pro-automobilovy-prumysl/#vysokopevnostni-za-tepla-tvarene-oceli>
- [3] ANON. *Technologie II* [online]. Technická univerzita Liberec, fakulta strojní, katedra strojírenské technologie, oddělení tváření kovů a plastů. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [4] ANON. *Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů I* [online]. Dostupné z: <https://slidetodoc.com/2-mechanick-vlastnosti-i-mechanick-vlastnosti-a-charakteristiky/>
- [5] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vydání [online]. Vysoké škola chemicko-technologická v Praze. [vid. 2006]. ISBN 80-7080-600-1. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pdf/048.pdf
- [6] VOJTĚCH, Dalibor. *Struktura, vlastnosti a zpracování kovových materiál* [online]. Vysoké škola chemicko-technologická v Praze. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-568-4/pdf/134.pdf
- [7] ANON. *Mechanické vlastnosti PL* [online]. Dostupné z: https://material.karlov.mff.cuni.cz/people/janecek/studenti/Exp_met_FKS_2/Mech_vl.pdf
- [8] ANON. *Otázky ke zkoušce BUM 2010/2011 LS* [online]. Dostupné z: http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/BUM/BUM_prepracovane_otazky-1az53.pdf
- [9] WIKIPEDIE. *Rentgenová krystalografie* [online]. Updated 2022-04-23 16:05. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Rentgenov%C3%A1_krystalografie
- [10] MAN, Ondřej. *Aplikace metody difrakce zpětně odražených elektronů v materiálovém inženýrství* [online]. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, ústav materiálových věd a inženýrství. [vid. 2010]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=25137

- [11] ANON. *Interpreting the Diffraction Pattern* [online]. Oxford Instruments [vid. 2022]. Dostupné z: <https://www.ebsd.com/ebsd-explained/interpreting-the-diffraction-pattern>
- [12] ANON. *The evaluation of grain orientation data* [online]. EBSD and BKD. Dostupné z: <http://www.ebsd.info/evaluation.htm>
- [13] SCHMIDOVÁ, Eva. NESLUŠAN, Miroslav. ONDRUŠ, Ján, TROJAN, Karel. PITOŇÁK, Martin. KLEJCH, Filip. RAMESHA, Sunil Kumar. *Monitoring of Plastic Straining Degree of Components Made of Interstitial Free Steel after Uniaxial Tensile Test by the Use of Barkhausen Noise Technique*. [vid. 2021]. Dostupné z: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/srin.202100597?saml_referrer=
- [14] VODÁREK, Vlastimil. *Metoda EBSD v řádkovací elektronové mikroskopii* [online]. Škola růstu krystalů 2010. [vid. 2010]. Dostupné z: https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2010_39Vodarek.pdf
- [15] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vydání [online]. Vysoké škola chemicko-technologická v Praze. [vid. 2006]. ISBN 80-7080-600-1. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/053.html
- [16] TATÍČEK, František. *Vliv materiálu na kvalitu vylisku* [online]. České vysoké technické učení v Praze, fakulta strojní. [vid. 2018-02-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-materialu-na-kvalitu-vylisku>
- [17] ANON. *Fyzika kondenzovaného stavu. 5. prezentace* [online]. Dostupné z: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fkdf.mff.cuni.cz%2Fvyuka%2Fkondenzovany_stav%2Fmaterialy_2016%2FFKS_5.pptx&wdOrigin=BROWSELINK
- [18] KUNCOVÁ, Nikol. *Porovnání anizotropie vybraných ocelí pro tváření za studena* [online]. České vysoké technické učení v Praze, fakulta strojní, ústav materiálového inženýrství. [vid. 2020]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89739/F2-BP-2020-Kuncova-Nikol-Bakalarska%20prace_NikolKuncova_2020-converted%20%281%29.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [19] ZÍKA, Luboš. *Výroba součástí plošným tvářením* [online]. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, ústav strojírenské technologie. [vid. 2010]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29505

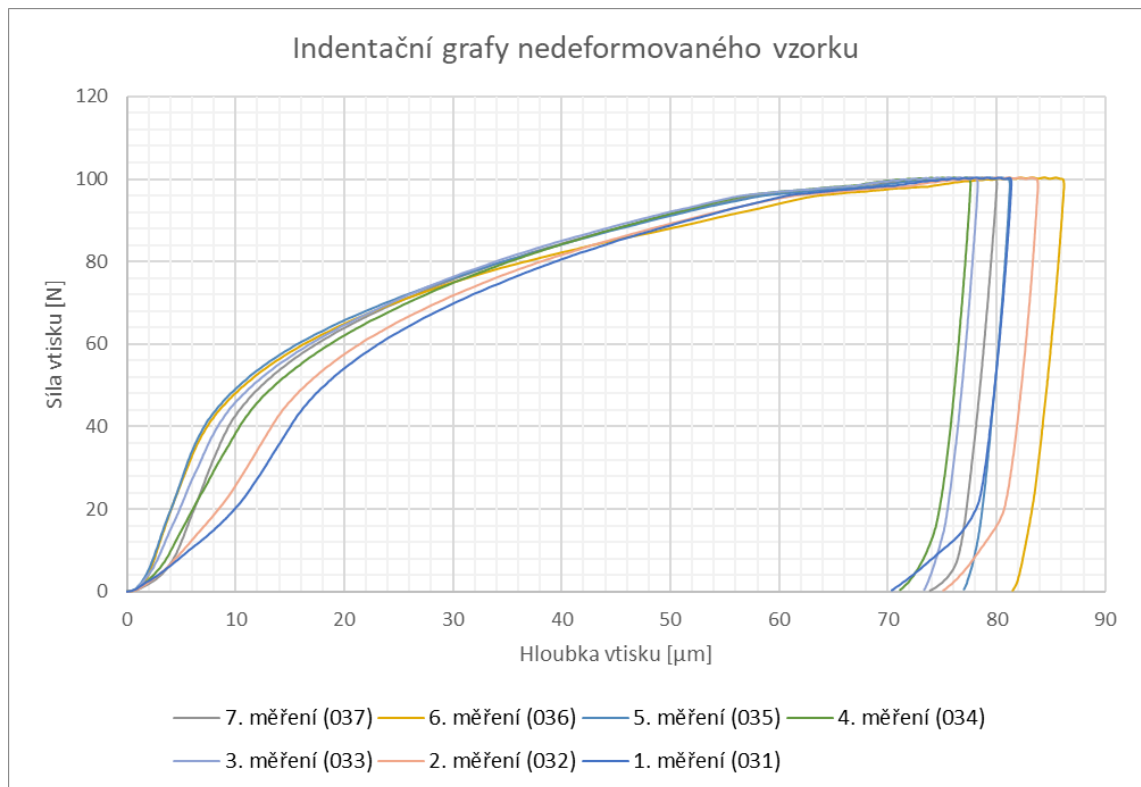
- [20] HANUS, Petr. *Hodnocení vlivu strukturní heterogenity na pevnost svarových spojů vysokopevnostních ocelí* [online]. Pardubice, 2016 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/63957/HanusP_HodnoceniVlivu_ES_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Disertační práce. Univerzita Pardubice.
- [21] MUKHERJEE, Shreya. KUNDU, Amrita, SARATHI DE, Partha. MAHATO, Kumar Jayanta. CHAKRABORT, P.C.. SHOME, M.. BHATTACHARJEE, D.. *In situ investigation of tensile deformation behaviour of cold-rolled interstitial-free high-strength steel in scanning electron microscope*. [vid. 2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509320301180>
- [22] MATSUNAO, Takash. MAEDEA Daisuke. SHUTOH, Hiroshi. UENISCHI, Akihiro. SUEHIRO, Masayoshi. *Effect of Martensite Volume Fraction on Void Formation Leading to Ductile Fracture in Dual Phase Steels*. [vid. 2020] . Dostuné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/54/4/54_938/article/-char/en
- [23] COLPNA, O. Can, NALBANT, Yagmur, ERCELIK Mustafa. *4.28 Fundamentals of fuel cell technologies*. [online]. Comprehensive energy systems. [vid. 2018]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/energy-dispersive-x-ray-spectroscopy>
- [24] SOUČEK, Pavel. *Analýza vrstev pomocí elektronové spektroskopie a podobných metod* [online]. Elektronové spektroskopie. [vid. 2010-04-01]. Dostupné z: http://monoceros.physics.muni.cz/~dorian/Soucek_Elektronova_mikroskopie.pdf
- [25] KLEJCH, Filip. *Testování stavu povrchové vrstvy typu Al/Si v konstrukci karoserií automobilů* [online]. Univerzita Pardubice, Doprávní fakulta Jana Pernera. [vid. 2018]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/71156/KlejchF_TestovaniStavu_ES_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

PŘÍLOHY

Příloha A <i>Indentační křivky: Nedeformovaný vzorek</i>	83
Příloha B <i>Indentační křivky: 1. linie</i>	84
Příloha C <i>Indentační křivky: Namoženina</i>	85
Příloha D <i>Indentační křivky: Rádus</i>	86
Příloha E <i>Rychlá tahová zkouška: 10 m/s</i>	87
Příloha F <i>Rychlá tahová zkouška: 5 m/s</i>	88
Příloha G <i>Statická tahová zkouška</i>	89

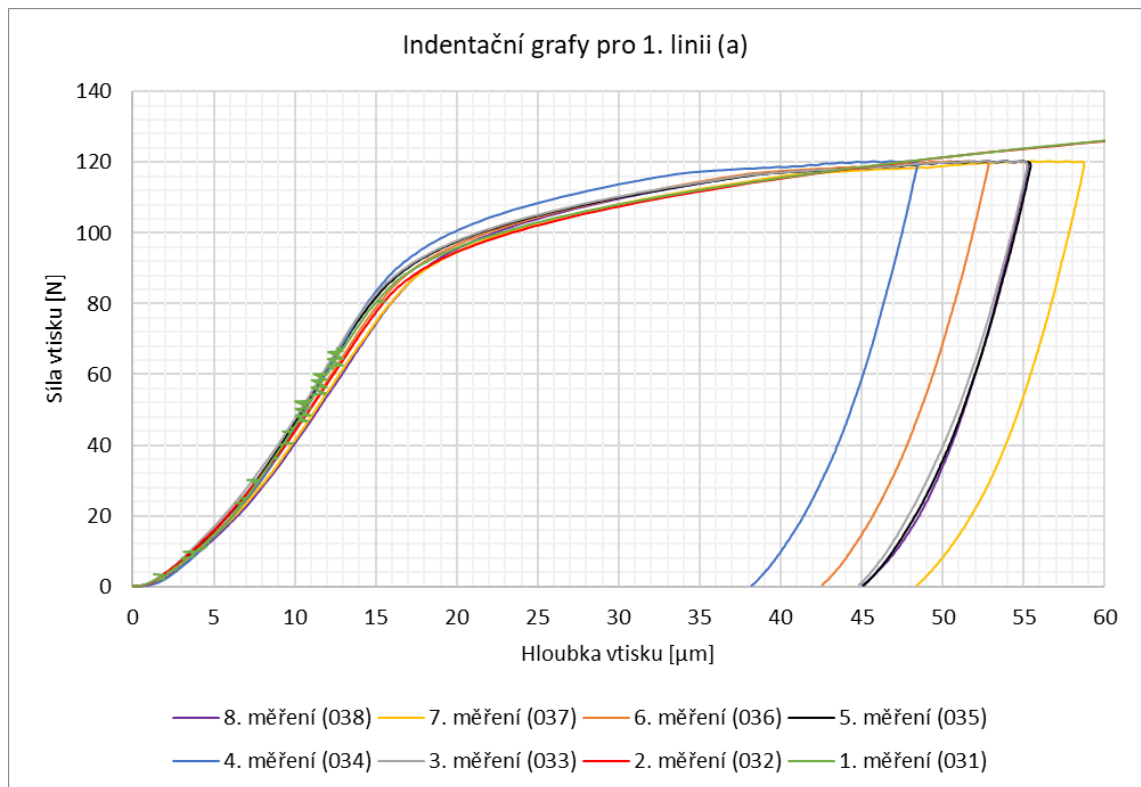
Příloha A Indentační křivky: Nedeforovaný vzorek

Indentační křivka všech měření nedeforovaného vzorku.



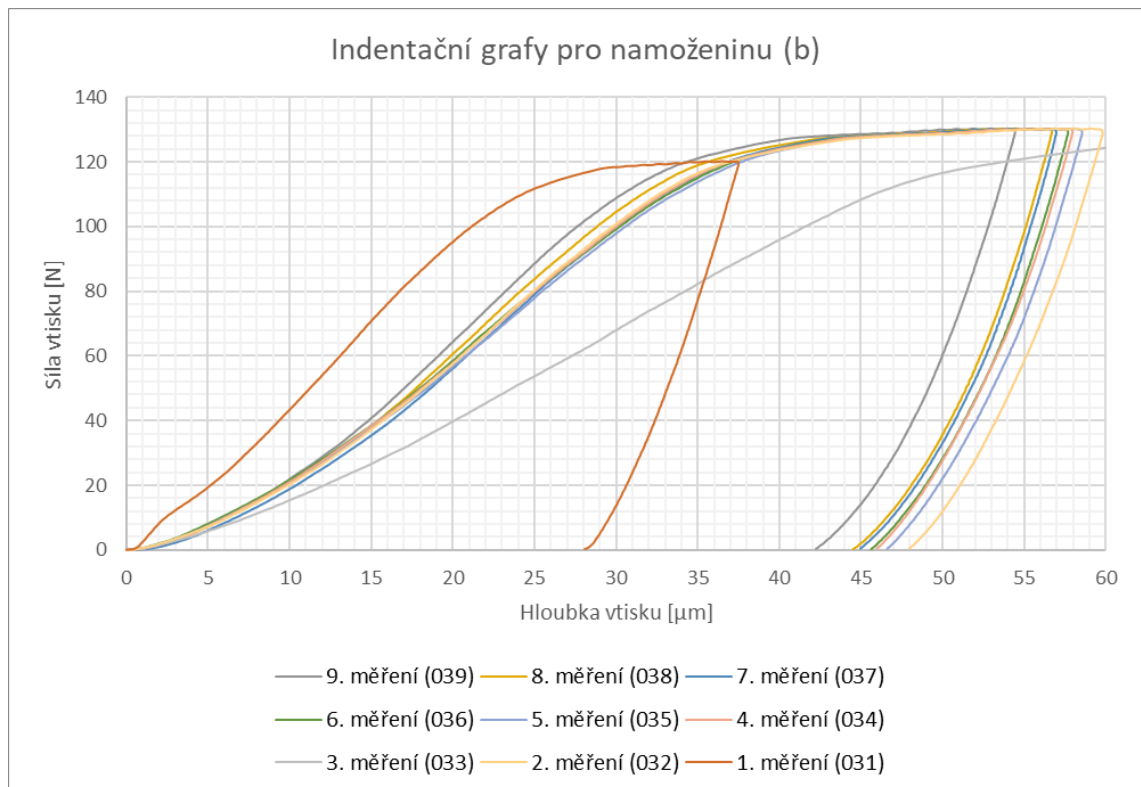
Příloha B Indentační křivky: 1. linie

Indentační křivka všech měření v první linii (viz obrázek 44–a).



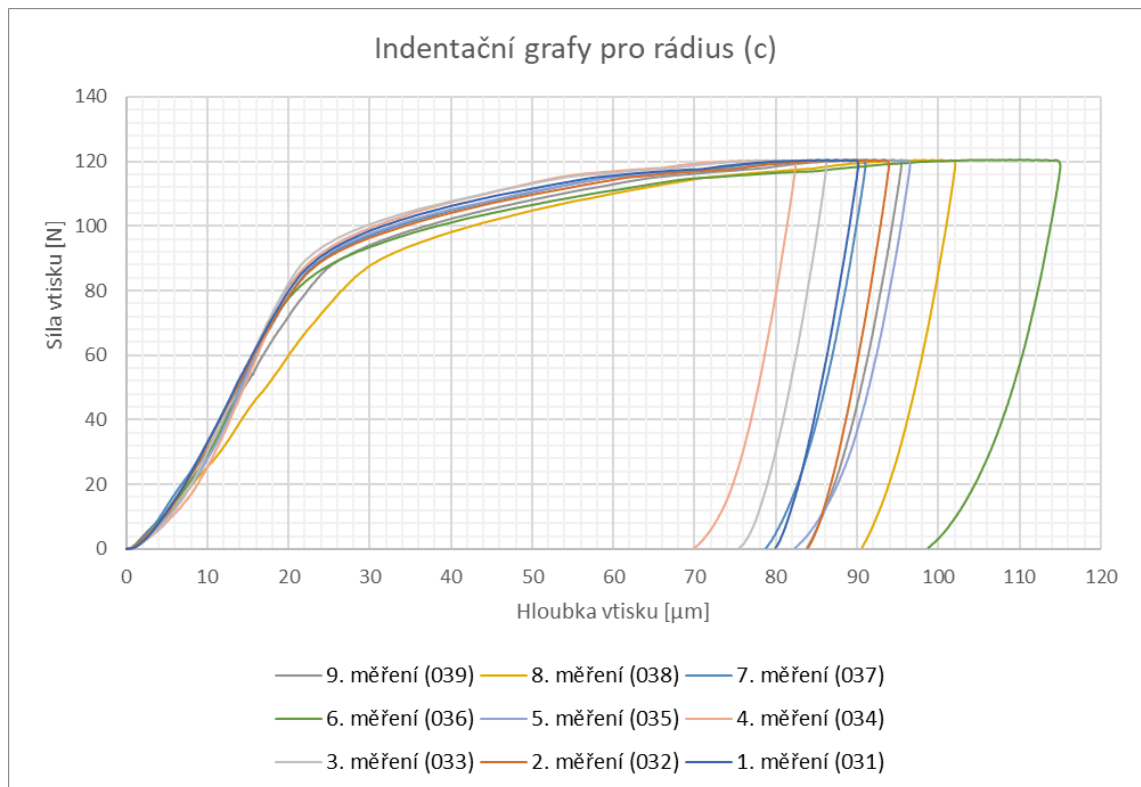
Příloha C Indentační křivky: Namoženina

Indentační křivka všech měření v namoženině (viz obrázek 44–b).



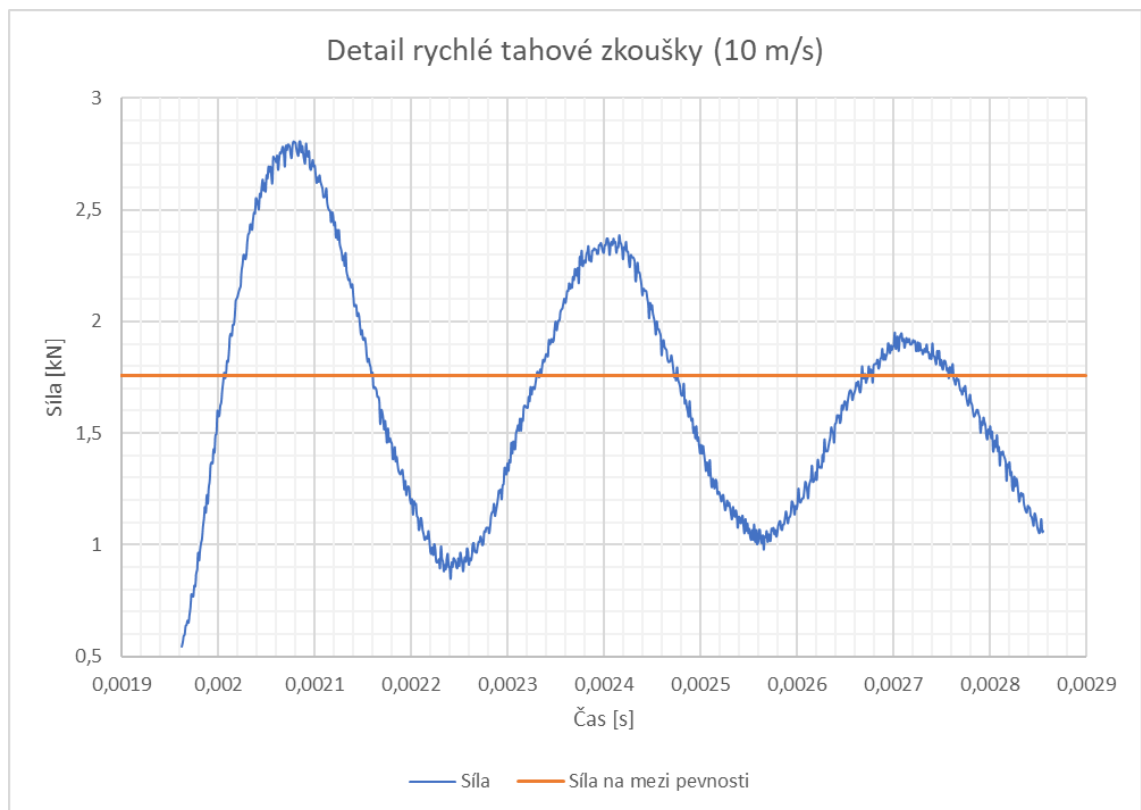
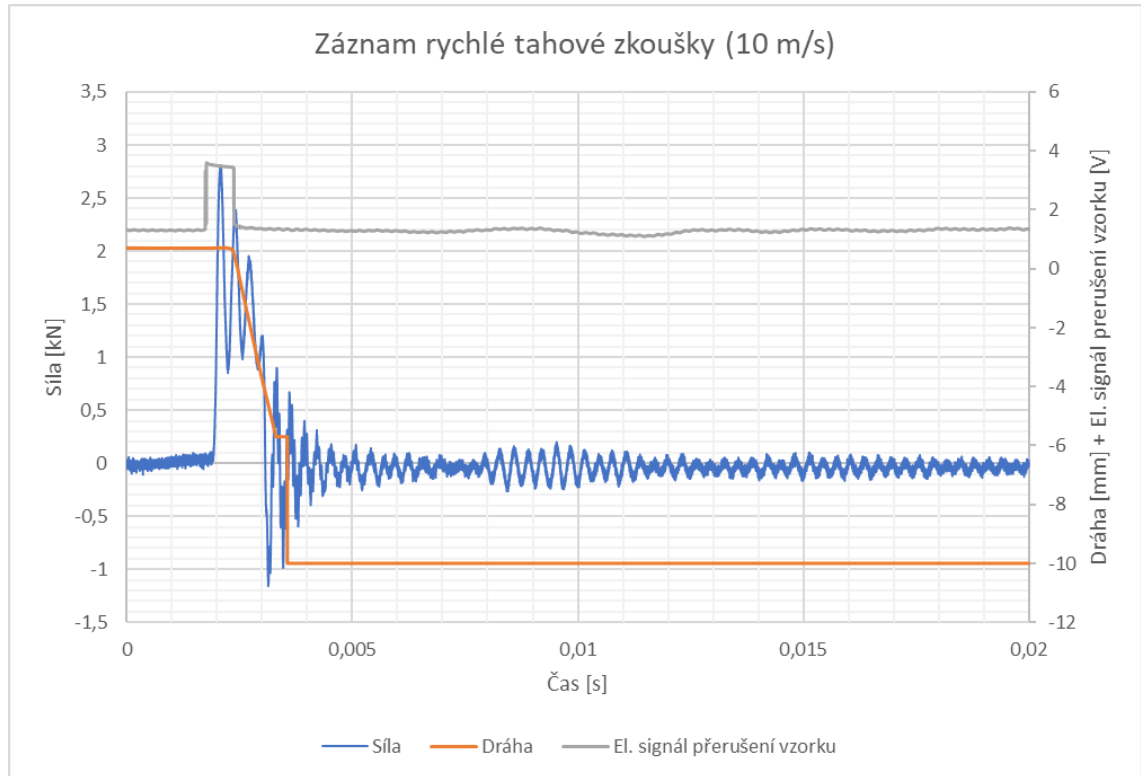
Příloha D *Indentační křivky: Rádus*

Indentační křivka všech měření v rádusu (viz obrázek 44–c).



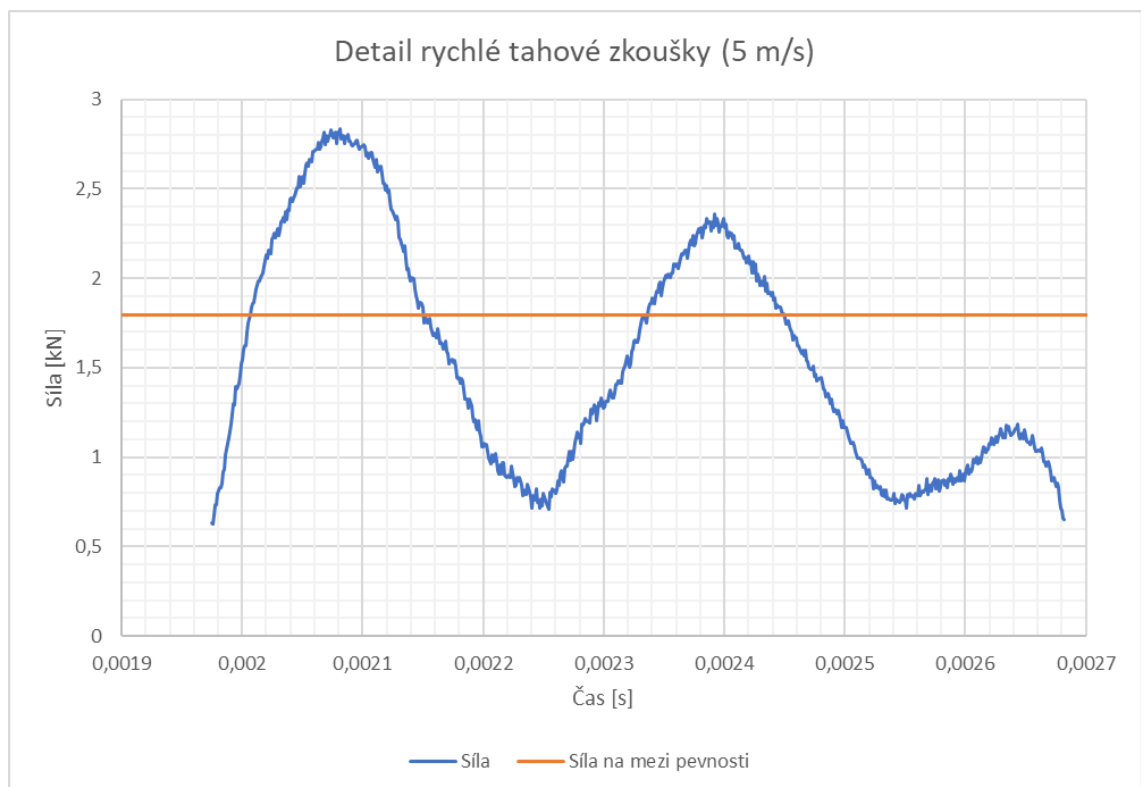
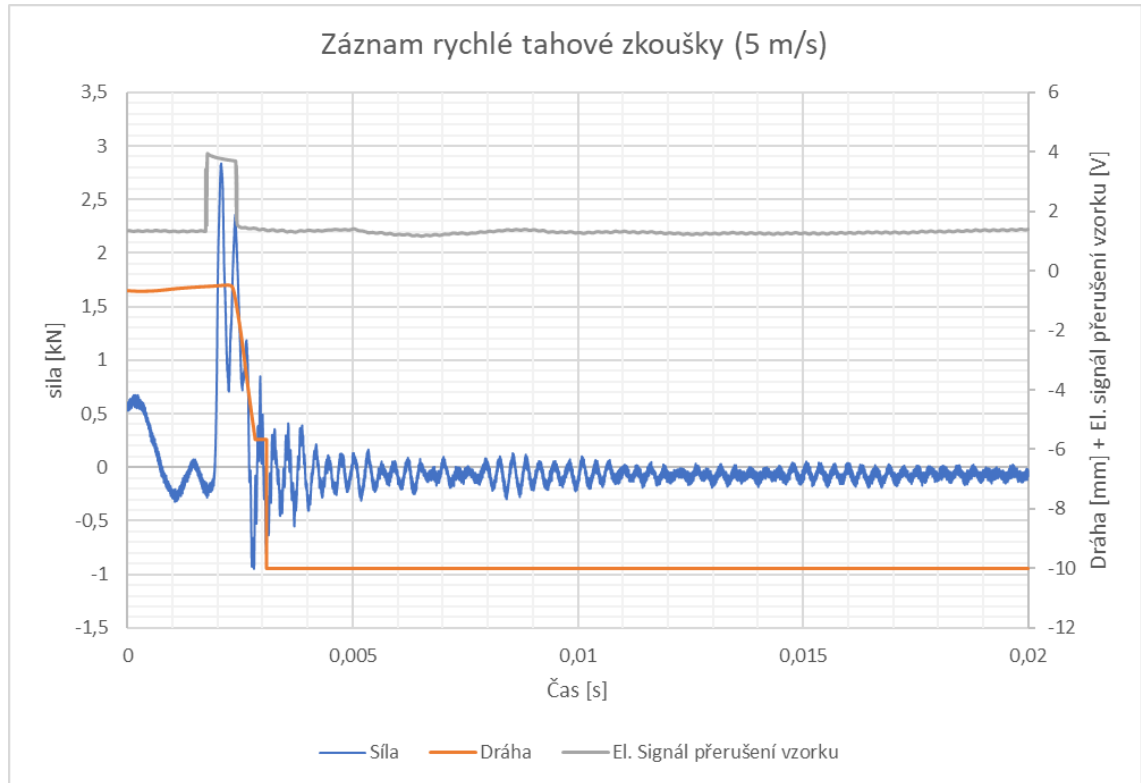
Příloha E Rychlá tahová zkouška: 10 m/s

Záznam z rychlé tahové zkoušky a jeho detail s odečtem síly pro výpočet meze pevnosti u vzorku zatíženém rychlostí čelistí 10 m/s.



Příloha F Rychlá tahová zkouška: 5 m/s

Záznam z rychlé tahové zkoušky a jeho detail s odečtem síly pro výpočet meze pevnosti u vzorku zatíženém rychlostí čelistí 5 m/s.



Příloha G *Statická tahová zkouška*

Záznam ze statické tahové zkoušky, maximum znázorňuje mez pevnosti.

