

STANOVENÍ VLIVU DĚLENÍ MATERIÁLU NA VELIKOST ZATÍŽENÍ PŘI CYKlickÉM NAMÁHÁNÍ PEVNOSTNÍHO MATERIÁLU

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 – Strojírenská technologie
Autor práce: **Bc. Vojtěch Kousal**
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

DETERMINATION OF MATERIAL CUTTING INFLUENCE ON THE SIZE OF THE LOAD UNDER CYCLIC STRESS OF STRENGTH MATERIAL

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2303T002 – Engineering Technology
Author: **Bc. Vojtěch Kousal**
Supervisor: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Liberec 2015



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Vojtěch Kousal
Osobní číslo: S12000448
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Název tématu: Stanovení vlivu dělení materiálu na velikost zatížení při cyklickém namáhání pevnostního materiálu
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie

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

1. Přehled základních materiálů používaných pro stavbu karoserie automobilu.
2. Seznámení se s problematikou provádění a vyhodnocení cyklických zkoušek materiálů.
3. Experimentální zjištění vlivu dělení materiálu na velikost zatížení při cyklickém namáhání pevnostního materiálu.
4. Vyhodnocení měření.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: grafy, tabulky
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.
- [2] ASM HANDBOOK. *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [3] ASM HANDBOOK. *Volume 14 - Forming and Forging*. 6th ed. Materials Park: ASM International, 2004. s. 978. ISBN 0-87170-020-4.
- [4] PÓHLANDT, K. *Materials Testing for the Metal Forming Industry*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.
- [5] SCHIJVE, J. *Fatigue of structures and materials*. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2009. s. 508. ISBN 978-1-4020-6807-2.
- [6] RŮŽIČKA, M., HANKE, M. A ROST, M. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989. s. 209. (dostupné z http://mechanika2.fs.cvut.cz/documents/dpz_high.pdf)

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

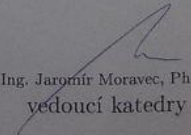
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: 2. března 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 2. června 2016


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych velice rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za vstřícné vedení, odborné rady, věnovaný čas a vynaloženou energii.

Dále bych rád poděkoval Ing. Michalu Ackermannovi za pomoc a odborné rady při měření na stroji Instron E3000.

Poslední poděkování patří mé rodině a nejbližším přátelům za psychickou podporu a pochopení v těžkých chvílích v dosavadním průběhu studia.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21005/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Anotace

Cílem diplomové práce je stanovit vliv metod dělení materiálu na cyklické namáhání vysokopevnostní oceli RA-K 40/70. Práce zahrnuje problematiku vysokopevnostních ocelí, metodu vyhodnocování cyklických zkoušek a zkoumání řezných hran. Pro jednotlivé technologie dělení materiálu jsou vytvořeny Wöhlerovy křivky. Porovnáním jednotlivých křivek zjistíme, jaký vliv mají technologie dělení materiálu na cyklickou únavu TRIP oceli.

Klíčová slova: Wöhlerova křivka, Vysokopevnostní oceli, Dělení materiálu, Cyklická únava

Annotation

The thesis aim is determinate the influence of material cutting methods to cyclic stresses of high strength steel RA-K 40/70. Work involves the issue of high strength steel, evaluating methods of cyclic tests and research of the cutting edges. For each material cutting technology are create a Wöhler's curves. Comparing of individual curves we can see, what influence have technology of material cutting on cyclic fatigue of TRIP steel.

Keywords: Wöhler curve, High strength steel, Material cutting, Cyclic fatigue

Obsah

1 Úvod	11
2 Teoretická část	12
2.1 Oceli používané v automobilovém průmyslu	12
2.2 Standardní oceli	13
2.2.1 Nízkopevnostní oceli bez intersticií (IF oceli)	13
2.2.2 Teplem vytvrditelné oceli (BH oceli)	14
2.2.3 Vysokopevnostní mikrolegované oceli (HSLA oceli)	15
2.3 Pokročilé vysokopevnostní oceli	15
2.3.1 Dvoufázové oceli (DP oceli)	16
2.3.2 Vícefázové oceli (CP oceli)	17
2.3.3 TRIP oceli	18
2.3.4 TWIP oceli	19
2.3.5 Martenzitické oceli (MS oceli)	20
2.3.6 Příklady použití vysokopevnostních ocelí	21
2.4 Cyklické zatěžování	22
2.4.1 Wöhlerova křivka (křivka S-N)	23
2.4.2 Faktory ovlivňující mez únavy	26
2.4.3 Mez únavy hladké součásti při střídavém namáhání	27
2.4.4 Vliv středního napětí na pevnost v únavě	28
2.4.5 Součinitel bezpečnosti součástí namáhaných v únavě	31
2.4.6 Únavový lom	32
2.5 Technologie dělení materiálu	34
2.5.1 Dělení materiálu laserem	34
2.5.2 Dělení materiálu vodním paprskem	35
2.5.3 Řezná hrana obrobených ploch součástí	36
2.5.4 Technologie stříhání oceli (střížná hrana)	37
3. Experimentální část	38
3.1 Zkoušený materiál	38
3.2 Příprava vzorků pro cyklické zkoušky	40
3.2.1 Vzorky řezané laserovým paprskem a jejich řezná hrana	41
3.2.2 Stříhané vzorky a jejich řezná hrana	43

3.2.3 Obráběné vzorky a jejich řezná hrana	44
3.3 Metodika měření cyklická únavy	46
3.3.1 Postup měření nízkocyklové únavy	46
3.3.2 Postup měření vysokocyklové únavy	48
3.4 Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení	50
3.4.1 Vyhodnocení cyklické únavy vzorků řezaných laserem	50
3.4.2 Vyhodnocení cyklické únavy obráběných vzorků	56
3.4.3 Vyhodnocení cyklické únavy stříhaných vzorků	59
4. Diskuze a porovnání výsledků	63
5. Závěr	65
6. Seznam použité literatury	67

Seznam použitých zkratek a symbolů

Označení	Legenda	Jednotka
a	Šířka vzorku v nejužším místě	[mm]
A_g	Homogenní tažnost	[%]
$A_{50\text{mm}}$	Celková tažnost	[%]
b	Exponent životnosti	[-]
BH	Bake Hardening	
c_i	Materiálová konstanta	[-]
c	Materiálový exponent	[-]
CP	Complex Phase	
d	Exponent životnosti	[-]
DP	Dual Phase	
E	Modul pružnosti	[MPa]
f	Frekvence zatěžování	[Hz]
F	Zatěžující síla	[N]
F_h	Maximální zatížení	[N]
HS	High Strength	
HSLA	High Strength Low Alloy	
IF	Interstitial free	
k	Součinitel bezpečnosti	[-]
ΔL	Prodloužení tyčky	[mm]
L_0	Počáteční měřená délka	[mm]
m	Exponent konstrukční oceli	[-]
MS	Martensitic	
N	Počet cyklů	[-]
N_f	Počet cyklů do porušení	[-]
R	Asymetrie cyklu	[-]
R	Smluvní napětí	[MPa]
R_e	Výrazná mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
S	Průřez nejužšího místa vzorku	[mm ²]

S_0	Počáteční průřezová plocha	[mm ²]
T	Doba trvání jednoho cyklu	[s]
t	Tloušťka plechu	[mm]
TRIP	Transformation Induced Plasticity	
TWIP	Twinning Induced Plasticity	
UHS	Ultra high strength	
V	Objem součásti	[m ³]
V_0	Objem zkušebního vzorku	[m ³]
ε	Poměrné prodloužení	[-]
ε_a	Celková deformace	[-]
ε_e	Elastická složka deformace	[-]
ε'_f	Součinitel únavové tažnosti	[-]
ε_p	Plastická složka deformace	[-]
ζ	Součinitel zpevnění	[-]
η	Součinitel jakosti povrchu	[-]
ν	Součinitel velikosti	[-]
σ	Skutečné napětí	[MPa]
σ_a	Amplitudové napětí	[MPa]
σ_c	Mez únavy	[MPa]
σ_d	Dolní (minimální) napětí	[MPa]
σ'_f	Součinitel únavové pevnosti	[MPa]
σ_F	Fiktivní napětí	[MPa]
σ_h	Horní (maximální) napětí	[MPa]
σ_m	Střední (meridiánové) napětí	[MPa]
σ_{zb}	Zbytkové napětí	[MPa]
φ	Skutečné přetvoření	[-]
φ_1	Fázový posun	[rad]
ψ	Součinitel citlivosti k asymetrii cyklu	[-]
ω	Úhlová frekvence	[rad.s ⁻¹]

1 Úvod

Není žádným tajemstvím, že se výrobci automobilů snaží zpracovávat stále větší množství materiálů s vysokou pevností. Proto byly vyvinuty vysokopevnostní oceli, které mají výborné mechanické vlastnosti, zároveň snižují celkovou hmotnost automobilu a zvyšují pasivní bezpečnost pasažérů. Snižování hmotnosti automobilu vede k menšímu procentuálnímu využití pohonných paliv, čímž se zároveň snižují náklady s tím spojené, nemluvě o lepším vlivu na životní prostředí.

Karoserie automobilu, tvořená především tvarově složitými díly, je při běžném provozu na silnicích, ať už na nerovném terénu nebo například v zatáčkách, zatěžována dynamickým namáháním. To znamená, že důležitým parametrem pro výrobu karoserií je únavová pevnost daného vysokopevnostního materiálu. Nejvíce zatěžovanými výlisky bývají komponenty, vyskytující se v podvozku automobilu. Wöhlerova křivka je tedy velmi důležitým vstupním parametrem pro výrobu těchto částí automobilu. Tato diplomová práce se bude zabývat právě touto problematikou.

Výlisky používané na stavbu karoserie automobilu se mohou vyrábět širokou škálou konvenčních a nekonvenčních metod dělení materiálu, kde každá z těchto metod má své výhody a nevýhody. Z nekonvenčních metod se nejčastěji používá řezání laserovým paprskem. Menší využití potom má řezání vodním paprskem nebo plazmou. Po těchto metodách dělení materiálu je vždy nutné upravit řeznou hranu a to především z hlediska integrity povrchu. Proto by bylo výhodné vědět, v jaké míře a jestli vůbec nám různé technologie dělení materiálu ovlivňují únavové vlastnosti materiálu.

Cílem této práce je zjistit, jaký vliv mají technologie dělení materiálu na cyklickou únavu vysokopevnostní TRIP oceli. Seznámíme se zde se zkoušeným materiálem a jeho základními mechanickými vlastnostmi, metodikou zkoušení a vyhodnocování cyklických zkoušek, zkoumáním únavových lomů a s vyhodnocováním řezných hran pro různé technologie dělení materiálu.

2 Teoretická část

2.1 Oceli používané v automobilovém průmyslu

V automobilovém průmyslu lze oceli rozdělit různými způsoby. Prvním způsobem klasifikace těchto ocelí je podle jejich pevnostních charakteristik a to do dvou skupin:

- HS oceli s mezí kluzu 210 - 550 MPa a pevností v tahu 270 - 770 MPa.
- UHS oceli s mezí kluzu větší než 550 MPa a pevností v tahu větší než 770 MPa.

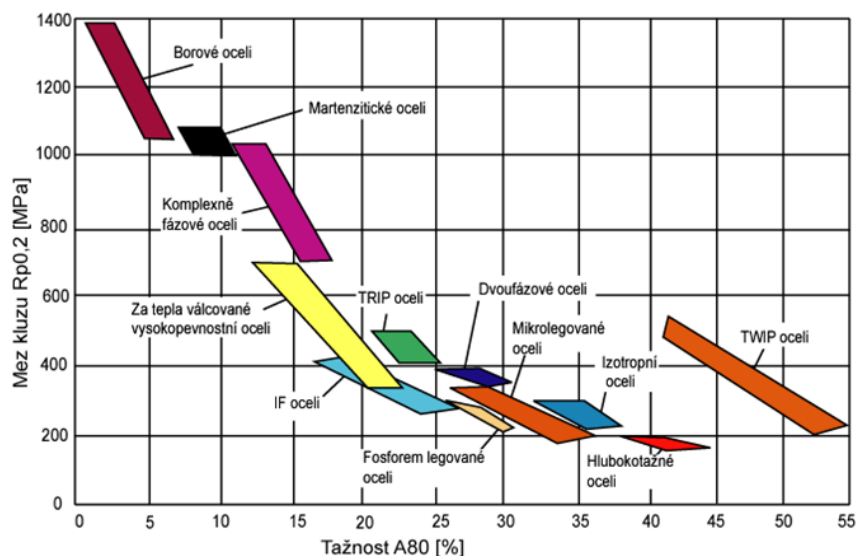
Problémem tohoto rozdělení je, že se vyvíjí stále nové třídy vysokopevnostních ocelí, které zasahují do dvou nebo více pevnostních rozsahů. [1]

Dále se dají rozdělit dle jejich metalurgie:

- Nízkopevnostní oceli (např. oceli bez intersticií).
- Konvenční oceli (např. BH oceli, nízkolegované oceli).
- Pokročilé vysokopevnostní oceli (např. DP, CP, MS, TRIP a TWIP oceli).

Hlavní rozdíl mezi konvenčními a pokročilými vysokopevnostními oceli je v jejich mikrostruktuře. Konvenční oceli mají jednofázovou feritickou mikrostrukturu, zatímco pokročilé vysokopevnostní oceli jsou vícefázové, což znamená, že kromě feritické struktury obsahují také martenzit, bainit nebo zbytkový austenit. [1]

Třetí metoda klasifikace je založena na porovnání mechanických vlastností ocelí a jejich tvářecích parametrů, jako jsou např. tažnost nebo exponent zpevnění (Obr. 1). [1]



Obr. 1 Mechanické vlastnosti vysokopevnostních ocelí [2]

2.2 Standardní oceli

Mezi nejpoužívanější typy těchto ocelí patří IF oceli (oceli bez intersticií), BH oceli (oceli vytvrzené vypékáním) a HSLA oceli (mikrolegované oceli). Pro porovnání únavových vlastností, budou u jednotlivých ocelí znázorněny jejich Wöhlerovy křivky.

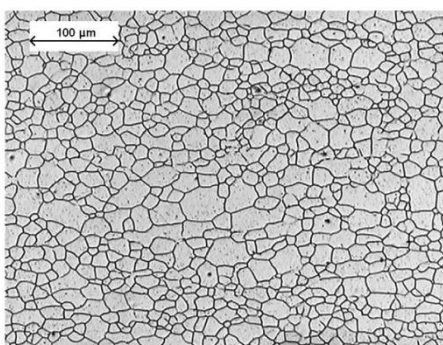
2.2.1 Nízkopevnostní oceli bez intersticií (IF oceli)

Struktura IF oceli je tvořena čistým feritem o nízké koncentraci uhlíku a její vlastnosti jsou dány velikostí feritického zrna (Obr. 2.2.1.1). Za účelem snížení zbytkového uhlíku a dusíku se do těchto ocelí přidává malé množství Ti a Nb. Předjde se tak nežádoucímu zpevnění. [3,4]

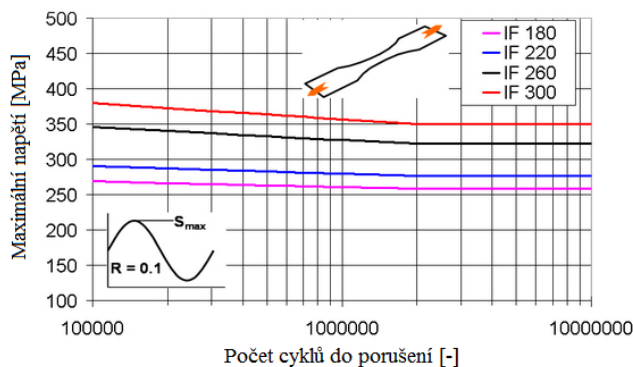
V důsledku nepřítomnosti intersticií mají nízkou mez kluzu, vysokou tažnost, vysoký koeficient normálové anizotropie a vysoký exponent deformačního zpevnění. [5]

Mez kluzu se pohybuje v rozsahu 130 – 310 MPa, mez pevnosti 270 – 400 MPa a tažnost bývá 30 – 55 %. Jsou odolné vůči stárnutí a používají se pro extrémně hluboké tažení, pro velké tvarově složité karosářské výlisky. [4]

Na Obr. 2.2.1.2 jsou znázorněny Wöhlerovy křivky pro jednotlivé druhy IF ocelí.



Obr. 2.2.1.1 Mikrostruktura oceli IF-Ti [6]



Obr. 2.2.1.2 Wöhlerova křivka pro různé druhy IF ocelí (zatížení pulzující v tahu) [6]

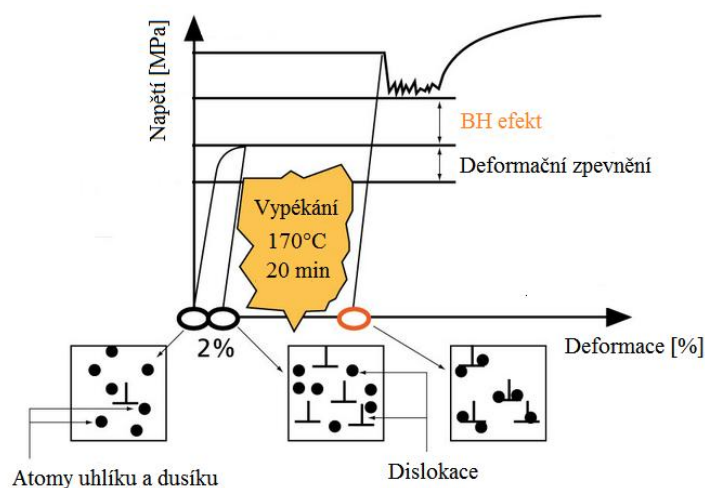
2.2.2 Teplem vytvrditelné oceli (BH oceli)

Patří do skupiny nízkouhlíkových ocelí s feritickou strukturou. Tyto oceli mají před lisováním nízkou mez kluzu a vysoké parametry plasticity. Ke zpevnění dochází tuhým roztokem Mn, P a Si. Deformačním zpevněním (např. lisováním) mohou BH oceli získat dalších 35 – 40 MPa na mezi kluzu. Svoji výslednou pevnost získávají při procesu vypalování laku, kde dochází k difúzi uhlíku a dusíku. [4]

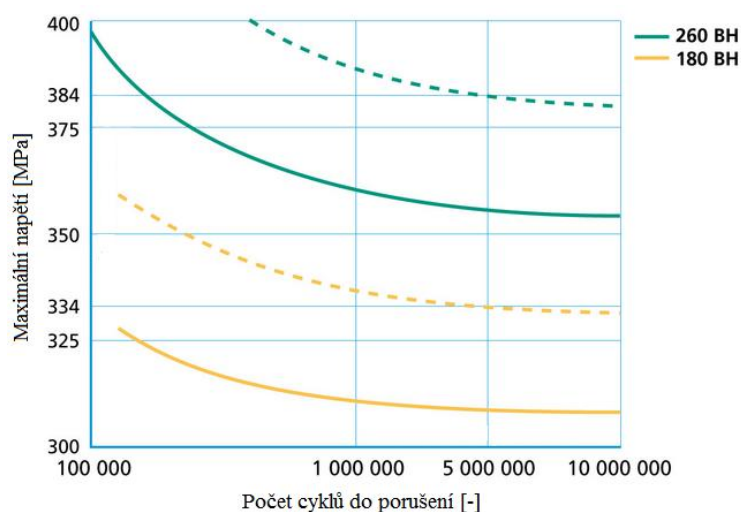
Zpevňování probíhá jako dvojstupňový proces stárnutí oceli [7], což je znázorněno na Obr. 2.2.2.1.

BH oceli se nejčastěji používají na velkoplošné výlisky dílů karoserie jako je střecha, kapota a dveře. [3,4]

Na Obr. 2.2.2.2 je znázorněn vliv vypékání BH oceli na jejich únavové vlastnosti.



Obr. 2.2.2.1 Princip BH efektu [6]



Obr. 2.2.2.2 Wöhlerova křivka pro oceli 260 BH a 180 BH po 2% prodloužení s následným vypékáním [6]

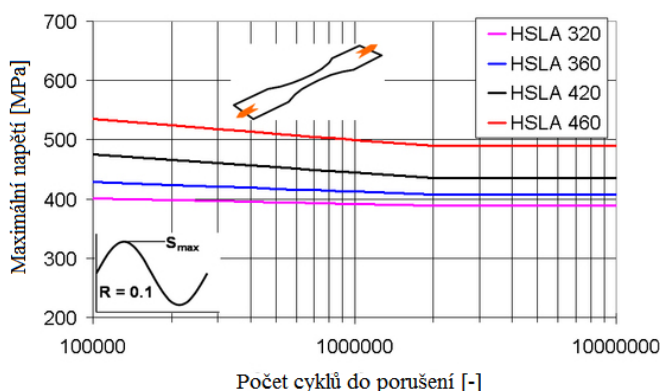
2.2.3 Vysokopevnostní mikrolegované oceli (HSLA oceli)

HSLA oceli mají lepší mechanické vlastnosti než běžné konvenční uhlíkové oceli. Obsah uhlíku se pohybuje od 0,05 do 0,26 % a obsah manganu přibližně do 1,65 %. Záleží na požadavku dobré tvářitelnosti či svařitelnosti. [4]

Dále se v různých kombinacích používají malá množství Cr, Ni, Mo, Cu, N, V, Nb, Ti, Zr v rozsahu 0,01 – 0,1%, z toho název mikrolegované. [8]

Jemnozrná mikrostruktura HSLA ocelí je různorodá. Může být feritická, feriticko - perlitická, s acikulárním feritem nebo feriticko - martenzitická. Malé množství Zr, Ca a vzácných zemin regulují tvar oxidů síry, což přispívá k lepší tvářitelnosti. Cu, Ti, V a Nb zvyšují pevnost HSLA ocelí precipitací uhlíku a roztokovým zpevněním. Používají se především na výrobu některých dynamicky namáhaných dílů podvozků, výztuže dveří, nárazníků a nosných částí karoserie. V porovnání s obyčejnými uhlíkovými oceli mají o 20 – 30% menší hmotnost při zachované pevnosti. Mají dobrou hlubokotažnost, a proto jsou vhodné pro náročné výlisky. Mez kluzu se pohybuje v intervalu 240 – 620 MPa a mez pevnosti v rozmezí 290 – 800 MPa. [4]

Na Obr. 2.2.3.1 jsou znázorněny Wöhlerovy křivky pro jednotlivé druhy HSLA ocelí.



Obr. 2.2.3.1 Wöhlerova křivka pro různé druhy HSLA ocelí válcovaných za studena (zatížení pulzní v tahu) [6]

2.3 Pokročilé vysokopevnostní oceli

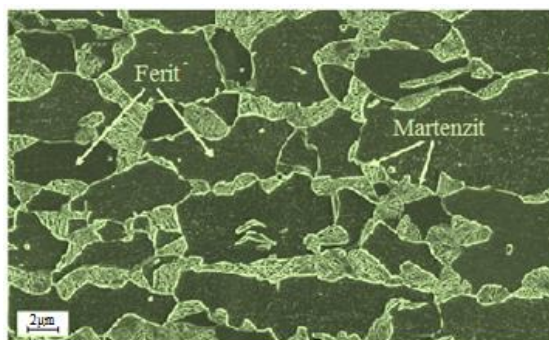
Pokročilé vysokopevnostní oceli se od standardních ocelí liší především metalurgií a způsobem zpracování. Mezi nejznámější druhy těchto ocelí, které budou dále uvedeny, patří dvoufázové oceli, vícefázové oceli, TRIP oceli, TWIP oceli a martenzitické oceli. Pro porovnání únavových vlastností, budou u jednotlivých ocelí znázorněny jejich Wöhlerovy křivky.

2.3.1 Dvoufázové oceli (DP oceli)

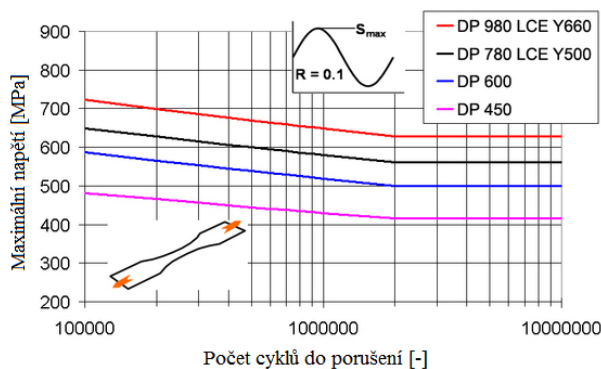
DP oceli mají feriticko - martenzitickou mikrostrukturu v poměru 70 - 90% feritu a 10 - 30% martenzitu, což je znázorněno na Obr. 2.3.1.1. Po tepelném zpracování tvoří základní matici jemnozrnny ferit, ve kterém jsou pravidelně rozložené drobné ostrůvky tvrdého martenzitu. Dvoufázovou strukturu lze získat interkritickým žiháním nebo řízeným válcováním. V prvním případě se při austenitizaci vytvoří ve feritické matici malá zrna austenitu, která se při následném ochlazování přemění na martenzit. Obsah uhlíku bývá maximálně 0,15%. [3]

DP oceli byly vyvinuty speciálně pro automobilový průmysl jako vysokopevnostní oceli s dobrou tvářitelností a svařitelností. Dalšími vlastnostmi DP ocelí je nevýrazná mez kluzu, vysoký exponent deformačního zpevnění, dobrý poměr plasticity a pevnosti a vynikající odolnost vůči šíření únavových lomů. Mez kluzu se pohybuje v rozmezí 300 - 780 MPa, mez pevnosti 400 - 1120 MPa a tažnost bývá 5 - 40%. Pevnost lze zvýšit BH efektem nebo deformačním stárnutím. Používají se pro výrobu A, B, C a D sloupků, prahů dveří, výztuhy střech, celé boční rámy karoserie a přední nárazníkové konstrukce. [4]

Na Obr. 2.3.1.2 jsou znázorněny Wöhlerovy křivky pro jednotlivé druhy DP ocelí.



Obr. 2.3.1.1 Mikrostruktura oceli DP 780 LCE Y500 [9]



Obr. 2.3.1.2 Wöhlerova křivka pro různé druhy DP ocelí (zatížení pulzující v tahu) [6]

2.3.2 Vícefázové oceli (CP oceli)

CP oceli jsou nízkouhlíkové oceli, jejich základem je jemnozrná feriticko - bainitická matrice s malým podílem perlitu, martenzitu a zbytkového austenitu (Obr. 2.3.2.1). Výrazného zjemnění zrna se dosahuje potlačením rekrystalizace nebo precipitací mikrolegujících prvků Ti a Nb. [4]

Tyto oceli mají vysokou pevnost, tvrdost, vysoký koeficient deformačního zpevnění a především vysokou schopnost absorpce mechanické energie (velkou deformační kapacitu). [1]

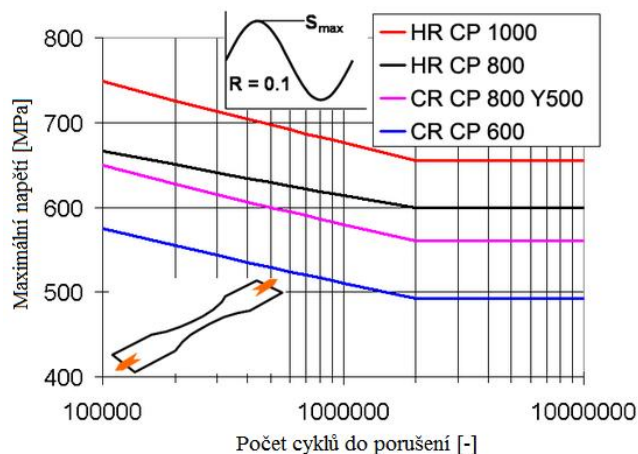
Ve srovnání s DP oceli mají výrazně vyšší mez kluzu při zachování stejné meze pevnosti v tahu. Mez kluzu se pohybuje okolo 600 - 920 MPa, mez pevnosti 780 - 1130 MPa a tažnost bývá 5 - 15%. [10]

CP oceli se používají na konstrukční prvky, které vyžadují vysokou schopnost absorpce nárazové energie, např. B sloupek, výztuže dveří a nárazníků. [4]

Na Obr. 2.3.2.2 jsou znázorněny Wöhlerovy křivky pro jednotlivé druhy CP ocelí.



Obr. 2.3.2.1 Mikrostruktura oceli CP 800 [2,6]



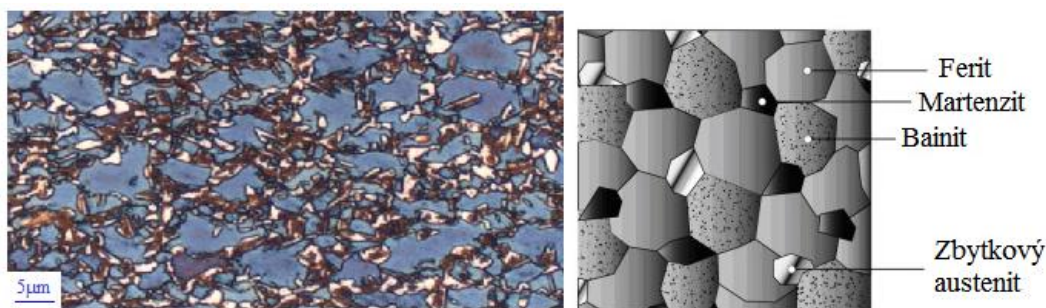
Obr. 2.3.2.2 Wöhlerova křivka pro různé druhy CP ocelí (zatížení pulzující v tahu) [6]

2.3.3 TRIP oceli

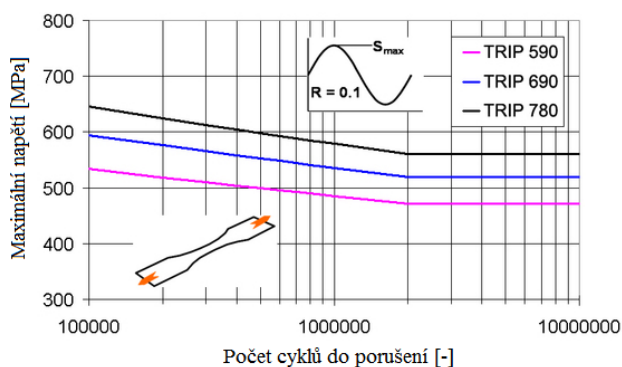
Základem mikrostruktury TRIP oceli je feritická matrice, ve které je určitý podíl zbytkového austenitu, bainitu a martenzitu (Obr. 2.3.3.1). Při deformaci dochází k transformaci zbytkového austenitu na martenzit s deskovou morfologií, čím se zvýší celková pevnost oceli. Aby se mohl uplatnit tento TRIP efekt, je nutný minimální podíl zbytkového austenitu ve struktuře oceli (5 - 10%). Toho lze dosáhnout zvýšeným obsahem uhlíku a křemíku. Křemík má ovšem nežádoucí vliv na požadovanou kvalitu povrchu TRIP oceli. Křemík se používá pro potlačení tvorby karbidů v oblasti bainitu a zároveň urychluje přeměnu feritu na bainit. Výhoda TRIP oceli spočívá ve schopnosti prodloužení (tažnost 20 - 80%) se současně vysokými pevnostními vlastnostmi (mez kluzu 390 - 800 MPa, mez pevnosti 500 - 1050 MPa). Dále se vyznačují odolností vůči ztenčení stěny při tvarování (zlepšení tvářitelnosti) a velkým deformačním zpevněním, což zvyšuje jejich schopnost absorpce energie při nárazu vozidla. [4]

Výsledkem vynikajících únavových vlastností a vysoké schopnosti absorbovat deformační energii je jejich aplikovatelnost na taková místa, jako jsou příčné a podélné nosníky karoserie, B sloupky a prahy dveří. [6]

Na Obr. 2.3.3.2 jsou znázorněny Wöhlerovy křivky pro jednotlivé druhy TRIP ocelí.



Obr. 2.3.3.1 Mikrostruktura oceli TRIP 780 (zbytkový austenit 18%) [1,6]

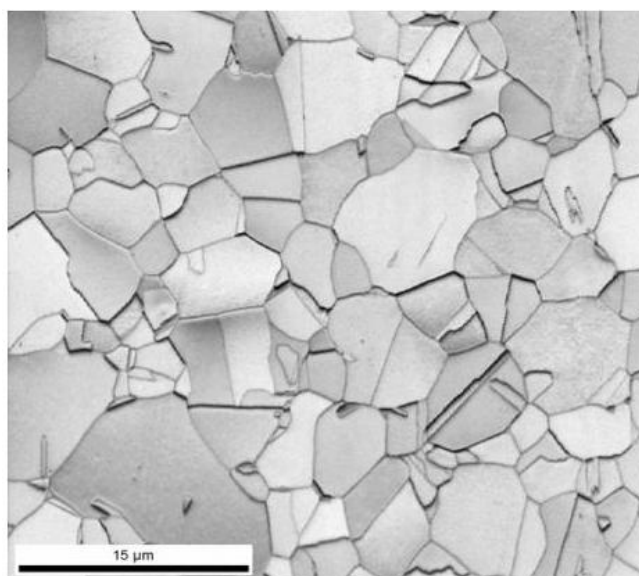


Obr. 2.3.3.2 Wöhlerova křivka pro různé druhy TRIP ocelí (zatižení pulzující v tahu) [6]

2.3.4 TWIP oceli

Vynikající mechanické vlastnosti TWIP oceli jsou zapříčiněné austenitickou strukturou, která je vysoce legovaná manganem (Obr. 2.3.4.1). Schopnost tváření je na úrovni hlubokotažných ocelí (díky deformačnímu mechanismu dvojčatění), avšak s 2x - 5x vyšší pevností. Vysoká je i schopnost deformačního zpevnění při vyšších deformacích. Oproti TRIP oceli nedochází při zatížení k deformaci austenitu, ale ke změně jeho krystalografické orientace v důsledku tvorby dvojčat. Výraznějšího TWIP efektu se dosáhne při obsahu manganu nad 20%. Obvykle je paralelně doprovázen i TRIP efektem. Při obsahu manganu pod 15% dochází pouze k TRIP efektu. Na průběh TWIP efektu se spotřebuje velké množství deformační energie. Plechy vyrobené z TWIP ocelí poskytují vyšší míru bezpečnosti v porovnání s jinými oceli a přispívají k redukci hmotnosti automobilu. Mez kluzu se pohybuje v rozmezí 280 - 1350 MPa, mez pevnosti 580 - 1470 MPa a tažnost bývá 15 - 125%. Tuto ocel je vhodné použít na boční výztuže konstrukce automobilu a na B sloupek. [4]

V případě srážky se TWIP oceli deformují, ale zachovávají si svou tvárnost. Každá část se nejdříve prodlouží, zpevní a pak předá zbytek deformační energie okolním částem, které se také zdeformují. Tím, že se energie rozloží po celém povrchu, je nárazová energie absorbována mnohem efektivněji, což dává pasažérům vozidla větší šance na přežití. [11]

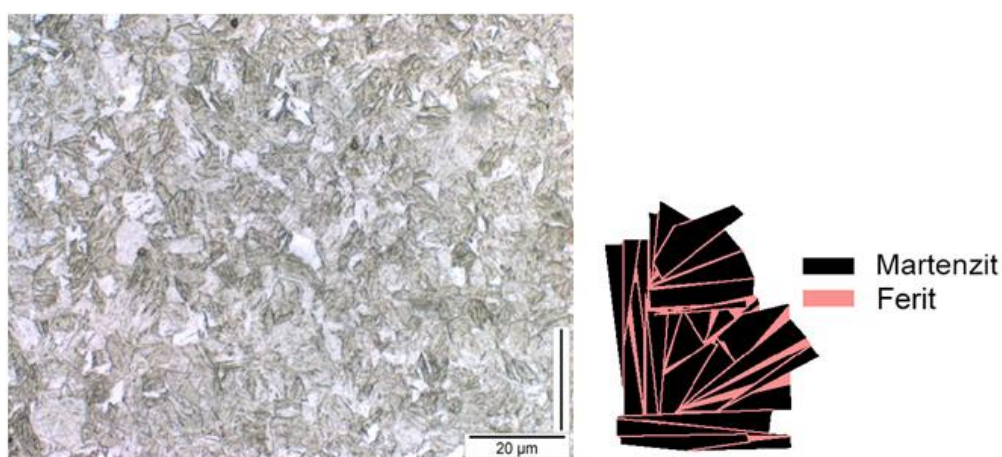


Obr. 2.3.4.1 Mikrostruktura žíhané TWIP oceli s viditelnými hranicemi po dvojčatění [1]

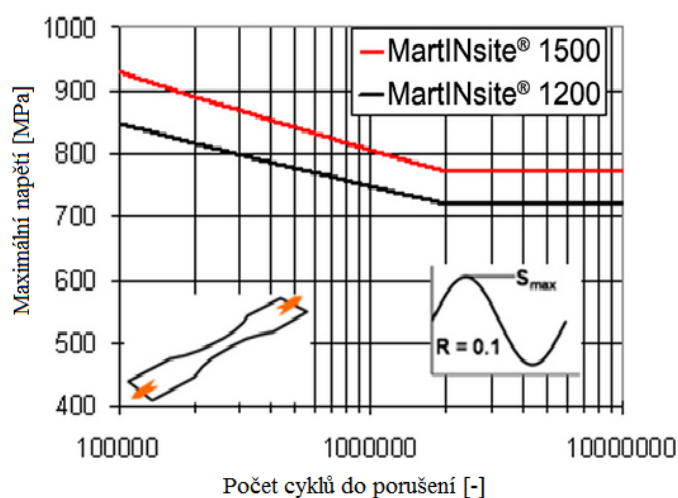
2.3.5 Martenzitické oceli (MS oceli)

Mikrostruktura sestává hlavně z martenzitu s deskovitou morfologií (nejméně 40%), který vzniká transformací austenitu během kalení, hned po válcování za tepla a žíhání (Obr. 2.3.5.1). Tyto oceli jsou často po kalení podrobeny temperování s cílem zlepšit jejich houževnatost i při velmi vysoké mezi pevnosti. V závislosti na podílu martenzitické fáze poskytují MS oceli konečnému produktu nejvyšší mez pevnosti 800 - 1650 MPa. Mez kluzu se pohybuje v rozmezí 720 - 1200 MPa a tažnost 5 - 15%. Typickými aplikacemi MS ocelí jsou prvky, které vyžadují vysokou pevnost a únavovou odolnost, při co nejužším průřezu nebo tloušťce. Velmi často se objevují jako výztuže dveří, výztuže nárazníkových partií, boční rámy karoserie apod. [4]

Na Obr. 2.3.5.2 jsou znázorněny Wöhlerovy křivky pro jednotlivé druhy MS ocelí.



Obr. 2.3.5.1 Mikrostruktura oceli MartINsite® 1500 [2,6]

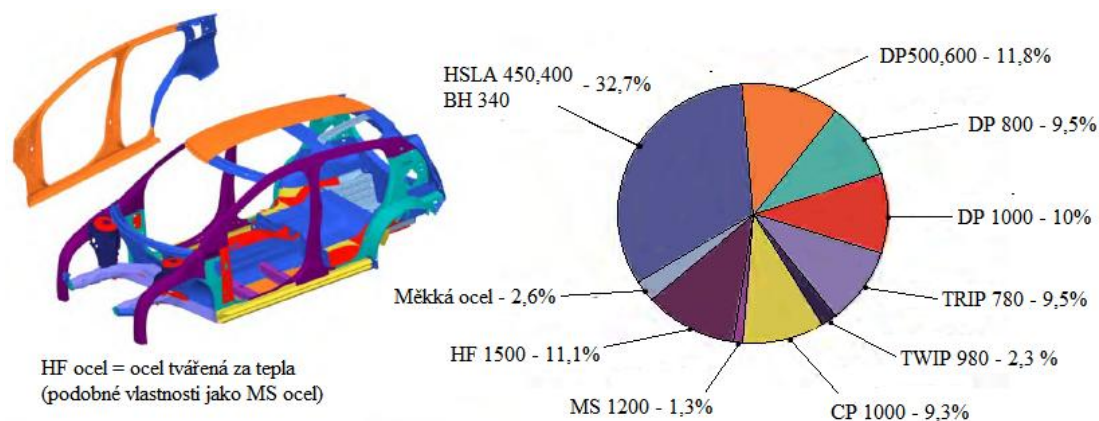


Obr. 2.3.5.2 Wöhlerova křivka pro různé druhy MS ocelí (zatižení pulzující v tahu) [6]

2.3.6 Příklady použití vysokopevnostních ocelí

Na Obr. 2.3.6.1 jsou znázorněny příklady použití vysokopevnostních ocelí na karoserii automobilu VW Golf (sedmé generace).

Na Obr. 2.3.6.2 jsou snímky aplikací jednotlivých ocelí používaných při výrobě automobilu.



Obr. 2.3.6.1 Náhled pro budoucí využití vysokopevnostních ocelí ve stavbě karoserie, které povede k celkovému snížení hmotnosti automobilu [12]



Obr. 2.3.6.2 Příklady aplikací ocelí v automobilu, a) kapota z oceli IF220, b) přední podélný nosník z oceli 300BH, c) zadní příčník potažený ocelí HSLA300
d) nárazník z oceli DP1180 e) vzpěra z oceli CP800
f) výztuž B-sloupku z oceli TRIP780 [6]

2.4 Cyklické zatěžování

Proměnné zatížení konstrukcí v čase může být deterministické (napětí je známou funkcí času) nebo stochastické (náhodné). Deterministický proces je pak buď neperiodický, nebo periodicky se opakující. Ten se vyznačuje konstantními hodnotami maximálního a minimálního napětí. Základní jednotkou zatěžování je v takovém případě zátěžný cyklus, jehož opakováním se tvoří zátěžný proces. Základní charakteristiky zátěžného cyklu jsou podle Obr. 2.4.1 následující: [13]

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2}, \quad (1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2}, \quad (2)$$

$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h}, \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{T}, \quad (4)$$

kde: σ_m ... střední (meridiánové) napětí [MPa],

T ... doba trvání jednoho cyklu [s],

σ_h ... horní (maximální) napětí [MPa],

σ_d ... dolní (minimální) napětí [MPa],

σ_a ... amplitudové napětí [MPa],

R ... asymetrie cyklu [-],

f ... frekvence zatěžování [Hz].

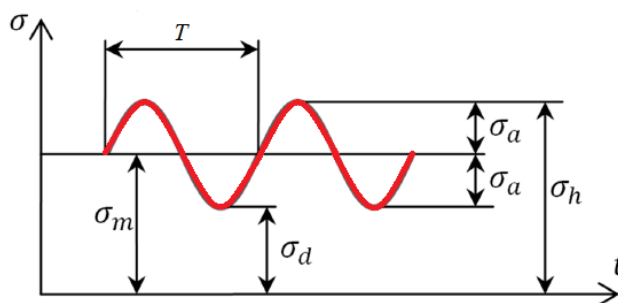
Pokud je tvar kmitu sinusový (Obr. 2.4.1), nazýváme průběh zatěžování harmonický.

Pak v libovolném čase je

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_1), \quad (5)$$

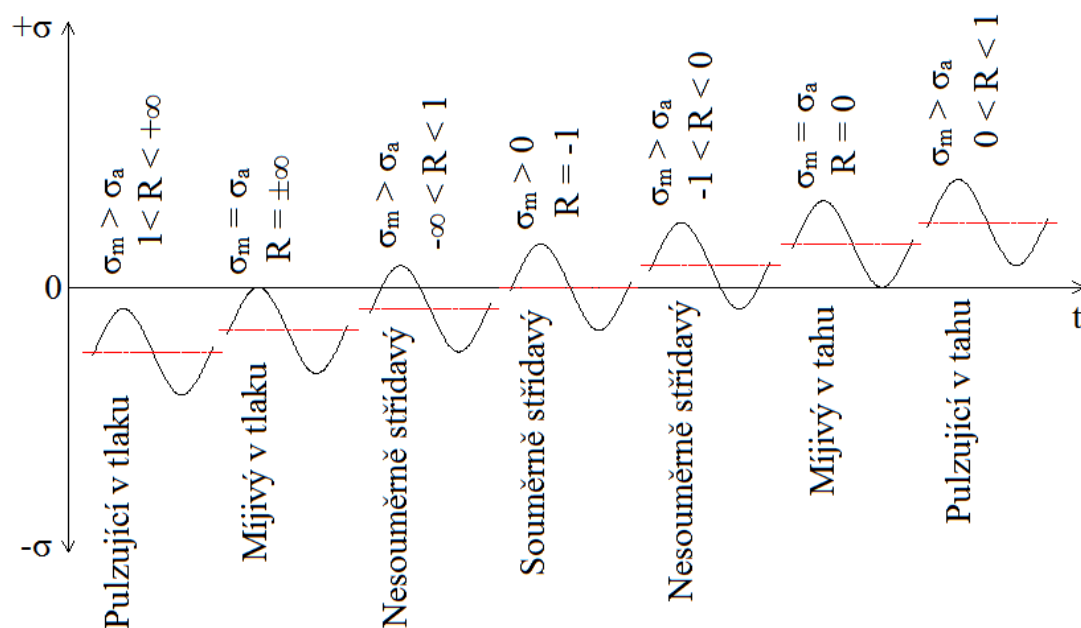
kde φ_1 je fázový posun [rad], ω je úhlová frekvence [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] a vypočte se následovně:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}. \quad (6)$$



Obr. 2.4.1 Základní charakteristiky zátěžného cyklu [14]

Většina podkladů, které jsou v literatuře k dispozici pro posouzení únavového poškození, byla získána pomocí experimentů právě při harmonickém zatěžování. Na Obr. 2.4.2 jsou uvedeny některé polohy zátěžného cyklu pro různé velikosti středního napětí harmonického zatěžování. Je třeba mít na zřetel, že zatěžování řady konstrukcí má ve skutečnosti náhodný charakter (např. namáhání rámu automobilu). [13]



Obr. 2.4.2 Typy kmitů dle nesouměrnosti [15]

2.4.1 Wöhlerova křivka (křivka S-N)

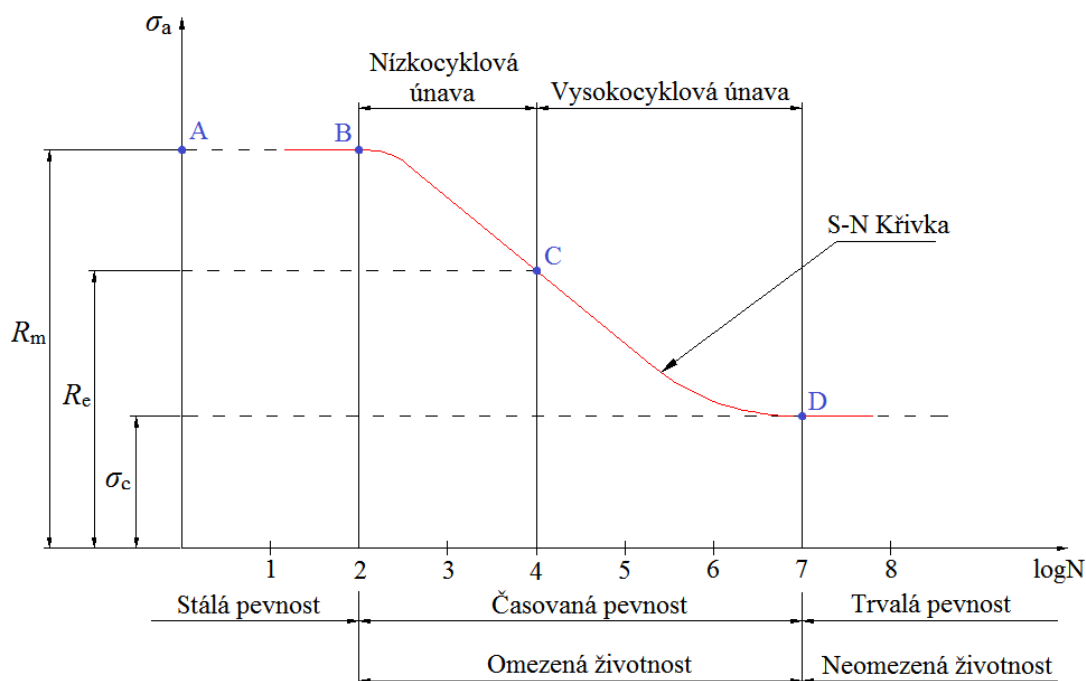
Je to závislost amplitudy napětí σ_a při harmonickém střídavém zatěžování na počtu cyklů N až do poruchy zkušební vzorku. Počet cyklů N do poruchy vzorku udává charakter jeho životnosti. [13]

Zkušební vzorek má stanovenou velikost (dle normy) a povrch, který se blíží dokonale hladkému (leštěný). [13]

Základní charakter únavové křivky napětí v souřadnicích logaritmicke-lineární pro většinu materiálů udává Obr. 2.4.1.1. V diagramu S-N existují následující oblasti:

- Oblast stále (kvazistatické) pevnosti A - B, kde se únavový jev neprojeví, napětí při poruše je dáno mezí pevnosti R_m a poruchy mají statický charakter.
- Oblast časované pevnosti, životnost vzorku je omezena počtem cyklů N . Lze ji rozdělit na oblast nízkocyklové únavy B - C, kde mezní hodnota napětí klesá

od velikosti meze pevnosti přibližně k mezi kluzu (mechanismus porušení je dán cyklováním v plastické oblasti) a na oblast vysokocyklové únavy C - D, kde velikost mezního napětí pro porušení klesá k hodnotě σ_c s neomezenou životností vzorku. [13]



Obr. 2.4.1.1 S-N křivka, kde N je počet cyklů, σ_c mez únavy, R_e výrazná mez kluzu a R_m mez pevnosti v tahu [13]

Je-li vzorek namáhán amplitudou σ_a provozního zatížení, které je menší než mez únavy, nedojde k únavovému lomu ani při nekonečně velkém počtu cyklů. Při experimentální zjišťování meze únavy je třeba zohlednit rozptyl výsledků experimentů a u udávaných σ_c je vhodné uvést procento pravděpodobnosti vzniku poruchy. Mez únavy lze nejjednodušeji vyjádřit v závislosti na mezi pevnosti vztahem [16]

$$\sigma_c = c_i \cdot R_m, \quad (7)$$

kde: c_i ... konstanta závislá na vlastnostech materiálu a způsobu namáhání [-],

R_m ... mez pevnosti v tahu [MPa].

Pro mez únavy zkušebních vzorků z konstrukční oceli platí:

pro střídavý tah-tlak $\sigma_{Ct} \cong 0,35 \cdot R_m,$

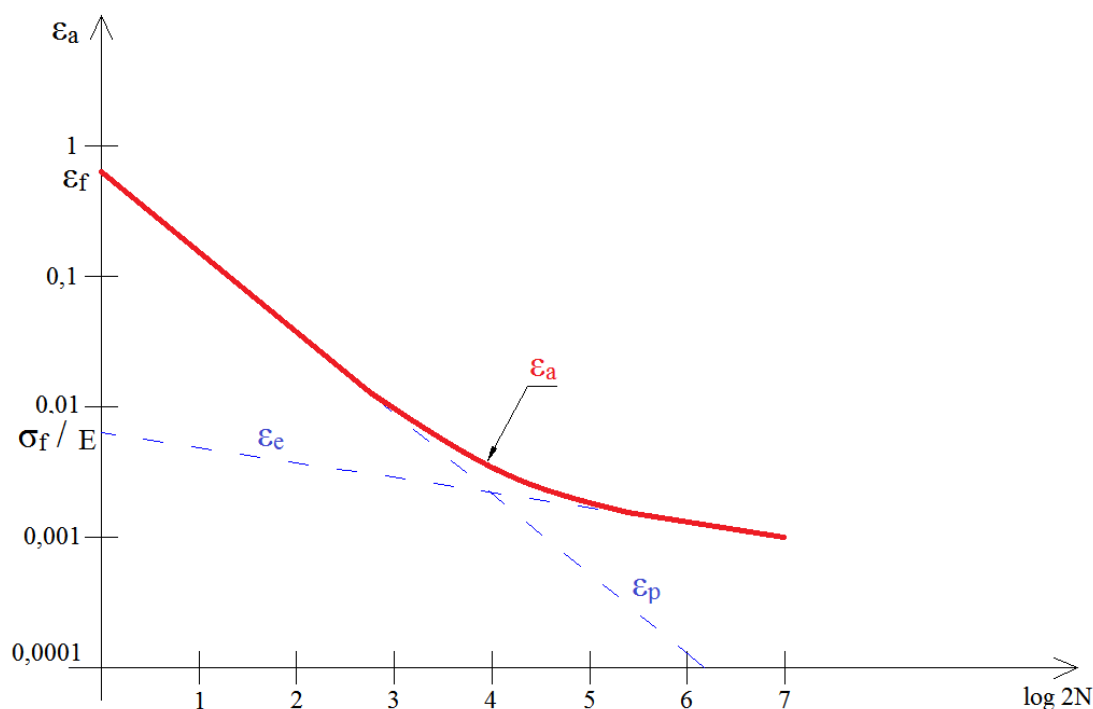
pro střídavý ohyb $\sigma_{Co} \cong 0,43 \cdot R_m,$

pro střídavý krut $\tau_c \cong 0,25 \cdot R_m.$

Experimenty pro stanovení křivky S - N se provádějí za řízené velikosti síly (tzv. měkké zatěžování), které je vhodná pro oblast vysokocyklového namáhání. V oblasti nízkocyklového namáhání se na únavovém poškození podílí především plastická složka deformace. Proto se zkoušky provádějí při řízené velikosti poměrné deformace (tzv. tvrdé zatěžování s počtem půlkmitů do lomu $2N$). Celková deformace je tvořena elastickou a plastickou složkou

$$\varepsilon_a = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma'_f}{E} + (2N)^b + \varepsilon'_f \cdot (2N)^d, \quad (8)$$

kde σ'_f je součinitel únavové pevnosti [MPa], ε'_f součinitel únavové tažnosti [-], b, d jsou exponenty životnosti [-]. [13]



Obr. 2.4.1.2 Únavová křivka deformace [13]

Na Obr. 2.4.1.2 je zakreslena únavová křivka deformace (Manson - Coffinova křivka) v závislosti na počtu $2N$ kmitů. Průběh obou složek deformace se v diagramu znázorní přímkou. [13]

V následujícím textu bude věnována pozornost především cyklickým tahovým zatížením pro konstrukční ocel, které budou hlavním problémem v experimentální části diplomové práce.

2.4.2 Faktory ovlivňující mez únavy

a) Vliv velikosti součásti na mez únavy

Experimenty všeobecně prokázaly, že mez únavy velkých vzorků je nižší než mez únavy vzorků malých. Totéž platí i pro skutečné součásti. Důvodem jsou:

- 1) S rozměry součásti roste pravděpodobnost výskytu nečistot a jiných materiálových defektů v exponované oblasti nad a pod jejím povrchem.
- 2) Při opracování velkých součástí je obtížné dodržet stejnou kvalitu celého povrchu.
- 3) Je-li napětí po průřezu rozděleno nerovnoměrně, je u velkých součástí zasažena větší část materiálu vysokou hodnotou tohoto napětí. [17]

Vliv velikosti je zahrnut do součinitele velikosti definovaného jako

$$v = \frac{\text{mez únavy skut. součásti}}{\text{mez únavy zkušebního vzorku}} \quad (9)$$

Při namáhání na střídavý tah - tlak se projeví pouze vliv technologických vad materiálu, příp. kvality opracování povrchu a vždy pro tento součinitel platí, že $v < 1$. Lze jej přibližně odhadnout srovnáním objemů součásti V a zkušebního vzorku V_0 podle vztahu

$$v = \left(\frac{V}{V_0} \right)^m, \quad (10)$$

kde doporučená hodnota exponentu m pro konstrukční ocel je $m = -0,034$. Součinitel velikosti má vliv jednak na sklon křivky S-N a také posouvá oblast časované pevnosti k jiným hodnotám N . [17]

b) Vliv jakosti povrchu součásti na mez únavy

Povrch zkušebního vzorku je standardně upraven broušením a leštěním, což v podstatě odpovídá nejkvalitnějšímu opracování, kterého lze docílit. Kvalita povrchu skutečné součásti bývá odlišná a má významný vliv na její mez únavy. Vyšší hrubost (drsnot) povrchu způsobuje zkrácení doby nukleace trhliny. Tvrdý materiál o vyšší mezi pevnosti je citlivější na kvalitu povrchu než tvárný, kde se vliv špiček napětí na povrchu ztlumí plastickou deformací. Součinitel jakosti povrchu je definován jako [17]

$$\eta = \frac{\sigma_c \text{ skutečné součásti}}{\sigma_c \text{ zkušebního vzorku s leštěným povrchem}} < 1. \quad (11)$$

c) Vliv zbytkových napětí v povrchové vrstvě na mez únavy

Všeobecně platí, že tlaková zbytková napětí v povrchové vrstvě snižují možnost šíření trhliny, která existuje na povrchu, a tedy zvyšují mez únavy tohoto místa. Toto zvýšení je tím výraznější, čím větší je spád napětí ve vrstvě pod povrchem. Tlaková zbytková napětí je možné zajistit jednorázovým přetížením o velikosti napětí nad mezi kluzu před zařazením součásti do pracovního procesu a některými technologickými úpravami. Naopak zbytková tahová napětí v povrchové vrstvě mez únavy snižují a jsou nežádoucí. Každé tlakové zbytkové napětí v povrchové vrstvě však znamená, že ve střední části průřezu až do určité hloubky pod povrchem vzniká napětí tahové, které jej drží v rovnováze. [17]

d) Vliv technologických úprav povrchové vrstvy na mez únavy

Na vlastnostech povrchové vrstvy se podílí i vlastní obráběcí proces a to spíše negativně. Větší vliv má velikost posuvu, menší řezná rychlost. Obzvláště nepříznivě se může v některých případech projevit broušení, kde může dojít k oduhličení povrchové vrstvy. Povrchová úprava galvanickým pokovováním vytváří v povrchové vrstvě tahová zbytková napětí a je tedy z hlediska únavy nevhodná. Ostatní technologické úpravy (chemicko-tepelné zpracování, tepelné zpracování, mechanické zpevňování a kombinace předchozích) způsobují v povrchové vrstvě tlaková napětí. Tyto úpravy zvyšují kromě meze únavy také odolnost proti opotřebení a kontaktní únosnost. Zvýšení meze únavy technologickými úpravami lze odhadnout pomocí součinitele zpevnění, který je definován jako [17]

$$\zeta = \frac{\sigma_c \text{ souč. se zpev. povrchovou vrstvou}}{\sigma_c \text{ nezpevněné souč.}} \quad (12)$$

2.4.3 Mez únavy hladké součásti při střídavém namáhání

Všechny uvedené vlivy se projeví na tvaru křivky S - N a to nejen změnou velikosti meze únavy, ale také změnou sklonu její střední větve a posuvem začátku oblasti trvalé pevnosti k jinému počtu kmitů. Mez únavy skutečné hladké součásti (tj. součásti bez náhlé změny tvaru) pro střídavý tah-tlak lze na rozdíl od zkušebního vzorku vyjádřit rovnicí

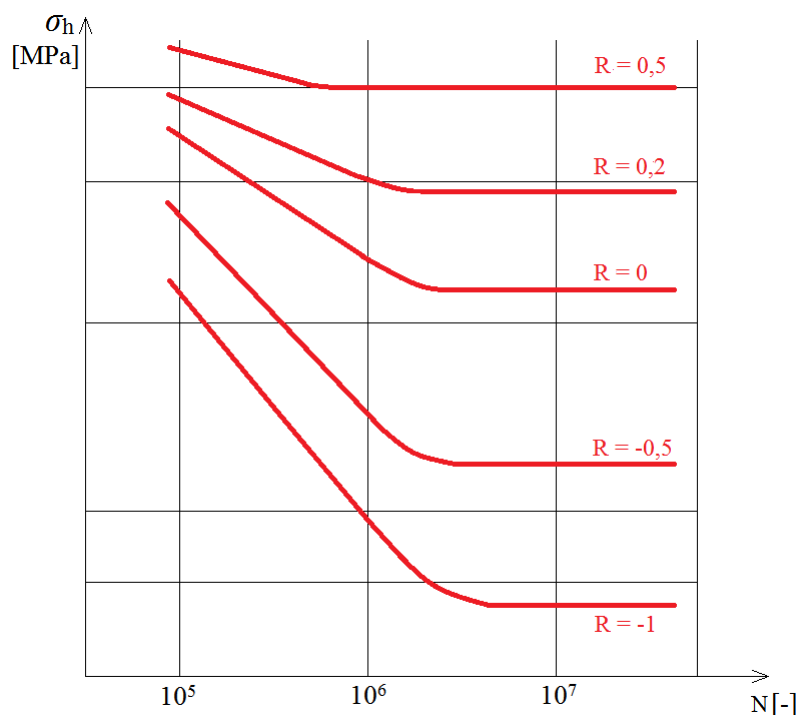
$$\sigma_c = 0,35 \cdot R_m \cdot v \cdot \eta \quad (13)$$

Rovnici pro výpočet meze únavy lze ještě upravit součinitelem zpevnění, případně dalšími koeficienty, které vyplynou z experimentálního ověření. U dalších faktorů

ovlivňujících velikost meze únavy, je třeba uvážit, zda daný vliv způsobí snížení nebo zvýšení a přihlídnout k němu při určování hodnocení mezního stavu součásti. [17]

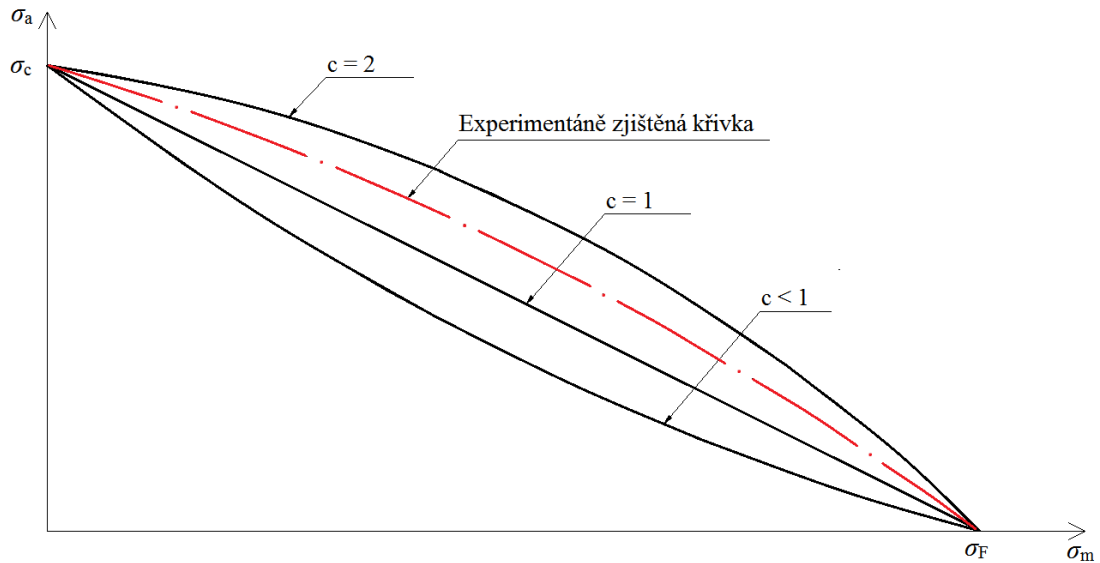
2.4.4 Vliv středního napětí na pevnost v únavě

Dosud se stále předpokládal střídavý průběh napětí v čase. Je-li průběh míjivý nebo pulzující, změní se hodnoty namáhané součásti. Tahová střední napětí její únosnost snižují, tlaková napětí ji významně neovlivní nebo ji dokonce zvyšují. Část středního napětí je dána vlastním zátěžným cyklem, její druhou část neznáme. Ovlivní ji zbytková napětí v povrchové vrstvě. Na Obr. 2.4.4.1 jsou zakresleny S - N křivky pro různé hodnoty σ_m při různé asymetrii cyklu. [13]



Obr. 2.4.4.1 S-N křivky pro různé velikosti středního napětí [13]

Na Obr. 2.4.4.2 je v souřadnicích σ_m , σ_a (tzv. Haighův diagram) znázorněna mezní čára konkrétní součásti. Je to experimentálně zjištěná křivka. Nemá-li se součást poškodit únavovým lomem, musí bod, daný hodnotami provozních napětí σ_m , σ_a , ležet v oblasti pod touto křivkou. Z praktických důvodů se experimentálně určená křivka nahrazuje jednoduššími tvary různými způsoby. [18]



Obr. 2.4.4.2 Různé varianty mezní čáry v Haighově diagramu, kde σ_F je fiktivní střední napětí [18]

a) Nahrazení jednou křivkou

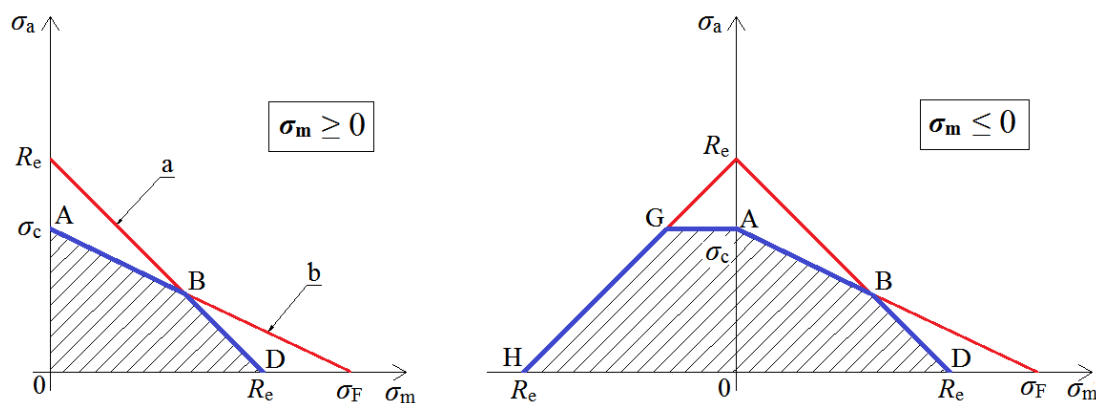
Experimentální křivku lze pro tahová namáhání popsat rovnicí

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_F}\right)^c = 1. \quad (14)$$

Přesnou hodnotu exponentu c pro konkrétní materiál lze získat experimentem. Pro přibližnou aproximaci mezní křivky lze předpokládat exponent $c = 1$, ($c \leq 1$), který vyhovuje vysokopevnostními ocelím, slitinám a litině. Pro $c = 1$ přejde mezní čára v přímku (tzv. Goodmanova přímka). Pro měkké ocele a všeobecně houževnaté materiály se osvědčila spíše hodnota $c = 2$. Napětí σ_F je tzv. fiktivní střední napětí, které je závislé na součiniteli plasticity. Pro tahové namáhání je možno pro obecný tvar průřezu nahradit σ_F mezí pevnosti materiálu R_m . [18]

b) Nahrazení dvěma přímkami

Je-li třeba vyhovět podmínce vyloučení trvalých deformací, nahrazuje se mezní čára dvěma přímkami dle Obr. 2.4.4.3. Skutečné namáhání součásti, dané provozními napětími σ_m , σ_a , musí být v grafu znázorněno pracovním bodem ve vyšrafované oblasti.



Obr. 2.4.4.3 Nahrazení mezní čáry dvěma přímkami [18]

Rovnice přímek a,b pro hladkou součást jsou

$$\text{přímka a:} \quad \sigma_a + \psi \cdot \sigma_m = \sigma_c, \quad (15)$$

$$\text{přímka b:} \quad \sigma_a + \sigma_m = R_e, \quad (16)$$

kde ψ udává sklon tečny k mezní čáře a pro $\sigma_m = 0$. Tento tzv. součinitel citlivosti k asymetrii cyklu [-] je definován následovně

$$\psi = \frac{\sigma_c - \sigma_{c_m}}{\sigma_{c_m}}, \quad (17)$$

kde σ_{c_m} je mez únavy při mívivém cyklu zatěžování [MPa]. Pro ocel jsou velikosti ψ uvedeny v Tab. 2.4.4.1 v závislosti na meze pevnosti. Fiktivní napětí je při tomto nahrazení odhadnuto vztahem

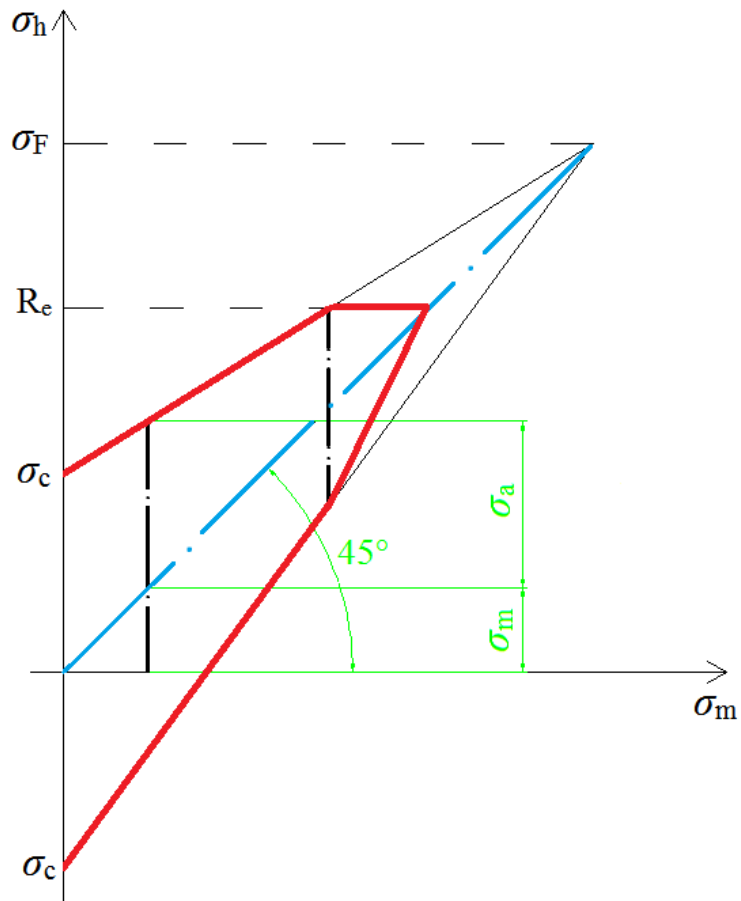
$$\sigma_F \approx \frac{\sigma_c}{\psi}. \quad (18)$$

Tab. 2.4.4.1 Součinitel ψ v závislosti na mezi pevnosti oceli [19]

R_m	350 – 550	550 – 750	750 – 1000	1000 – 1200
ψ	MPa	MPa	MPa	MPa
Tah	0,10	0,15	0,20	0,25 – 0,30

Přímka a se někdy nazývá dynamická a přímka b statická přímka. [18]

Obdobným typem diagramu, který se v technické praxi pro svou názornost a větší možnost získání podkladů pro konkrétní materiály často používá, je diagram Smithův. Zde se pracuje s proměnnými σ_m , σ_h . Složky daného cyklu napětí σ_m , σ_a se odečítají od osy symetrie 1. kvadrantu. Na Obr. 2.4.4.4 je zjednodušená varianta diagramu při nahrazení mezní čáry přímkami. [18]



Obr. 2.4.4.4 Smithův diagram [18]

2.4.5 Součinitel bezpečnosti součástí namáhaných v únavě

Součinitel bezpečnosti určuje, kolikrát musí vzrůst provozní napětí, aby se dosáhlo mezního stavu, tj. aby nastala porucha. Od součásti se často vyžaduje, aby byla schopna snášet pracovní zatížení po celou dobu jejího provozu. Přitom je třeba na součásti sledovat jednak místa nesoucí maximální zatížení, tak veškerá místa, kde se vyskytují vruby. Každému z těchto míst přísluší určitý součinitel bezpečnosti k_i . Nejmenší z těchto hodnot je skutečný součinitel bezpečnosti celé součásti. [13]

Při střídavém namáhání je součinitel bezpečnosti k [-] pro hladkou součást dán vztahem

$$k = \frac{\sigma_c}{\sigma_a}. \quad (19)$$

Při namáhání pulzujícím je nutné přihlídnout k charakteru provozního zatížení. Zde jsou dva základní případy:

A. Při změně zatížení se změní amplitudová i střední složka zatížení

B. Při změně zatížení se změní pouze amplitudová složka zatížení, střední napětí zůstává konstantní.

Vztah pro výpočet součinitele bezpečnosti závisí na způsobu nahrazení mezní čáry.

a) Nahrazení mezní čáry jednou přímkou

Bezpečnost podle A pro hladkou součást zatíženou tahovým namáháním se vypočte

$$k = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_c} + \frac{\sigma_m}{\sigma_F} \right)^{-1}. \quad (20)$$

Bezpečnost podle B pro hladkou součást zatíženou tahovým namáháním se vypočte

$$k = \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_F} \right) \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_a}. \quad (21)$$

b) Nahrazení mezní čáry dvěma přímkami

Součinitel bezpečnosti je třeba určit z rovnic obou přímek. Bezpečnost podle A pro hladkou součást se vypočte

$$k_a = \frac{\sigma_c}{\sigma_a + \psi \cdot \sigma_m}, \quad k_b = \frac{R_e}{\sigma_a + \sigma_m}, \quad (22)$$

kde skutečná bezpečnost daného místa součásti je menší z hodnot k_a, k_b .

Bezpečnost podle B pro hladkou součást se vypočte

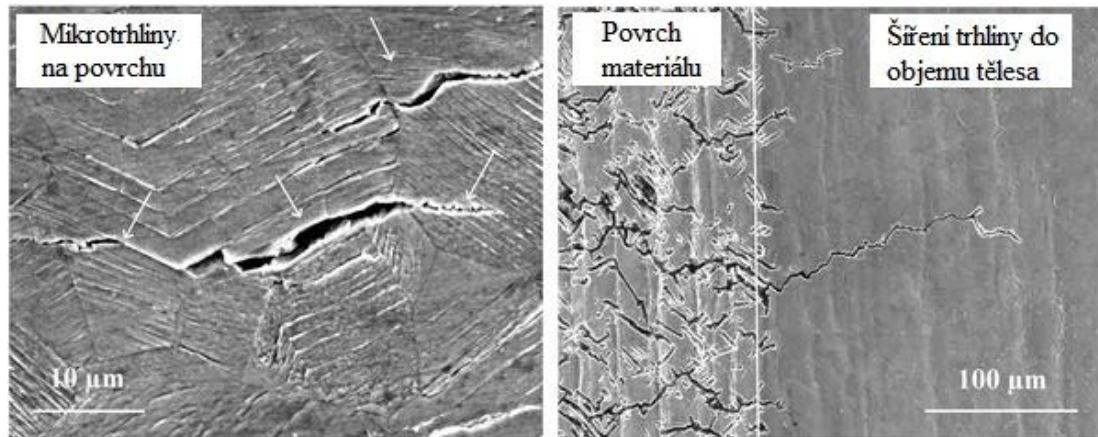
$$k_a = \frac{\sigma_c - \psi \cdot \sigma_m}{\sigma_a}, \quad k_b = \frac{R_e - \sigma_m}{\sigma_a}, \quad (23)$$

kde skutečná bezpečnost daného místa součásti je opět menší z hodnot k_a, k_b . [13]

2.4.6 Únavový lom

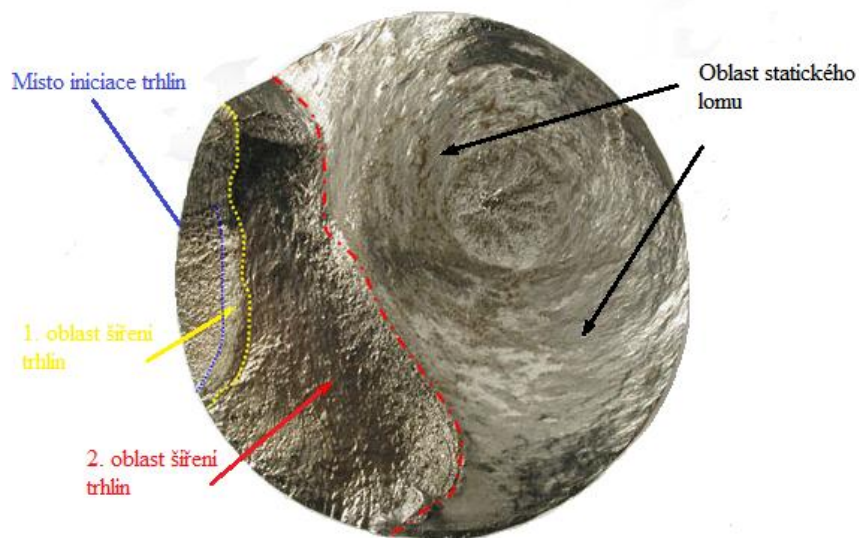
Únavové poškození je od počátku zatěžování nevratným dějem a je často viditelné až v pokročilé fázi. Objasnění počátků jevu je třeba hledat v mikrostrukturu materiálu. Při tom je nutno opustit předpoklad materiálu homogenního. Dochází ke změnám mechanických vlastností materiálu a nukleaci trhliny z důvodu cyklické plastické deformace v některých exponovaných místech tělesa. Trhlinou je míněno ohraničené částečné porušení spjitosti materiálu. Všeobecně platí, že trhlina vzniká na povrchu anebo velmi blízko pod povrchem tělesa. Trhlina se nejprve šíří pod úhlem $\pi / 4$ vzhledem k povrchu, její rozměr je dán mikrostrukturou materiálu (tzv. mikrotrhlina). Prostředí je nehomogenní a proces se neřídí zákony mechaniky kontinua. Další šíření trhliny již v rozměrech makrostruktury (makrotrhlina) se děje na jejím čele, většinou kolmo ke směru největšího normálového napětí a to po etapách, vždy po určitém počtu absolvovaných cyklů. Šíření makrotrhliny probíhá podle zákonů lomové mechaniky. Povrch trhliny se při jejím opakovaném rozevírání

a zavírání obrušuje. Bývá hladký, někdy s lasturovitými čarami podle jeho různého okysličení v obdobích mezi jednotlivými etapami šíření trhliny. Trhlina se šíří pouze působením tahových napětí. Šíření trhliny při únavovém poškození je znázorněno na Obr. 2.4.6.1. [20]



Obr. 2.4.6.1 Mikrotrhliny a jejich šíření do objemu tělesa [21]

Je-li zbývající průřez tak zeslaben, že není schopen přenést ani statické zatížení (i s ohledem na případné změny materiálových vlastností při únavovém poškození), dojde ke křehkému dolomu. Vzhled únavového lomu je znázorněn na Obr. 2.4.6.2. Ze skutečného vzhledu lomu lze vyčíst některá fakta o namáhané součásti. Je to např. způsob namáhání podle tvaru hladké části lomové plochy, počet cyklů do lomu atd. [20]



Obr. 2.4.6.2 Vzhled únavového lomu [22]

2.5 Technologie dělení materiálu

V následujícím textu budou popsány různé metody dělení materiálů (laser, vodní paprsek, stříhání a obrábění) a jejich vliv na výsledné vlastnosti řezné hrany.

2.5.1 Dělení materiálu laserem

Na kvalitu povrchu řezné hrany, při řezání laserovým paprskem, mají z hlediska drsnosti povrchu především vliv tyto parametry:

- a) Procesní parametry: výkon laseru, rychlost posuvu, šířka vytvořené drážky, druh paprsku, ohnisková vzdálenost, průměr zaostřeného paprsku, úhel vychýlení paprsku a druh přídavného plynu.
- b) Parametry materiálu obrobku: fyzikálně – chemické vlastnosti materiálu, typ materiálu a tepelně – fyzikální vlastnosti materiálu.
- c) Kvalita řezu: velikost jednotlivých zón řezu, drsnost povrchu řezné drážky, zaoblení hran vlivem řezání, nepravidelnost hran, šířka tepelně ovlivněné oblasti, odchylka kolmosti, tvoření trhlin, množství otřepů, úbytek materiálu, změna struktury materiálu, zpevnění materiálu a velikost zbytkových napětí. [23]

Tepelně ovlivněná zóna (Obr. 2.5.1.1) je oblast materiálu, ve které došlo k ovlivnění struktury základního materiálu vlivem vysoké teploty. Dochází zde ke zhrubnutí zrna, změně chemického složení povrchové vrstvy, tvorbě trhlin, zvýšení povrchového napětí (deformace povrchu) a ke změnám mechanických vlastností v povrchové vrstvě. [23]



Obr. 2.5.1.1 Tepelně ovlivněná oblast feriticko - perlitické mikrostruktury [23]

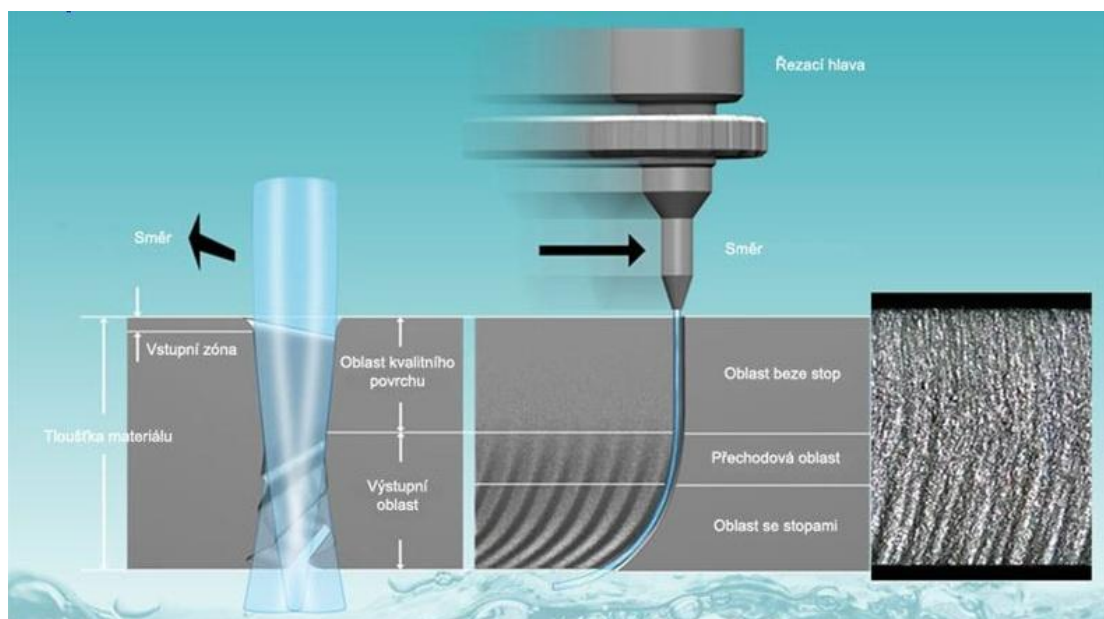
2.5.2 Dělení materiálu vodním paprskem

Hlavní předností řezání materiálu vodním paprskem je skutečnost, že materiál není nijak silově namáhán a nedochází zde k tepelnému ovlivnění rezné hrany. Tato skutečnost je velmi důležitá a také rozhodujícím způsobem odděluje vodní paprsek od ostatních metod dělení materiálu. Dále pak nedochází k deformačnímu zpevnění a nevzniká otřep. Nelze však vyloučit deformaci díky vlastnímu napětí v materiálu. Nevýhodou je nevyhnutelný kontakt s vodou a většinou i s abrazivním materiálem, což může vést k nástupu povrchové koroze. Při horších kvalitativních stupních řezu u silnějších materiálů dochází k deformaci kontury řezu ve spodní hraně vlivem tzv. výběhu paprsků (Obr. 2.5.2.1). [24]

Můžeme řezat v různých kvalitách řezu (Obr. 2.5.2.2) od nejlepší Q5 až po hrubý dělicí řez Q1, na kterou mají vliv především průměr trysky, tlak vody, rychlost paprsku, vzdálenost trysky od povrchu materiálu, úhel sklonu paprsku a druh použitého abraziva. Vznik a velikost úkosů ovlivňuje rezná rychlost, druh a tloušťka materiálu, tvar řezu, množství abraziva aj. [25]



Obr. 2.5.2.2 Hodnocení kvality řezu vodním paprskem [25]

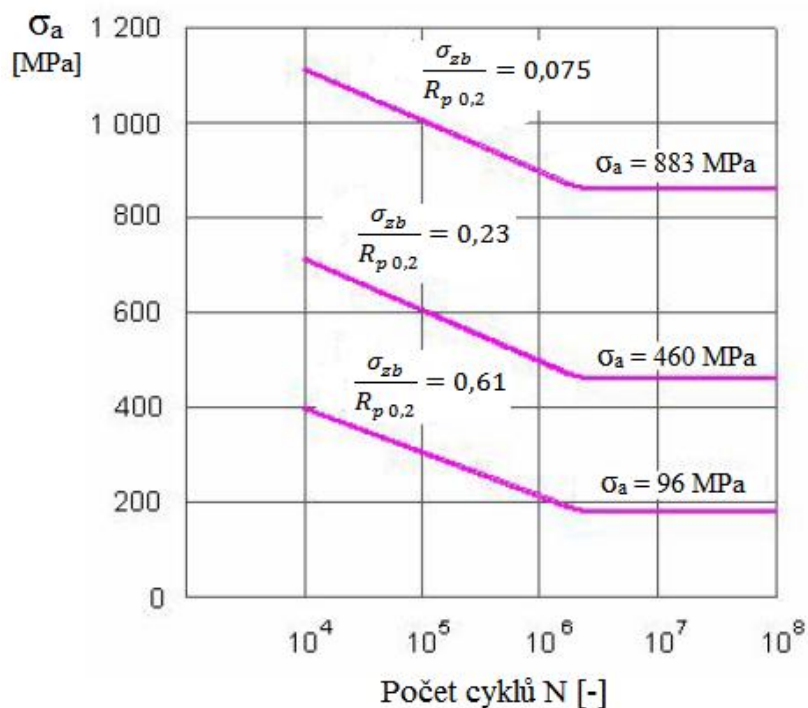


Obr. 2.5.2.1 Vznik rýhování vlivem vychýlení vodního paprsku [25]

2.5.3 Řezná hrana obrobených ploch součástí

Vlastnosti obrobené povrchové vrstvy jsou vyjadřovány strukturními změnami, stupněm zpevnění, které jsou úměrné velikosti zbytkových napětí. Vzhledem k tomu, že intenzita procesu řezání se stále zvyšuje v důsledku dalšího růstu vyšších řezných rychlostí a vyššího energetického působení na břit nástroje, je nutno počítat s tím, že vlastnosti povrchové vrstvy součásti se mohou výrazně měnit vzhledem k vlastnostem materiálu ve větší vzdálenosti od povrchu. Hlavní příčinou vzniku zbytkových napětí jsou nerovnoměrná plastická deformace v obrobeném povrchu, nerovnoměrný ohřev a ochlazování, které vyvolává jeho roztažení a smrštění, nerovnoměrné změny struktury, vyvolané působením tepla a mechanických sil a chemické procesy, spojené s reakcí částic pronikajících do povrchové vrstvy. [26]

Při obrábění je podstatou vzniku zbytkových napětí pružně - elastická deformace v oblasti tvoření třísky. I když na jakost povrchové vrstvy má největší vliv poslední operace, může při nevhodně zvoleném sledu operací zůstat v povrchové vrstvě zachováno ovlivnění z operací předchozích. Tahová zbytková napětí únavovou pevnost snižují, tlaková zbytková napětí ji naopak zvyšují (Obr. 2.5.3.1). [26]



Obr. 2.5.3.1 Vliv zbytkových napětí po obrábění na mez únavy v ohybu, kde σ_{zb} je velikost zbytkových napětí, $R_{p0,2}$ je smluvní mez kluzu materiálu [26]

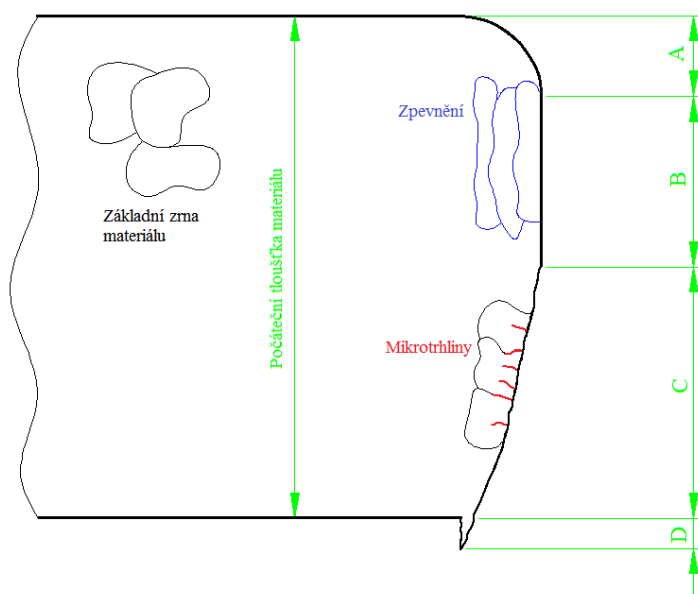
2.5.4 Technologie stříhání oceli (střížná hrana)

Jedná se o mechanický způsob dělení materiálu, při kterém dochází k oddělení materiálu mezi dvěma břity působením smykového napětí. Jedním z nejdůležitějších parametrů, který má vliv na následné plastické vlastnosti střížné hrany, je střížná mezera. [25]

Průběh střížného procesu lze popsat čtyřmi fázemi:

- 1) V první fázi dosedne střížník na materiál a dochází k pružným deformacím (materiál se pružně vtlačuje a ohýbá do střížnice).
- 2) V druhé fázi nástroj vniká do materiálu a dochází k trvalým (plastickým) deformacím, kde se napětí nachází blízko meze pevnosti ve smyku.
- 3) Při třetí fázi dojde k porušení materiálu smykem a k tvorbě mikrotrhlin s jejich následným šířením (makrotrhliny).
- 4) Poslední fází je oddělení materiálu, ke kterému dojde propojením trhlin od střížnice a střížníku. Na stříhaném materiálu vzniká ořep. [25]

Na Obr. 2.5.4.1 jsou znázorněny vady střížné hrany, které se vyhodnocují po procesu stříhání. V oblasti A dochází k zaoblení vlivem velikosti střížné mezery, v oblasti B se vysoce zpevní materiál v důsledku plastického stříhu, v oblasti C dochází k utržení materiálu důsledkem tahových napětí (vznik mikrotrhlin) a D je oblast vzniku ořepu. [25]



Obr. 2.5.4.1 Vady střížné hrany [25]

3. Experimentální část

Cílem experimentální části diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv mají jednotlivé technologie dělení materiálu (stříhání, obrábění, řezání laserem) na cyklické namáhání vysokopevnostní oceli RA-K 40/70.

Seznámíme se zde se zkoušeným materiálem, provedeme statickou zkoušku tahem a zjistíme jeho základní mechanické vlastnosti. Metodou stříhání, obrábění a řezání laserovým paprskem si připravíme zkušební vzorky na zkoušky cyklického namáhání. Vyhodnotíme kvalitu řezné hrany pro jednotlivé technologie dělení materiálu. Dále si přiblížíme metodiku měření cyklického namáhání v oblasti nízkocyklové a vysokocyklové únavy vysokopevnostní oceli, kde se také seznámíme se zkušebními stroji. Z naměřených a vypočtených hodnot vytvoříme Wöhlerovy křivky cyklické únavy pro jednotlivé technologie dělení materiálu. Nakonec tyto křivky porovnáme a zjistíme, jaký vliv mají jednotlivé metody dělení materiálu na cyklické namáhání TRIP oceli. Očekává se, že tento vliv bude značný. Nejpozitivnější vliv by měly mít vzorky připravené metodou obrábění, které také budeme brát jako referenční.

Příprava vzorků a všechna měření byla prováděna v ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace Technické univerzity v Liberci.

3.1 Zkoušený materiál

Jako experimentální materiál byla vybrána ocel z řady pokročilých vysokopevnostních ocelí, tzv. TRIP ocel pod označením RA-K 40/70. Tato ocel se nejčastěji používá v automobilovém průmyslu pro posílení částí podvozků automobilů.

Mechanické vlastnosti TRIP oceli byly měřeny metodou statické tahové zkoušky na modernizovaném univerzálním trhacím stroji TIRAtest 2300 dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Zkušební vzorky byly odebrány v souladu s normou ČSN EN ISO 377, která stanovuje zásady odběru a zpracování zkušebních vzorků z oceli pro mechanické zkoušení.

Vzorky byly odebrány z pásu plechu o tloušťce 1,5 mm, který byl válcován za studena. Protože pásy plechu válcované za studena vykazují značnou anizotropii materiálu (ve všech směrech vykazuje jiné mechanické vlastnosti), byly vzorky

odebrány v různých úhlech na směr válcování. Nejčastěji se odebírají pod úhlem 0°, 45° a 90° na směr válcování. Pro každý směr bylo odebráno 5 vzorků.

Pro všechny vzorky byla provedena tahová zkouška. Nejprve byla zkušební tyčka upnuta do mechanických čelistí. Následně byl na zkušební tyčku upevněn průtahoměr, který nám odečítá okamžité prodloužení, které vzniká při zatěžování. V počítačovém softwaru se nastavily základní parametry tahové zkoušky dle normy (např. rychlost zatěžování, počáteční délka vzorku atd.) Poté mohla být zkouška spuštěna. Po přetržení se do tabulky zaznamenaly výsledné hodnoty okamžitých zatěžování a k nim příslušné hodnoty okamžitých prodloužení. Z těchto hodnot si nadále vypočteme smluvní napětí R [MPa] a poměrné prodloužení ε [-] podle vztahů:

$$R = \frac{F}{S_0}, \quad (24)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (25)$$

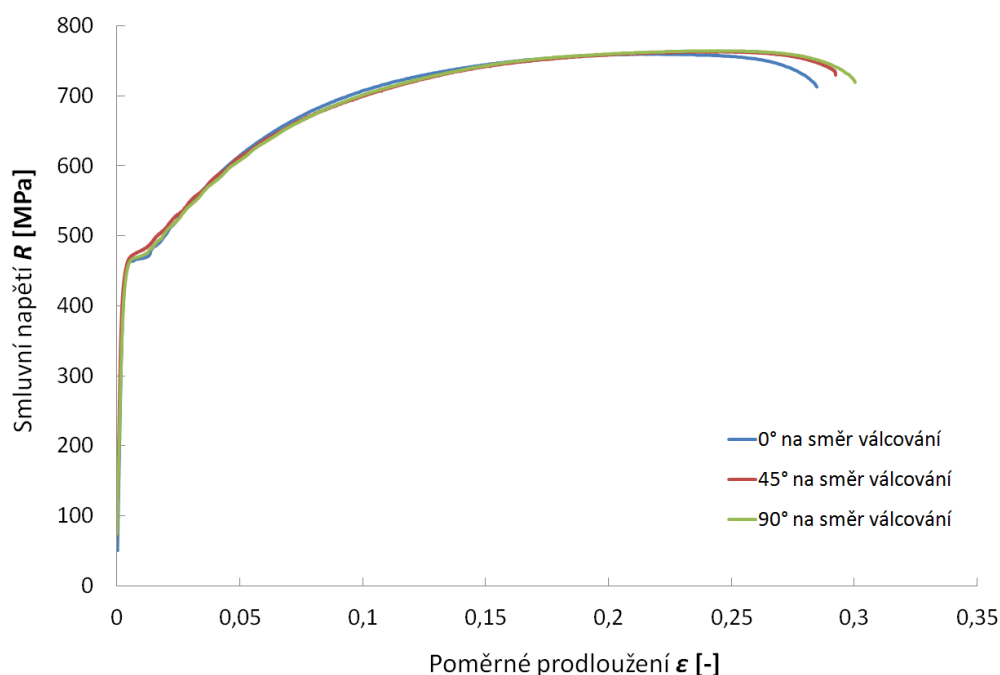
kde: F ... zatěžující síla [N]

S_0 ... počáteční průřezová plocha [mm²]

ΔL ... prodloužení tyčky [mm]

L_0 ... počáteční měřená délka [mm].

Nyní můžeme z vypočtených hodnot R a ε sestrojít křivky smluvních napětí, které jsou znázorněny na Obr. 3.1.1.



Obr. 3.1.1 Grafické znázornění křivek smluvních napětí pro ocel RA-K 40/70

K sestavení křivek skutečných napětí je zapotřebí stanovit skutečná napětí σ a skutečná přetvoření φ z následujících vztahů:

$$\sigma = R \cdot (1 + \varepsilon), \quad (26)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon). \quad (27)$$

Pro každý směr válcování bylo zkoušeno 5 vzorků, ze kterých se následně vypočetly průměrné hodnoty výrazné meze kluzu R_e , meze pevnosti v tahu R_m , homogenní tažnosti A_g a celkové tažnosti materiálu A_{50mm} . Tyto výsledné hodnoty mechanických vlastností TRIP oceli jsou uvedeny v Tab. 3.1.1.

Tab. 3.1.1 Mechanické vlastnosti oceli RA-K 40/70 (tloušťka 1,5 mm)

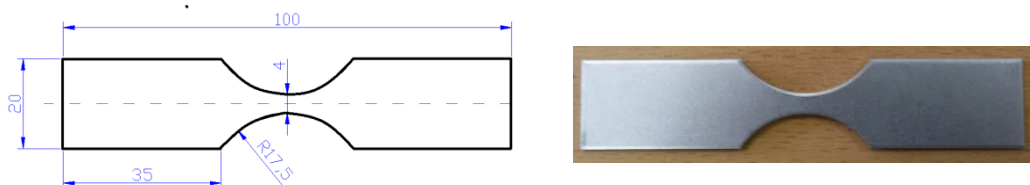
Směr válcování	Výrazná mez kluzu [MPa] R_e	Mez pevnosti v tahu [MPa] R_m	Homogenní tažnost [%] A_g	Celková tažnost [%] A_{50mm}
0°	459,5 ± 3,5	761 ± 3	20,7 ± 0,2	27,8 ± 0,2
45°	462,5 ± 3	764 ± 2	22,9 ± 0,2	29,1 ± 0,3
90°	462 ± 4	762,5 ± 4,5	23,2 ± 0,3	28,8 ± 0,2

Z poměru hodnot meze pevnosti a meze kluzu vidíme, že v oblasti plastických deformací dochází k vysokému stupni zpevnění materiálu. Ten je způsobem tzv. TRIP efektem, kdy dochází k přeměně zbytkového austenitu na martenzit. To nám zaručuje výborné deformační schopnosti materiálu.

3.2 Příprava vzorků pro cyklické zkoušky

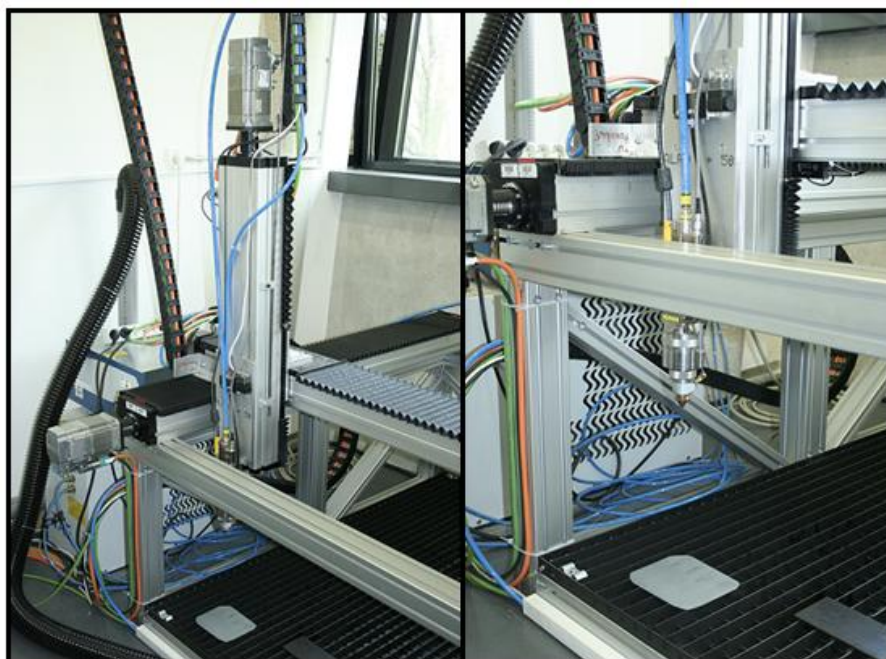
Vzorky byly připraveny třemi různými metodami dělení materiálu: stříháním, obráběním a řezáním pomocí laserového paprsku. Pro všechny metody dělení materiálu byl zvolen jednotný tvar zkušební tělesa, jehož rozměry jsou znázorněny na Obr. 3.2.1. Tvar a rozměry byly zvoleny s ohledem na následné cyklické zkoušky, které byly provedeny na stroji Instron E3000. Všechny zkušební vzorky byly odebírány z plechu ve směru válcování (tzn. pod úhlem 0° na směr válcování). Pro každou metodu dělení materiálu bylo vyrobeno přibližně 50 vzorků.

Dále se pro jednotlivé vzorky vyrobily metalografické výbrusy a to v místě, ve kterém jsme přepokládali vznik únavového lomu (tj. nejužší místo na vzorku). Od každé metody dělení materiálu byl vybrán jeden vzorek, který byl následně rozřezán na vertikální pile tak, aby bylo vidět námi zkoumané místo. Tímto způsobem připravené vzorky se vložili do plastových kalíšků a zalily se do čírého technického dentakrylu. Po zatuhnutí dentakrylu byly vzorky broušeny a leštěny na metalografické brusce s motorizovanou hlavou pod proudem vody smirkovými papíry o zrnitosti 100, 200, 400, 800 a 1200. V poslední fázi se vzorky naleptaly chemickým leptadlem. Nyní byly vzorky připraveny na pozorování pod mikroskopem, kde se vyhodnocoval vliv jednotlivých metod dělení materiálu na řeznou hranu zkušební vzorku. Měření se provádělo na optickém mikroskopu Neophot 21. Metalografické výbrusy budou zobrazeny v následujících kapitolách.



Obr. 3.2.1 Tvar a rozměry zkušební vzorku, kde vlevo jsou znázorněny rozměry a vpravo je příklad stříhaného zkušební vzorku

3.2.1 Vzorky řezané laserovým paprskem a jejich řezná hrana



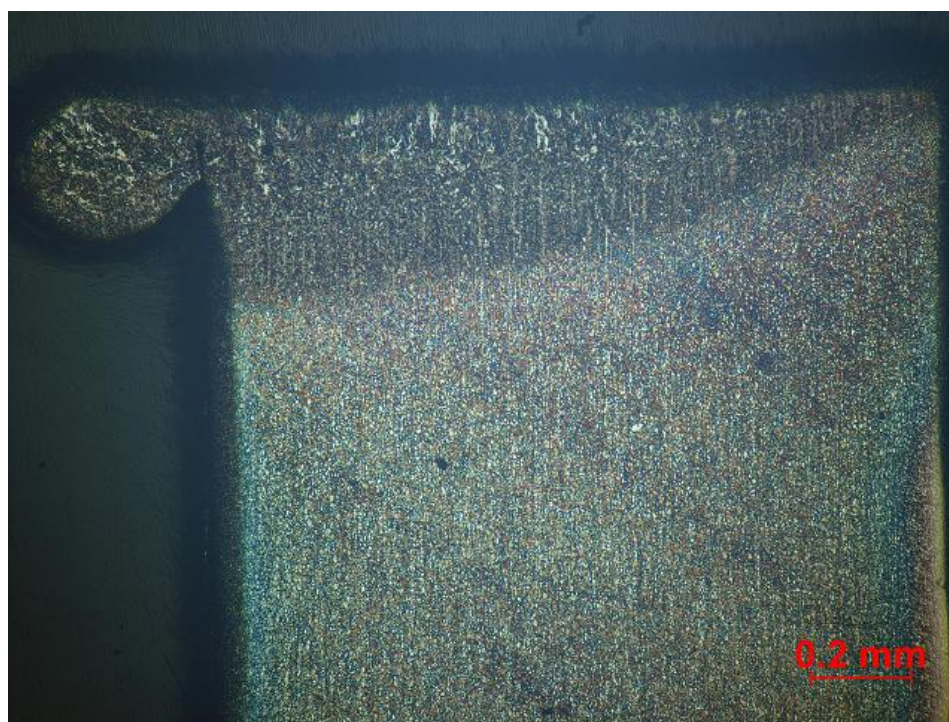
Obr. 3.2.1.1 Pracoviště laserového řezání materiálu

Pro řezání laserem byly použity laserové hlavy společnosti Laser Mechanism o výkonu 400 W a rychlosti posuvu $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

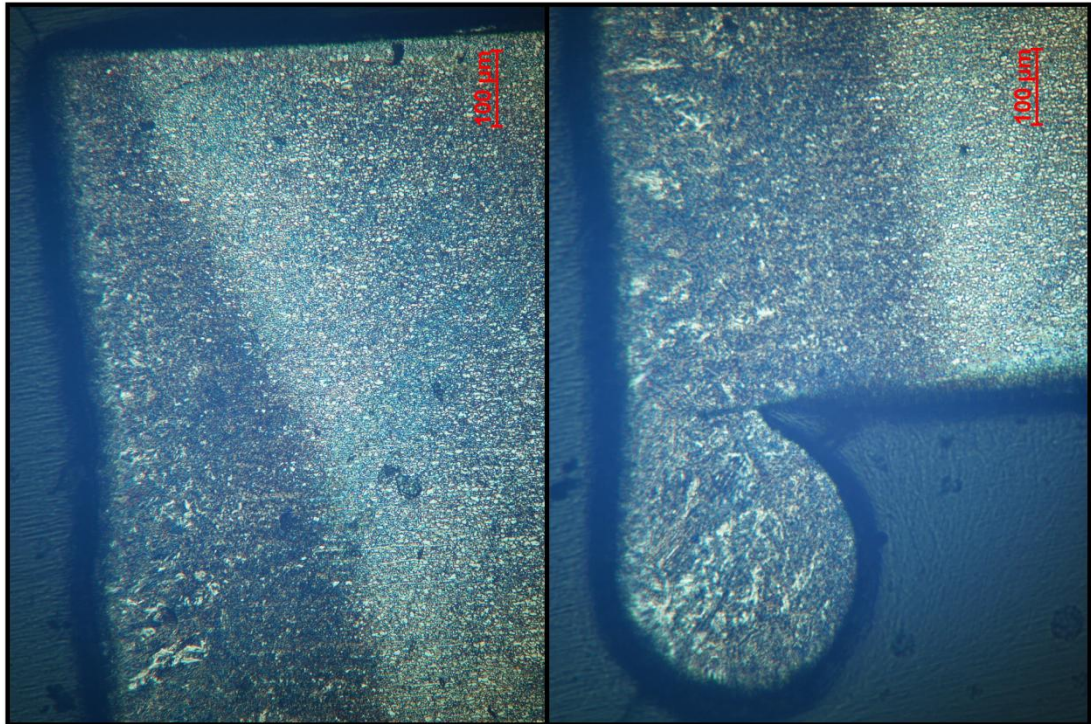
Pomocí softwaru se vytvoří nástřihový plán zkušebních vzorků, který bude následně nahrán do CNC řízené laserové hlavy a ta z vloženého přístřihu plechu vyřizne námi zadaný tvar. Celé pracoviště je zobrazeno na Obr. 3.2.1.1.

Řezání laserovým paprskem zanechalo na řezné hraně značný otřep, který bylo dále nutné obrousit na kotoučové brusce, aby bylo možné zkušební vzorky upnout do čelistí na zkušebních strojích. Otřep se zanechal pouze na části vzorku, která bude podléhat cyklickému namáhání.

Na Obr. 3.2.1.2 a Obr. 3.2.1.3 jsou znázorněny snímky metalografického výbrusu řezné hrany po metodě dělení materiálu laserovým paprskem. Je zde znatelně viditelná tepelně ovlivněná oblast a otřep na spodní hraně řezu. Otřep vzniká postupným odtavováním materiálu z místa řezu. Tepelně ovlivněná oblast se rozšiřuje vlivem průchodu laserového paprsku od horní ke spodní části řezné hrany. To je způsobeno ohřevem materiálu na vysokou teplotu. V této oblasti dochází ke změně struktury materiálu a ke zhrubnutí zrna oproti oblasti, která nebyla tepelně ovlivněna, což je viditelné na snímcích. Na okraji řezné hrany jsou také viditelné prvopočátky vzniku mikrotrhlin. Toto všechno je klasifikováno jako vady řezné hrany.



Obr. 3.2.1.2 Snímek řezné hrany po řezání laserovým paprskem



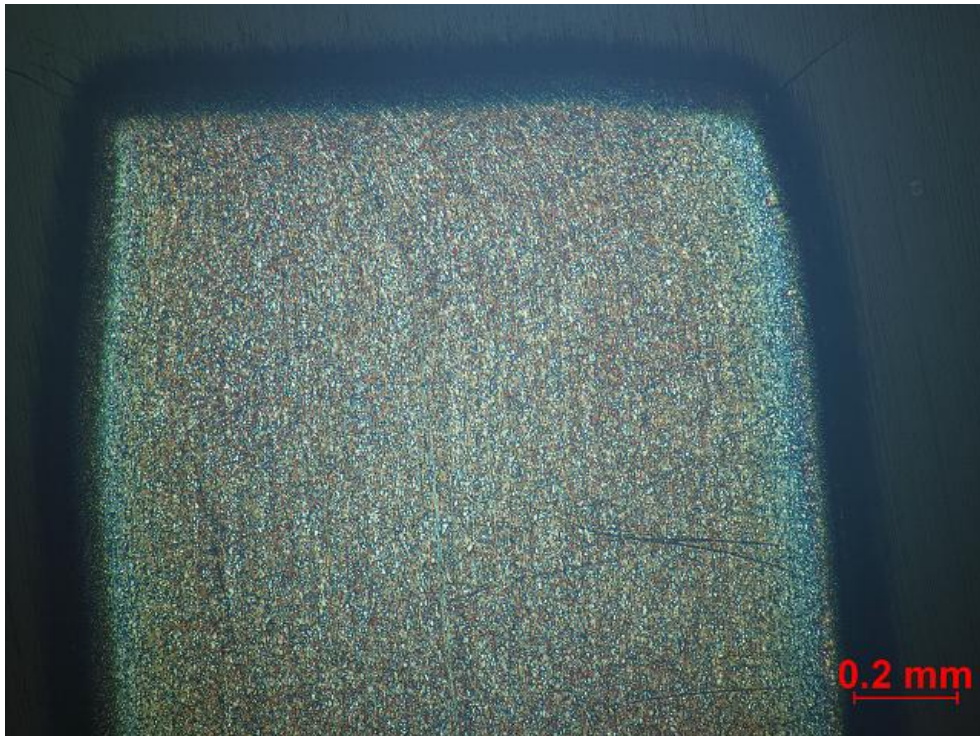
Obr. 3.2.1.3 Detaily řezné hrany, kde vlevo je horní část řezné hrany a vpravo spodní část řezné hrany

3.2.2 Stříhané vzorky a jejich řezná hrana

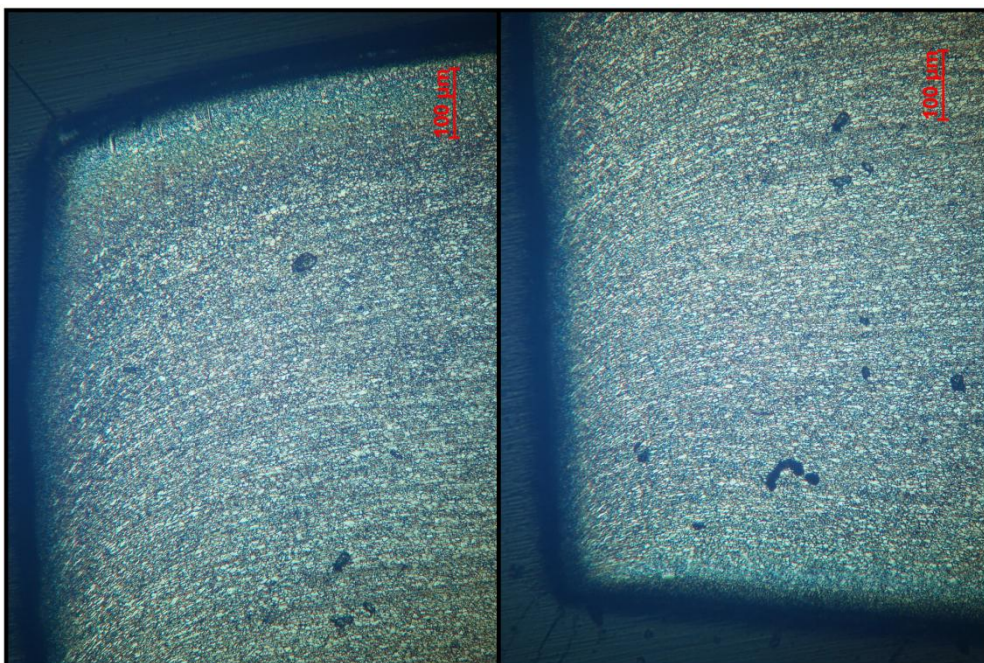
Nejprve byl na přiložený přístřih plechu navržen nástřihový plán v podobě obdélníků o rozměrech 100 x 20 mm. Poté byly tyto obdélníky vystřiženy na tabulových nůžkách. U takto vystřižených obdélníků nezáleží na kvalitě střížné hrany. Střížná hrana vytvořená na tabulových nůžkách se nacházela pouze v oblasti zkušební vzorku, která byla upnuta v čelistech stroje.

Část vzorku zkoušená na cyklické namáhání, byla stříhána na výstředníkovém lisu pomocí střížníku a střížnice. U této metody stříhání ovlivňuje kvalitu stříhu především velikost střížné mezery. Pro kvalitní stříh se doporučuje střížná mezera o velikosti 1 – 10 % tloušťky plechu. V tomto případě byla použita střížná mezera o velikosti 5% tloušťky plechu. Kvalita střížné hrany byla posuzována na metalografickém výbrusu, který je znázorněn na Obr. 3.2.2.1 a Obr. 3.2.2.2.

V horní části střížné hrany je vidět zaoblení, způsobené velikostí střížné mezery a hladká plocha, na které můžeme pozorovat zhuštění zrn struktury materiálu, čímž dochází ke zpevnění materiálu. Na snímku s dolní částí střížné hrany vidíme pouze utrženou část s nekvalitním povrchem a náznaky prvopočátků mikrotrhlin. Na spodní hraně není vidět znatelný otřep, který je jinak průvodním jevem střížného procesu. To je způsobeno zvolenou malou střížnou mezerou.



Obr. 3.2.2.1 Snímek střížné hrany



Obr. 3.2.2.2 Detaily střížné hrany, kde vlevo je horní část střížné hrany a vpravo dolní část střížné hrany

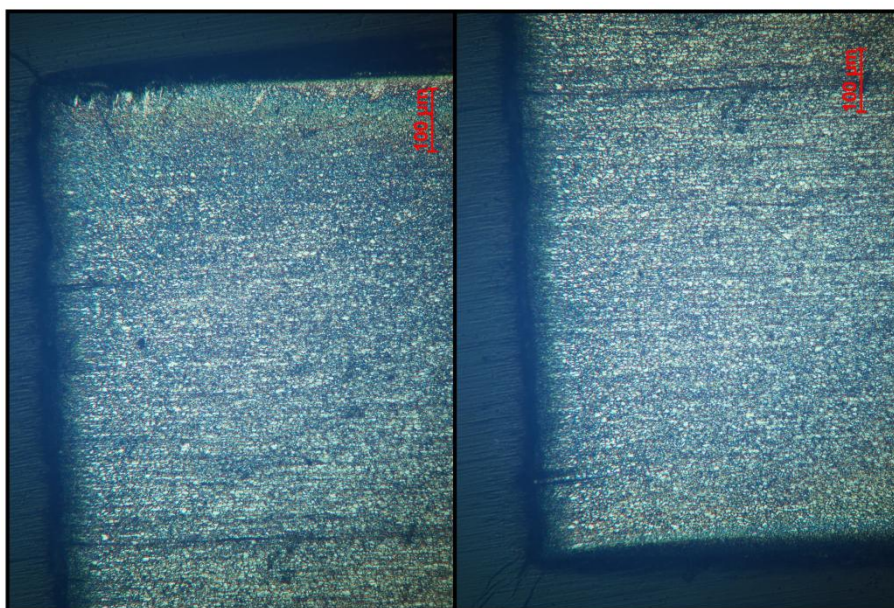
3.2.3 Obráběné vzorky a jejich řezná hrana

Příprava vzorků pro obrábění byla z počátku shodná s přípravou vzorků na stříhání. Na tabulových nůžkách byly nastříhány obdélníky 100x20 mm dle nástřihového plánu. Připravené vzorky byly na sebe naskládány do jednotného

svazku a upnuty do čelistí na běžnou frézku tak, aby nedocházelo k jejich vzájemnému pohybu. Obrábění zkušební části vzorku se realizovalo stopkovou frézou o průměru 35 mm. Takto obrobený povrch měl ve výsledku drsnost $R_a = 3,2 \mu\text{m}$. Pokud bychom chtěli kvalitnější obrobený povrch, musel by se nadále brousit a leštit. Pro naše účely nám vyhovoval povrch s touto drsností. Kvalita obrobené hrany je znázorněna na Obr. 3.2.3.1 a Obr. 3.2.3.2.



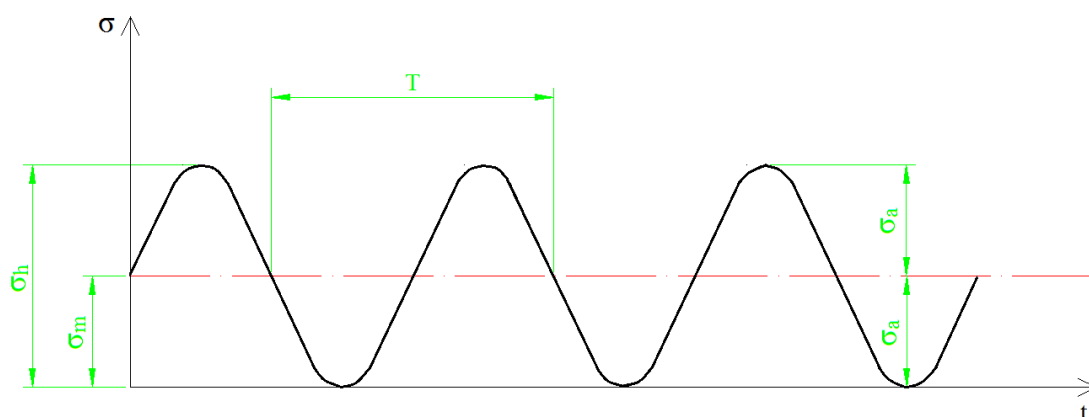
Obr. 3.2.3.1 Snímek obrobené řezné hrany



Obr. 3.2.3.2 Detaily obrobené řezné hrany, kde vlevo je horní část řezné hrany a vlevo dolní část řezné hrany

3.3 Metodika měření cyklické únavy

Měření se rozdělilo na oblast nízkocyklové únavy, která byla měřena na stroji TIRAtest 2300 a na oblast vysokocyklové únavy, měřené na stroji Instron E3000. Pro obě oblasti bylo použito deterministické proměnné zatížení v čase s periodickým průběhem podle Obr. 3.3.1.

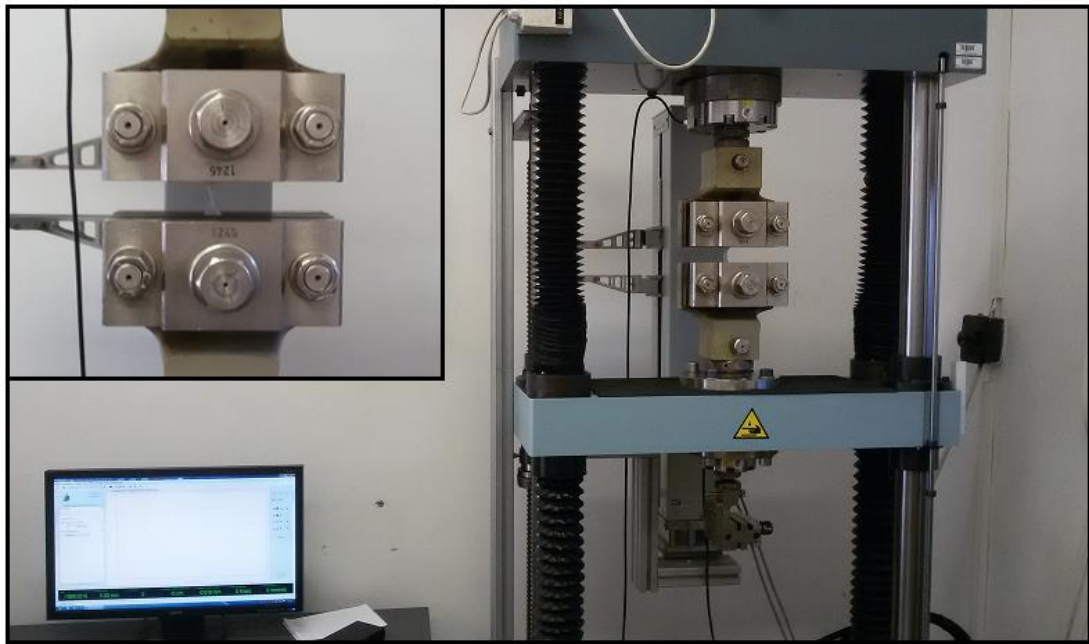


Obr. 3.3.1 Charakteristika zátěžného cyklu

Jedná se o harmonické sinusové zatížení s mívivým průběhem, kde působí pouze tahová složka síly. Základní charakteristikou mívivého průběhu je, že dolní (minimální) napětí je nulové a amplitudové napětí je rovno střednímu napětí, které je polovinou horního (maximálního) napětí.

3.3.1 Postup měření nízkocyklové únavy

Měření se provádělo, jak už bylo zmíněno, na stroji TIRAtest 2300, na kterém byla také měřena statická zkouška tahem. Jedná se o stroj sloužící k měření mechanických vlastností materiálu. Umožňuje zkoušky jednoosé napjatosti v tahu a tlaku s maximální silou 100 kN. Celé pracoviště je znázorněno na Obr. 3.3.1.1. Je opatřen také průtahoměrem MFN-A, kterého ale pro měření cyklické únavy není zapotřebí. Hlavní posuv ve vertikálním směru je řízen šroubovým pohonem. Tento pohon je vhodnější pro měření nízkocyklové únavy než pro měření vysokocyklové únavy, protože je schopen zatěžovat vzorek frekvencí maximálně 3 Hz. Celý proces měření je řízen počítačovým softwarem, který zároveň provádí statistické zpracování naměřených dat.



Obr. 3.3.1.1 TIRAsoft 2300 s detailem na upnutý zkušební vzorek

Nejprve do stroje nasadíme mechanické čelisti, které budou schopny udržet zkušební vzorek stále ve stejné poloze. Poté najedeme vertikálním posuvem do pozice, ve které upneme do čelistí zkušební vzorek (Obr. 3.3.1.1). Vzorek musí být upnut do čelistí tak, aby výslednice tahové síly byla co nejvíce v ose vzorku (tzn. kolmá k čelistem). Pokud by tomu tak nebylo, došlo by při zatěžování cyklickým namáháním k postupnému uvolňování vzorku z čelistí, což by vedlo k nezdárnému výsledku měření. Vzorek musí být v čelistech také upnut velkou silou s dostatečnou upínací plochou. Po mechanické stránce je vzorek připraven ke spuštění zkoušky cyklického únavy.

Po softwarové stránce si nejdříve vytvoříme složku, kam se nám budou ukládat naměřená data (počet cyklů při poškození vzorku). Na zkušebním vzorku, pomocí digitálního posuvného měřítka, naměříme šířku nejužšího místa. Dle dokumentace by se měla šířka rovnat 4 mm, ale vzhledem k nepřesnosti metod dělení materiálu se tato hodnota liší v řádech setin až desetin mm. Naměřenou hodnotu zaznamenáme do tabulkového editoru. V počítačovém softwaru poté nastavíme hodnotu maximálního zatížení, amplitudu zatížení a frekvenci zatěžování. Pro všechny zkoušky v nízkocyklové oblasti byla zvolena jednotná frekvence zatěžování 1 Hz. Nyní můžeme spustit zkoušku cyklické únavy. Při nízkocyklovém zatěžování nám vždy dojde k porušení zkušebního vzorku. Porušený vzorek vyjmem z oblasti čelistí

a uschováme ho pro zkoumání únavového lomu na elektronovém mikroskopu. Celý postup opakujeme pro všechny vzorky.

U každého opakování se zvolí nová hladina zatěžování a její amplituda. Tím dostaneme různé hodnoty počtu cyklů při porušení pro různé hladiny zatěžování. Pomocí vztahů (28-29) přepočteme zátěžové hladiny na napěťové hladiny:

$$\sigma_h = \frac{F_h}{S} = \frac{F_h}{a \cdot t}, \quad (28)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h}{2}, \quad (29)$$

kde: S ... průřez nejužšího místa vzorku [mm^2]

a ... naměřená šířka vzorku v nejužším místě [mm]

t ... tloušťka plechu (konstantní 1,5 mm)

F_h ... maximální zatížení [N]

Výsledné hodnoty maximálního napětí, amplitudy napětí a počtu cyklů při porušení zaznamenáme do tabulky a budou dále použity k sestrojení Wöhlerova diagramu. Tento postup výpočtu použijeme i pro oblast vysokocyklového zatěžování.

3.3.2 Postup měření vysokocyklové únavy

Měření se provádělo na stroji Instron E3000, který je speciálně určen pro měření cyklické únavy a to především pro oblast vysokocyklového namáhání. Je řízen elektropohonem, díky kterému je možno vyvinout vysoký dynamický výkon o frekvenci více než 100 Hz. V našem případě nebude nutné používat takto vysoké frekvence. Může dosáhnout maximálního tahového nebo tlakového dynamického zatížení až 3000 N. Stroj je řízen počítačovým softwarem WaveMatrix, který vyhodnocuje a zpracovává všechna naměřená data. Celé pracoviště je znázorněno na Obr. 3.3.2.1, na kterém je vidět měřicí stroj s upnutými čelistmi a připraveným zkušebním vzorkem.

Příprava stroje na vysokocyklové namáhání se trochu liší od přípravy stroje na nízkocyklové namáhání. Nejprve upneme do stroje čelisti. Jak je vidět ze snímků, tyto čelisti nejsou tak masivní, jako čelisti použité na předchozím stroji, a proto musí být upnutí vzorku věnována větší pozornost. Do čelistí se upne kalibrační hranol. Poté se pomocí vertikálního posuvu předepnou šrouby, které drží čelisti, na hodnotu 1 kN. Pokud bychom toto neudělali, docházelo by k vibracím čelistí, které by ovlivňovalo výsledky měření. Nyní můžeme upnout zkušební vzorek. Ten musí

být opět upnut tak, aby výslednice tahové síly byla co nejvíce v ose vzorku. U takto vysokých frekvencí, jaké stroj může vynaložit, je to obzvláště důležité.



Obr. 3.3.2.1 Instron E3000 s detailem na upnutý zkušební vzorek

Poté zadáme softwaru příkaz, aby si odzkoušel tuhost vzorku. To je také velice důležité, protože se na stroji mohou měřit různé druhy materiálů. Pokud bychom neotestovali tuhost vzorku, vyhodnocovala by se nám chybná data nebo by měření nešlo vůbec realizovat. Dále stačí zadat vstupní parametry zkoušky, jako tomu bylo u měření nízkocyklové únavy, s tím rozdílem, že zde budou použity nižší hladiny zatěžování (do 3000 N) o vyšší frekvenci. Pro hladiny v rozmezí 2000 – 3000 N byla použita frekvence 30 Hz a pro nižší hladiny zatěžování frekvence 40 Hz, abychom zkrátili dobu měření. Jako poslední nastavíme vzorkovací frekvenci, která nám určuje, jak často se budou ukládat data z probíhající zkoušky. Ta byla nastavena na hodnotu 5000 cyklů. Program byl také nastaven tak, aby při dosažení 10 milionů cyklů automaticky přerušil zkoušku, protože nad touto hranicí počtu cyklů už nedochází k únavovým poruchám součástí. Po ukončení zkoušky vyjmem (ne)přetržený vzorek a uschováme ho pro další použití na elektronové mikroskopii, ke zkoumání únavového lomu.

3.4 Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení

V oblasti časované pevnosti neboli omezené životnosti Wöhlerovy křivky, byly pro každou metodu dělení materiálu měřeny počty cyklů do porušení pro 7 napětíových hladin. Abychom dosáhli relevantních výsledků, bylo pro každou napětíovou hladinu provedeno 5 měření. V následujících tabulkách je vždy uvedena průměrná hodnota z těchto 5 měření. V oblasti kvazistatické pevnosti se provedla pouze 3 měření a to pro 1 zátěžný cyklus, abychom dostali bod, který se nachází na počátku Wöhlerovy křivky. V této oblasti není potřeba provádět více měření, protože se jedná o oblast, kde je charakter lomu statický, nikoliv únavový. Při postupném snižování zatěžující síly, se dosáhlo napětíové hladiny, při které nedošlo k porušení zkušební vzorku. Tato hladina byla posléze posouzena jako mez únavy materiálu pro daný typ metody dělení materiálu. Abychom si byli zcela jisti tímto výsledkem, byla na této hladině provedena vždy ještě jedna kontrolní zkouška, zda se zkušební vzorek opět neporuší.

3.4.1 Vyhodnocení cyklické únavy vzorků řezaných laserem

Nejprve ze vztahů (28-29) vypočteme maximální hodnotu napětí a amplitudu napětí pro jednotlivé zátěžové hladiny. Poté pomocí vztahů (1 a 4) dopočteme základní charakteristické hodnoty zátěžného cyklu, kterými jsou trvání jednoho cyklu a střední hodnota napětí. V Tab. 3.4.1.1 jsou uvedeny průměrné naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření provedených na jednotlivých hladinách zatěžování. V tabulce je červenou barvou znázorněno měření na stroji TIRAtest 2300 a modrou barvou měření na Instronu 3000.

Wöhlerova křivka je závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do porušení N_f . Jak vidíme na výsledných hodnotách, tak se stoupající amplitudou napětí, klesá počet cyklů do porušení, což je pro únavové vlastnosti zcela charakteristické.

Tab. 3.4.1.1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro laser

Série vzorků	Maximální zatížení [N] F_h	Šířka nejúžšího místa [mm] a	Maximální napětí [MPa] σ_h	Amplituda napětí [MPa] σ_a	Střední napětí [MPa] σ_m	Trvání jednoho cyklu [s] T	Počet cyklů do porušení [-] N_f
1. série	5500	3,90	940	470	470	1	1
2. série	4500	4,00	750	375	375	1	2944
3. série	4000	4,10	650	325	325	1	7560
4. série	3300	4,07	540	270	270	1	18840
5. série	2500	4,14	402	201	201	0,033	64726
6. série	2000	4,13	324	162	162	0,033	249251
7. série	1800	4,11	292	146	146	0,025	285180
8. série	1700	4,18	272	136	136	0,025	350867
9. série	1500	4,12	244	122	122	0,025	$+10^7$

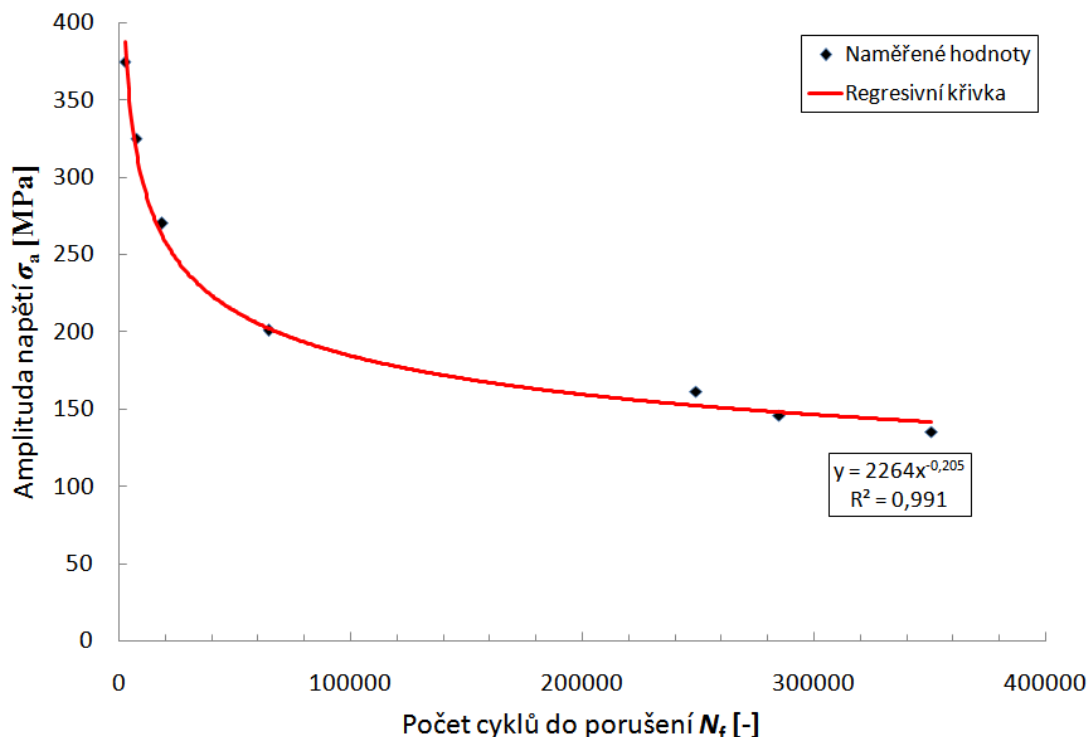
Nyní můžeme sestavit část Wöhlerovi křivky, tzv. oblast časované pevnosti. Vyneseme body závislosti amplitudy napětí na počtu cyklů do porušení v rozmezí 2. - 8. série vzorků. Takto vynesené body proložíme křivkou. Abychom zjistili součinitel únavové pevnosti a exponent životnosti, musíme tuto část křivky aproximovat. Po proložení naměřených bodů regresivní mocninnou křivkou, dostaneme rovnici, ze které můžeme tyto materiálové konstanty odvodit. Proložení bodů regresivní mocninou křivkou je znázorněno na Obr. 3.4.1.1.

Pro odvození materiálových konstant vycházíme z Wöhler - Basquinovi rovnice:

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (2 \cdot N_f)^b, \quad (30)$$

kde: $\sigma'_f \dots$ součinitel únavové pevnosti [MPa]

$b \dots$ exponent životnosti [-].



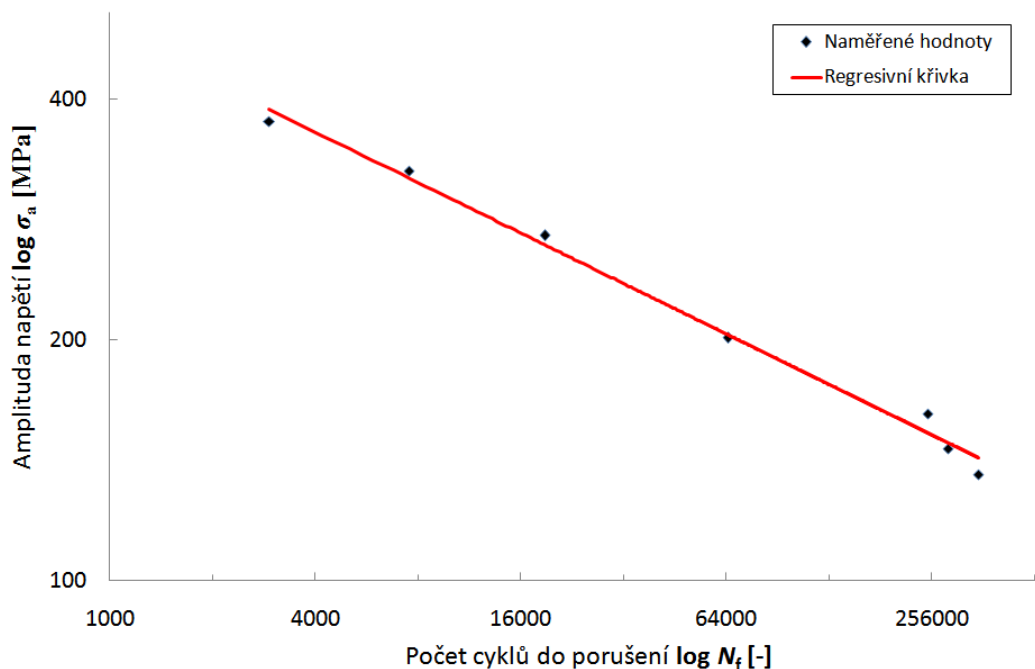
Obr. 3.4.1.1 Oblast časované pevnosti a proložení naměřených hodnot aproximační křivkou pro zjištění materiálový konstant

Z rovnice regresivní křivky vidíme, že součinitel únavové pevnosti je 2264 MPa a exponent životnosti -0,205. Tyto materiálové konstanty nám určují tvar Wöhlerovi křivky v oblasti časované pevnosti.

Dále je pod rovnicí aproximační křivky zobrazena spolehlivost, se kterou byla tato křivka sestrojena. V tomto případě je spolehlivost rovna 99,1 %, což nám ukazuje, že regresivní křivka byla sestrojena s velkou přesností k původní křivce.

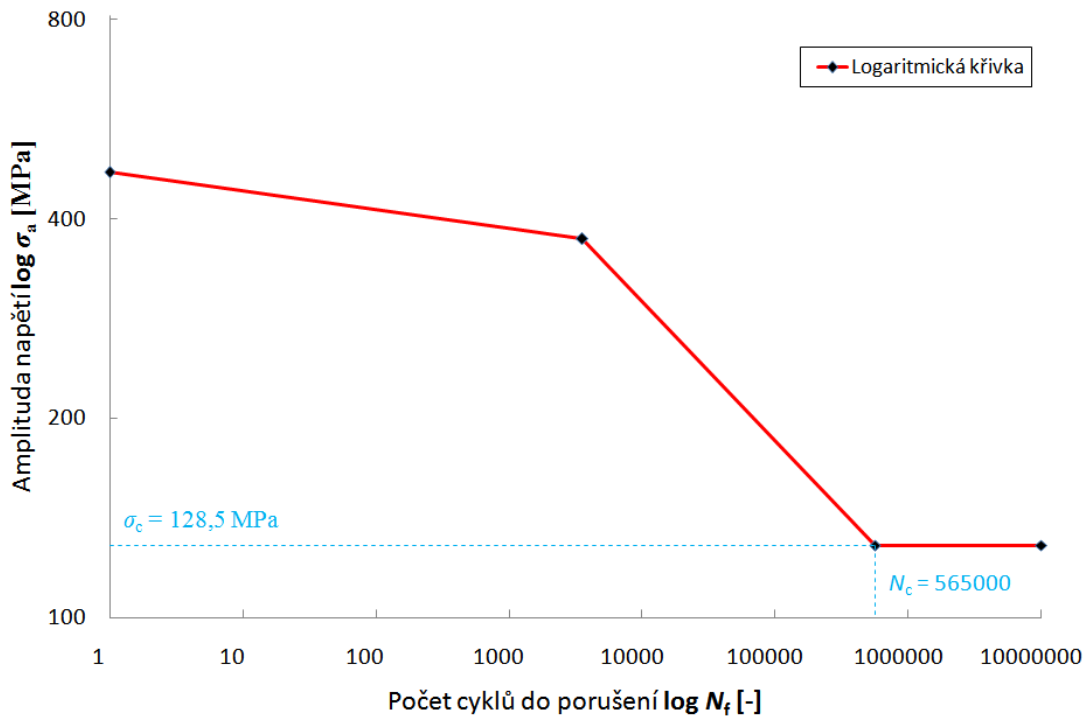
Wöhlerova křivka se většinou prezentuje v logaritmickém měřítku pro větší přehlednost všech oblastí cyklické únavy. Dalším postupem je tedy převedení vytvořené regresivní křivky časované pevnosti Wöhlerovi křivky do logaritmického měřítka. Do logaritmických souřadnic převedeme jak amplitudu napětí, tak i počet cyklů do porušení. Tento krok je znázorněn na Obr. 3.4.1.2.

U dalších metod dělení materiálu již tento krok znázorněn nebude, protože není stěžejní pro celkové porozumění problému. Bude znázorněn v přílohách diplomové práce.



Obr. 3.4.1.2 Oblast časované pevnosti zobrazená v logaritmických souřadnicích

Z grafu je vidět, že průběh časované pevnosti je v logaritmických souřadnicích znázorněn přímkou. Pro vytvoření Wöhlerovi křivky v oblasti trvalé pevnosti, musíme nejdříve určit střední hodnotu amplitudy napětí, ze dvou posledních sérií měření. Tato hodnota je 128,5 MPa. Poté prodloužíme přímkou z oblasti časované pevnosti až na tuto napětíovou hladinu. Dostaneme bod, který je znázorněn na Obr. 3.4.1.3 hodnotami N_c a σ_c . Od hodnoty N_c lze již průběh Wöhlerovy křivky zobrazit přímkou vodorovnou s osou souřadného systému $\log N_f$, protože zde již nedochází k výrazným materiálovým změnám a nevzniká únavový lom. V oblasti kvazistatické pevnosti lze průběh také nahradit přímkou, protože se zde únavový jev neprojeví a porucha má statický charakter. Stačí pouze vynést první naměřený bod a propojit jej s přímkou z oblasti časované pevnosti. Celý průběh Wöhlerova diagramu, pro vzorky řezané laserem, je znázorněn v logaritmických souřadnicích na Obr. 3.4.1.3. A-B je oblast kvazistatické pevnosti, B-C oblast časované pevnosti a C-D oblast trvalé pevnosti.



Obr. 3.4.1.3 Wöhlerův digram pro vzorky řezané laserem

Z diagramu je zřejmé, že mez únavy vzorků σ_c pro metodu dělení materiálu laserovým paprskem je 128,5 MPa. Tato hodnota nám říká, že pokud budeme zkušební vzorek zatěžovat amplitudou napětí nižší než je mez únavy ($\sigma_a < \sigma_c$), nedojde k únavovému poškození (nevznikne únavový lom).

N_c je hranice počtu cyklů, od které nám již také nedochází k únavovému poškození. V Tab. 3.4.1.2 jsou uvedeny všechny významné hodnoty získané z tohoto měření.

Tab. 3.4.1.2 Materiálové konstanty a mez únavy oceli RA-K 40/70 – děleno laserem

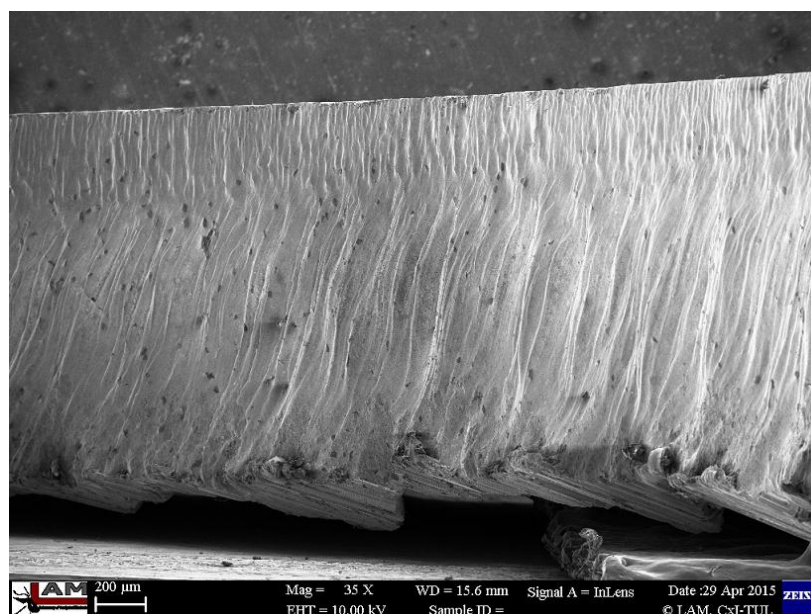
Metoda dělení materiálu	Součinitel únavové pevnosti [MPa] σ'_f	Exponent životnosti [-] b	Mez únavy [MPa] σ_c
Laser	2264	-0,205	128,5

Součástí experimentální části je také zkoumání materiálových poruch na porušených vzorcích, tzv. únavových lomů. Tyto lomy byly zkoumány na elektronovém rastrovacím mikroskopu (SEM) TESCAN VEGA SHB s energiově

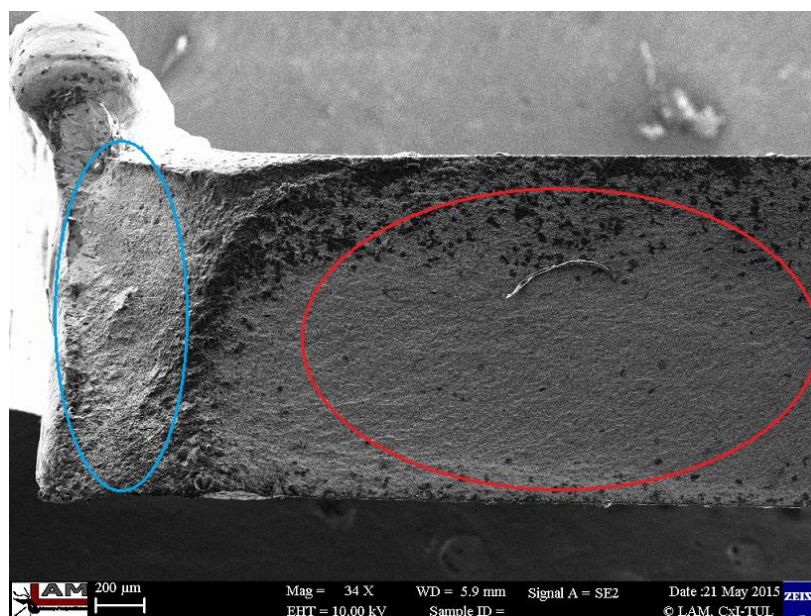
disperzní analýzou. Jedná se o vakuový mikroskop s malou komorou určenou především pro vodivé materiály.

Na Obr. 3.4.1.4 je snímek únavového lomu vybraného vzorku zatíženého amplitudou napětí 325 MPa (zvětšeno 35x). Je zde znázorněna oblast křehkého lomu, která má velice specifický povrch. Detail této oblasti je zobrazen v přílohách.

Na Obr. 3.4.1.5 je únavový lom vzniklý při zatížení amplitudou napětí 201 MPa (zvětšeno 34x). Červenou barvou je označena oblast šíření trhlin. Modrou barvou je poté vyznačena oblast křehkého lomu. Detaily těchto oblastí jsou dále v přílohách.



Obr. 3.4.1.4 Únavový lom vzniklý mĳivným zatĳením s amplitudou napĳtĳ 325 MPa (dĳleno laserem)



Obr. 3.4.1.5 Únavový lom vzniklý mĳivným zatĳením s amplitudou napĳtĳ 201 MPa (dĳleno laserem)

3.4.2 Vyhodnocení cyklické únavy obráběných vzorků

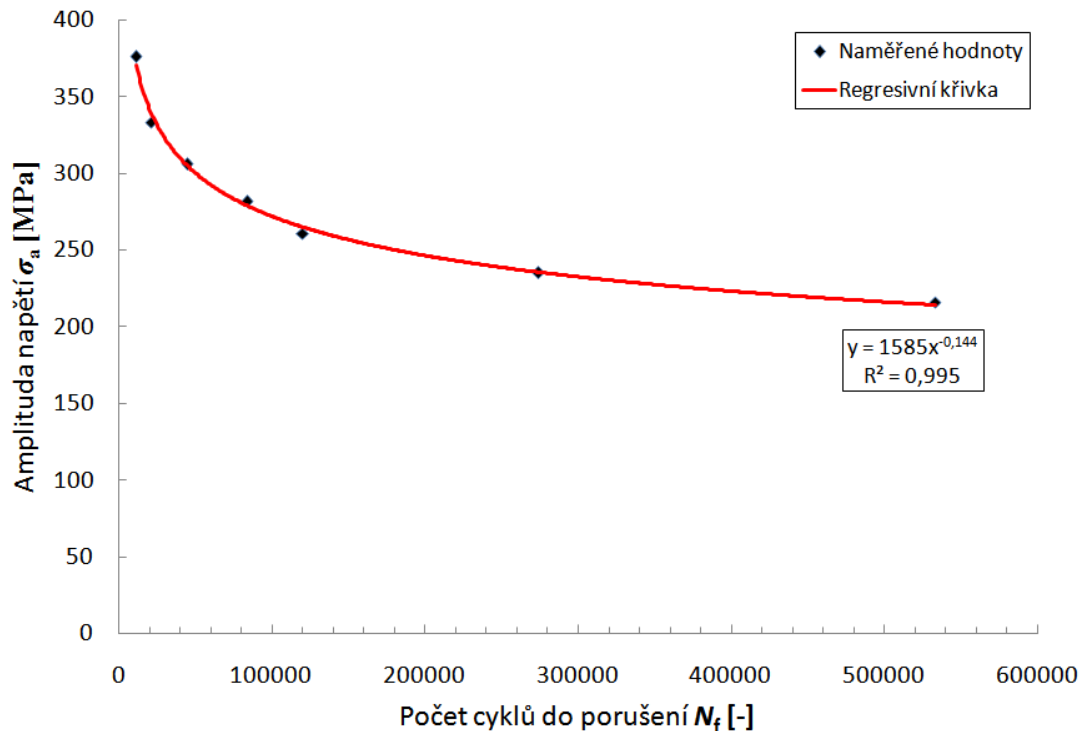
Postup zpracování dat bude stejný jako u vzorků připravovaných laserovým paprskem. Některé vzorky musely být připraveny znovu s užším měřeným místem a to v rozmezí 3,5 – 4 mm. Důvodem bylo, že ani při nejvyšší možné zatěžovací síle nedošlo k poškození vzorků. Abychom zvýšili hladinu napětí, při zanechání maximální zatěžující síly 3000 N, musel být zmenšen průřez měřeného místa.

Opět vypočteme všechny hodnoty potřebné k sestrojení střední části Wöhlerova diagramu, oblasti časované pevnosti. Vypočtené hodnoty amplitudy napětí a naměřené počty cyklů vyneseme do diagramu, kde $\sigma_a = f(N_f)$. Provedeme aproximaci získané křivky a necháme si zobrazit rovnici regrese.

Průměrné vypočtené a naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3.4.2.1. Oblast časované pevnosti Wöhlerovy křivky a její aproximace jsou znázorněny na Obr. 3.4.2.1.

Tab. 3.4.2.1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro obrobené vzorky

Série vzorků	Maximální zatížení [N] F_h	Šířka nejužšího místa [mm] a	Maximální napětí [MPa] σ_h	Amplituda napětí [MPa] σ_a	Střední napětí [MPa] σ_m	Trvání jednoho cyklu [s] T	Počet cyklů do porušení [-] N_f
1. série	5500	4,15	884	442	442	1	1
2. série	4500	3,99	752	376	376	1	11530
3. série	4000	4,00	666	333	333	1	21560
4. série	3700	4,03	612	306	306	1	45256
5. série	3000	3,55	564	282	282	0,033	84000
6. série	2800	3,58	522	261	261	0,033	120478
7. série	2500	3,55	470	235	235	0,025	274526
8. série	2300	3,55	432	216	216	0,025	533564
9. série	2200	3,61	406	202	202	0,025	$+10^7$



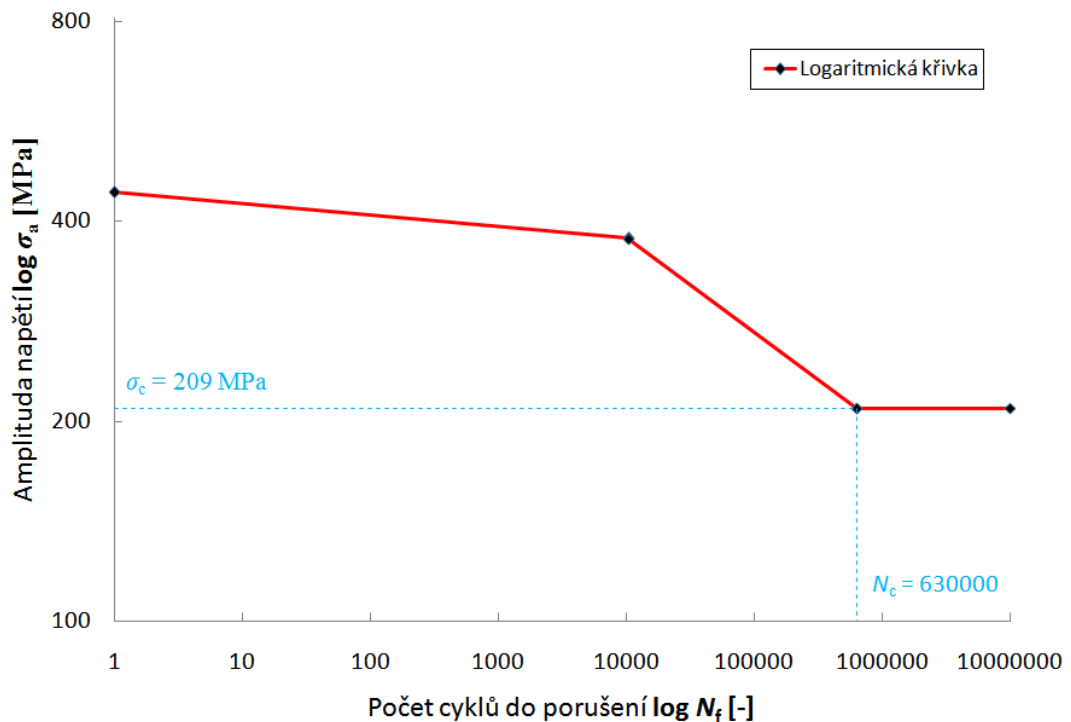
Obr. 3.4.2.1 Oblast časované pevnosti a její aproximace pro obrobené vzorky

Pomocí Wöhler - Basquinovi rovnice (30) opět zjistíme materiálové únavové konstanty. Součinitel únavové pevnosti je 1585 MPa a exponent životnost $-0,144$. Spolehlivost, se kterou byla regresivní křivka vytvořena, je 99,5 %. To je ještě větší přesnost sestavení regresivní křivky k původní křivce, než v předchozím případě.

Oblast časované pevnosti převedeme do logaritmického měřítka. Tuto část Wöhlerovi křivky musíme opět doplnit o oblast trvalé pevnosti a kvazistatické pevnosti. Postup bude shodný s postupem v minulé kapitole. Střední hodnota amplitudy napětí je 209 MPa. Po prodloužení přímky na tuto hladinu amplitudy napětí, dostaneme hodnotu cyklů $N_c = 630000$. Celá Wöhlerova křivka pro vzorky připravené obráběním je znázorněna na Obr. 3.4.2.2.

Z diagramu vidíme, že mez únavy vzorků je 209 MPa. Pokud budeme vzorky zatěžovat amplitudou napětí nižší než je tato hodnota ($\sigma_a < \sigma_c$), tak nedojde k únavovému poškození. Při překročení hranice 630000 cyklů nedochází k poruše vzorků.

V Tab. 3.4.2.2 jsou uvedeny všechny významné hodnoty, které jsme získali měřením únavových vlastností vzorků s obrobenou řeznou hranou.



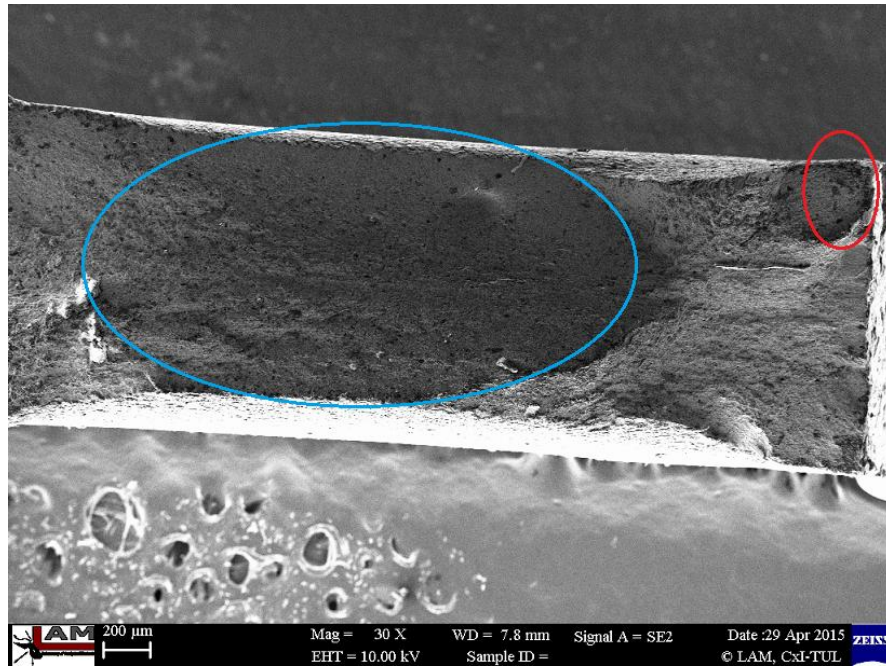
Obr. 3.4.2.2 Wöhlerův digram pro vzorky připravené obráběním

Tab. 3.4.2.2 Materiálové konstanty a mez únavy oceli RA-K 40/70 – děleno obráběním

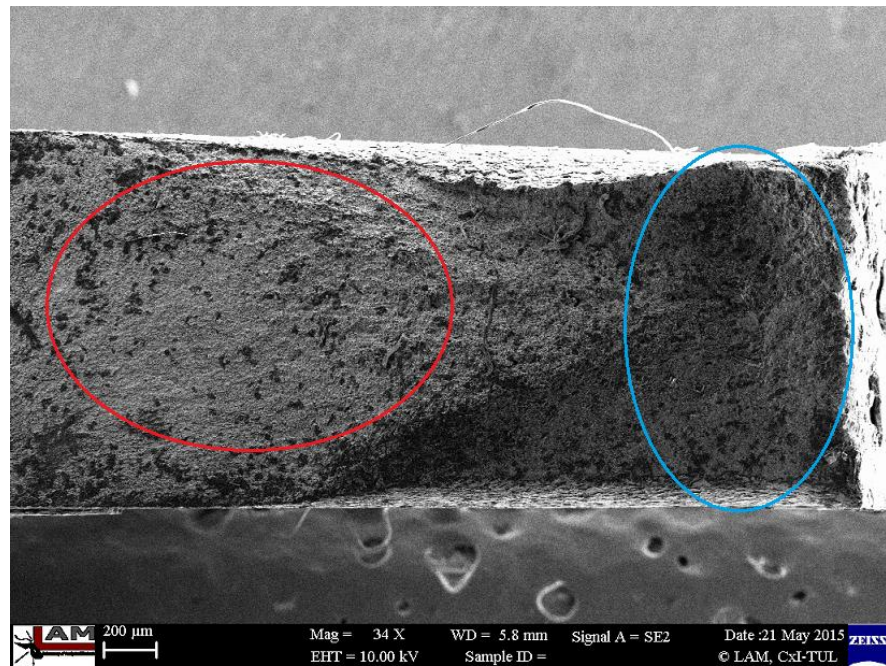
Metoda dělení materiálu	Součinitel únavové pevnosti [MPa] σ'_f	Exponent životnosti [-] b	Mez únavy [MPa] σ_c
Obráběné	1585	-0,144	209

Na Obr. 3.4.2.3 můžeme vidět snímek únavového lomu z oblasti nízkocyklové únavy, při zatížení amplitudou napětí 325 MPa. Červeně je označená oblast, ve které nám vznikají první trhliny a ty se dále šíří do materiálu. Modrou barvou je vyznačená oblast statického lomu (křehkého lomu). Ke křehkému lomu dojde v okamžiku, kdy je zbývající průřez zeslaben natolik, že již nedokáže přenášet statické zatížení. Detaily obou těchto oblastí jsou dále znázorněny v přílohách.

Na Obr. 3.4.2.4 je snímek únavového lomu z oblasti vysokocyklové únavy, při zatížení amplitudou napětí 235 MPa. Červeně je na obrázku opět vyznačená oblast šíření trhlin. Modrou barvou je označená oblast křehkého lomu. Detaily těchto oblastí jsou dále v přílohách.



Obr. 3.4.2.3 Únavový lom vzniklý mĳivým zatĳením s amplitudou napĳtĳ 325 MPa u obrobených vzorků



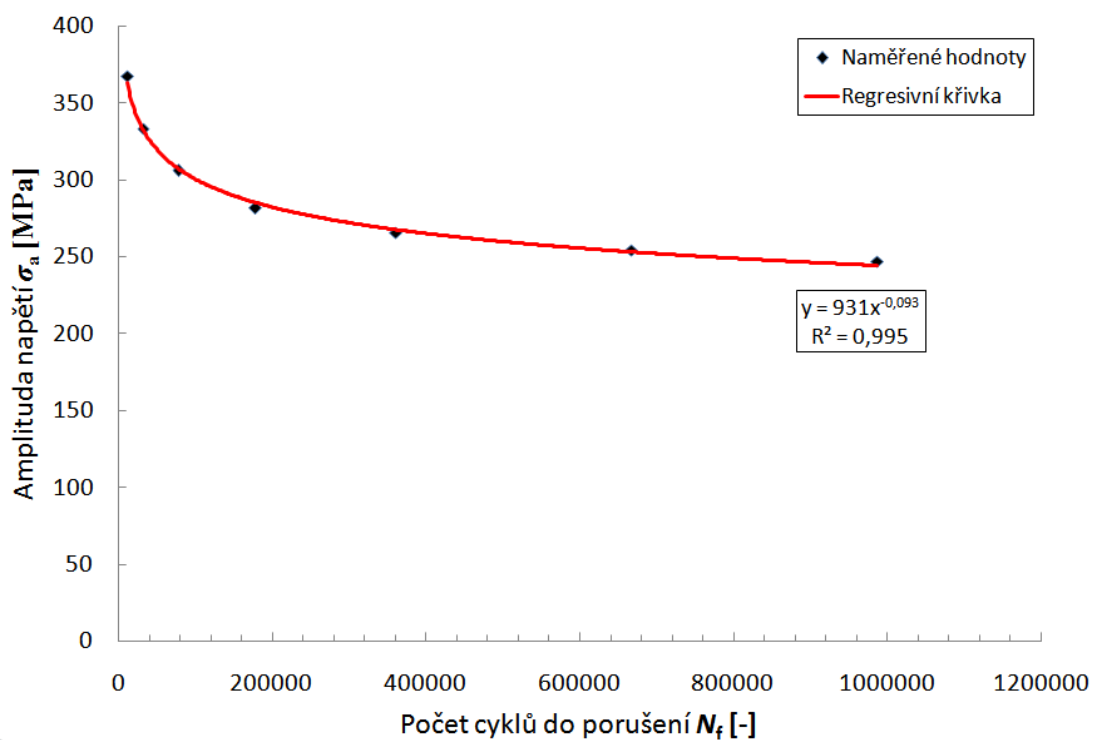
Obr. 3.4.2.4 Únavový lom vzniklý mĳivým zatĳením s amplitudou napĳtĳ 235 MPa

3.4.3 Vyhodnocení cyklické únavy stĳhaných vzorků

Postup je opĳt stejný jako v předchozích případech. Vzorky museli být upraveny, abychom zužili měřenou část vzorku, jinak bychom na Instronu nebyli schopni namĳřit žádné použitelné hodnoty. Namĳřené a vypoĳtené hodnoty pro stĳhané vzorky jsou zaznamenány v Tab. 3.4.3.1. Na Obr. 3.4.3.1 je znázornĳna oblast časované pevnosti Wöhlerovy křivky a její aproximace pro stĳhané vzorky.

Tab. 3.4.3.1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro stříhané vzorky

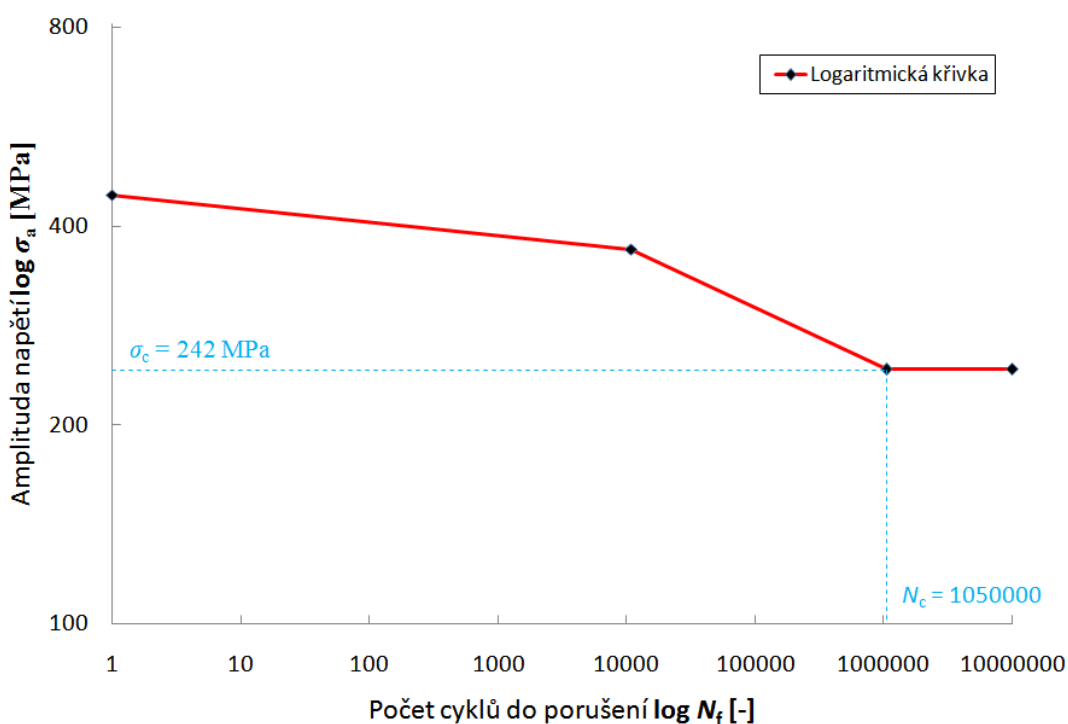
Série vzorků	Maximální zatížení [N] F_h	Šířka nejužšího místa [mm] a	Maximální napětí [MPa] σ_h	Amplituda napětí [MPa] σ_a	Střední napětí [MPa] σ_m	Trvání jednoho cyklu [s] T	Počet cyklů do porušení [-] N_f
1. série	5500	4,11	892	446	446	1	1
2. série	4500	4,08	736	368	368	1	12547
3. série	4000	4,00	666	333	333	1	32457
4. série	3700	4,03	612	306	306	1	78258
5. série	3000	3,55	564	282	282	0,033	178954
6. série	2800	3,51	532	266	266	0,033	361487
7. série	2700	3,54	508	254	254	0,025	667899
8. série	2600	3,51	494	247	247	0,025	987458
9. série	2500	3,50	476	237	237	0,025	$+10^7$



Obr. 3.4.3.1 Oblast časované pevnosti a její aproximace pro stříhané vzorky

Z Wöhler-Basquinovi rovnice (30) zjistíme únavové materiálové konstanty. Součinitel únavové pevnosti je 931 MPa a exponent životnost -0,093. Spolehlivost, se kterou byla regresivní křivka vytvořena, je 99,5 %. Regresivní křivka je vytvořena s velkou přesností k původní křivce proložené naměřenými body.

Dále opakujeme stejný postup. Střední hodnota amplitudy napětí je 242 MPa. Po prodloužení přímky na tuto hladinu amplitudy napětí, dostaneme hodnotu cyklů $N_c = 1050000$. Celá Wöhlerova křivka pro vzorky připravené stříháním je znázorněna na Obr. 3.4.3.2.



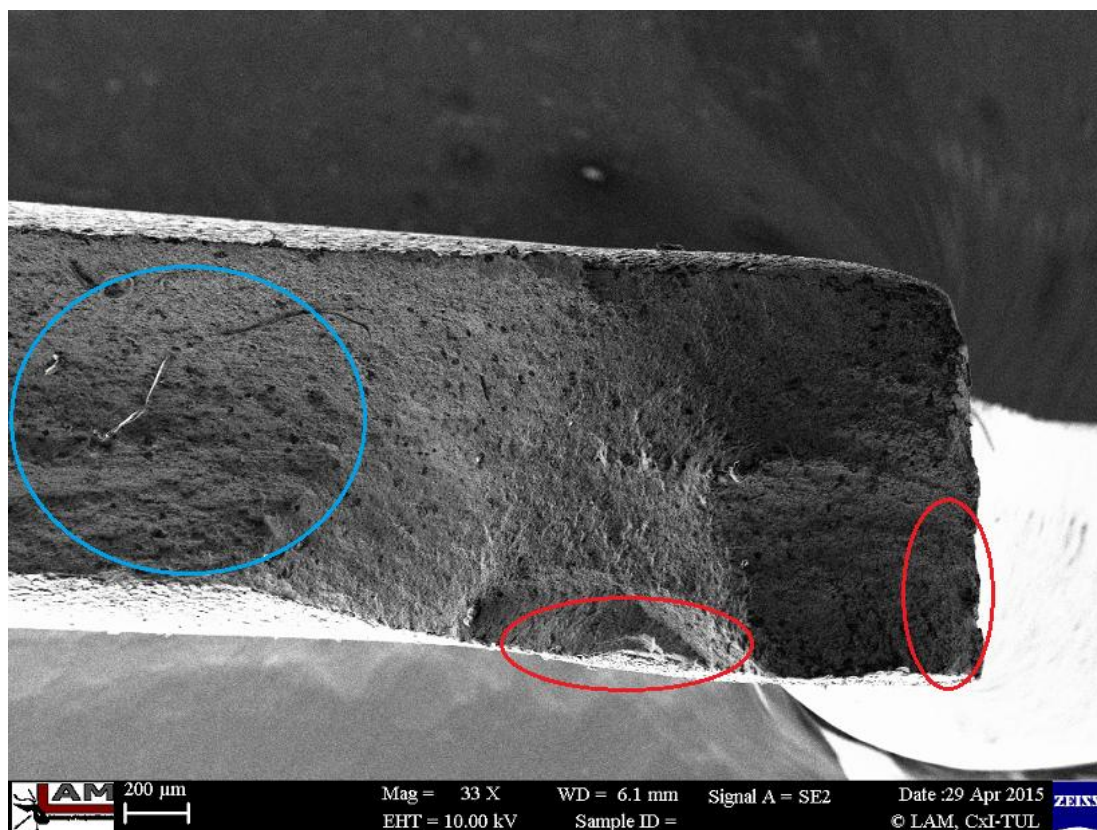
Obr. 3.4.3.2 Wöhlerův digram pro vzorky připravené stříháním

Mez únavy stříhaných vzorků je 242 MPa. Pokud je budeme zatěžovat nižší hodnotou amplitudy napětí, nedojde k jejich poškození. Nad hranicí 1050000 cyklů již nedochází k únavovému poškození. V Tab. 3.4.3.2 jsou opět uvedeny všechny významné hodnoty únavových vlastností materiálu, získané z tohoto měření.

Tab. 3.4.3.2 Materiálové konstanty a mez únavy oceli RA-K 40/70 – děleno stříháním

Metoda dělení materiálu	Součinitel únavové pevnosti [MPa] σ'_f	Exponent životnosti [-] b	Mez únavy [MPa] σ_c
Stříhané	931	-0,093	242

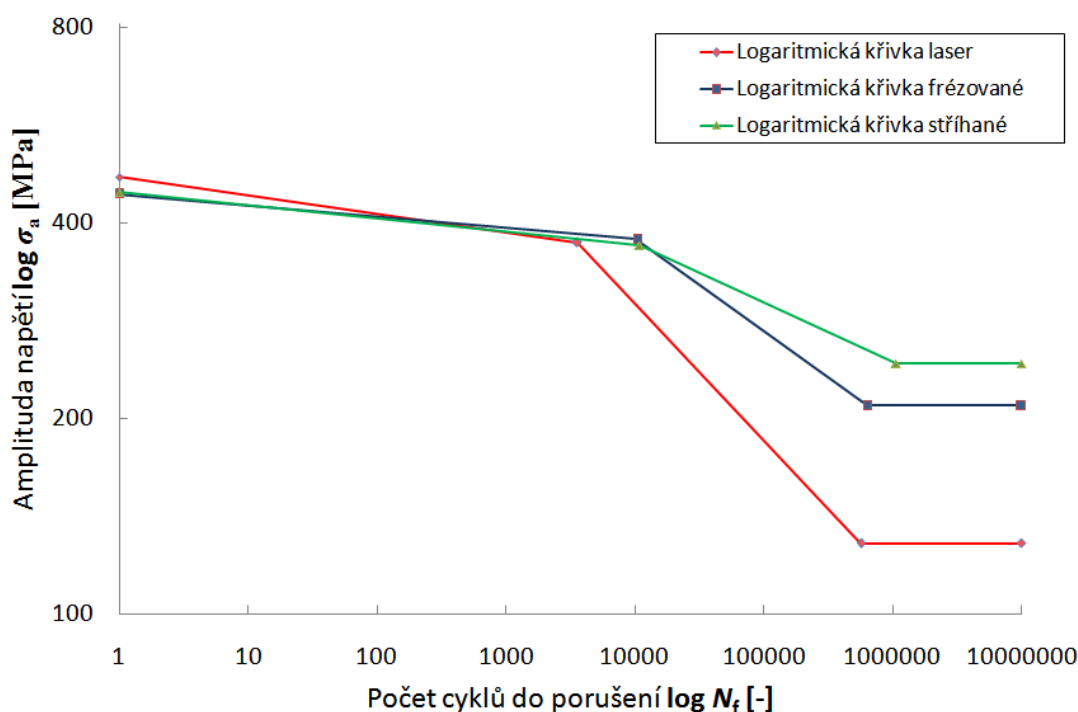
Na Obr. 3.4.3.3 můžeme vidět snímek únavového lomu z oblasti nízkocyklové únavy, při zatížení amplitudou napětí 325 MPa pro stříhaný vzorek. První trhliny nám vznikají v oblasti spodní části střížné hrany a ty se dále šíří do materiálu. Dále je tu ještě jedna oblast, ve které dochází k prvopočátkům vzniku únavového lomu a ta se nachází na spodní straně vzorku. Detaily této oblasti jsou znázorněny v přílohách. V oblasti označené modrou barvou nám opět vzniká křehký lom.



Obr. 3.4.3.3 Únavový lom vzniklý mívivým zatížením s amplitudou napětí 325 MPa u stříhaných vzorků

4 Diskuze a porovnání výsledků

Ke zjištění, která z technologií dělení materiálu má nejpříznivější vliv na únavové vlastnosti TRIP oceli RA-K 40/70, použijeme Wöhlerův diagram, do kterého vyneseme výsledné křivky v logaritmických souřadnicích pro jednotlivé technologie dělení materiálu. Tento diagram je znázorněn na Obr. 4.1. Porovnat tyto technologie je také možné z výsledných hodnot materiálových konstant a meze únavy (Tab. 4.1), ale grafické znázornění je daleko výstižnější a dává nám celkový přehled o cyklické únavě materiálu v průběhu zatěžování míjivým zátěžovým cyklem.



Obr. 4.1 Wöhlerova křivka TRIP oceli RA-K 40/70 pro různé technologie dělení materiálu

Tab. 4.1 Výsledné únavové vlastnosti oceli RA-K 40/70 pro jednotlivé technologie dělení materiálu

Metoda dělení materiálu	Součinitel únavové pevnosti [MPa] σ'_f	Exponent životnosti [-] b	Mez únavy [MPa] σ_c
Stříhané	931	-0,093	242
Obráběné	1585	-0,144	209
Laser	2264	-0,205	128,5

Z výsledných hodnot únavových vlastností oceli vidíme, že únavové konstanty materiálu mají vliv na tvar a umístění oblasti časované pevnosti Wöhlerovi křivky. Součinitel únavové pevnosti σ_f' nám posouvá tuto oblast po svislé ose diagramu. Čím nižší je hodnota součinitele únavové pevnosti, tím výše je oblast časované pevnosti v diagramu položena. Exponent životnosti b nám udává sklon této části Wöhlerovi křivky. Čím vyšší je hodnota exponentu životnosti, tím menší sklon má tato část křivky.

Z Wöhlerova diagramu je zřejmé, že nejhorších únavových vlastností dosahují zkušební vzorky, které byly vyráběny technologií dělení materiálu laserovým paprskem. To je způsobeno vysokým tepelným ovlivněním řezné hrany zkušebního vzorku, což můžeme vidět na Obr. 3.2.1.2. V této tepelně ovlivněné oblasti nám dochází ke změnám struktury materiálu, zhrubnutí zrna, změně chemického složení povrchové vrstvy, které mají za následek vysoké povrchové napětí. To vede k tvorbě velkého množství mikrotrhlin. Čím více mikrotrhlin nám při dělení materiálu vznikne, tím větší je pravděpodobnost rychlejšího vzniku únavového lomu.

Zatím co zkušební vzorky řezané laserovým paprskem mají prokazatelně nejhorší únavové vlastnosti, tak u vzorků obráběných a stříhaných by se dalo spekulovat o srovnatelném výsledku. Předpokladem bylo, že vzorky vyráběné metodou obrábění by měli mít nejlepší únavové vlastnosti. Z diagramu je ovšem vidět, že nejlepší výsledků dosáhly vzorky stříhané. Jsou hned dva důvody, proč tomu tak může být.

Na metalografickém výbrusu (Obr. 3.2.3.2) vidíme, že kvalita obrobeného povrchu je špatná. Vlastnosti obrobené povrchové vrstvy jsou dány strukturními změnami a stupněm zpevnění, které jsou přímo úměrné velikosti zbytkových napětí. Tedy jedním z důvodů, proč mají stříhané vzorky lepší únavové vlastnosti než vzorky obráběné, je velikost zbytkových tahových napětí v povrchové vrstvě po obrábění. To může být způsobeno špatnou volbou řezných podmínek. Proto také po frézování, i jiných metodách obrábění, přicházejí na řadu dokončovací operace, jako je broušení a leštění, aby se odstranily tyto povrchové vady.

Kombinací technologie stříhání s použitím TRIP oceli, kde dochází vlivem tzv. TRIP efektu k vysokému zpevnění materiálu v oblasti plastických deformací, dostaneme v horní části střížné hrany vysoce zpevněnou oblast. Tato oblast vzniká vlivem plastického stříhu, kde se zhušťují zrna materiálu a tím dojde ke zpevnění mikrostruktury. Na Obr. 3.2.2.2 vidíme, že zpevněná oblast zabírá přibližně

1/3 tloušťky střížné hrany. Tato fakta jsou důvodem, proč mají vzorky připravené technologií stříhání lepší únavové vlastnosti, než vzorky vyráběné frézováním.

Z výsledného grafického znázornění vidíme, že technologie dělení materiálu má významný vliv na konečné únavové vlastnosti součástí z vysokopevnostní oceli.

5 Závěr

V rámci předkládané diplomové práce byl, v souladu se zadáním DP, zjišťován vliv různého způsobu dělení TRIP oceli RA-K 40/70 na jeho cyklické vlastnosti. V teoretické části diplomové práce byla vypracována rešerše používaných druhů materiálů pro stavbu karoserie automobilu a metodika provádění a vyhodnocení cyklických zkoušek. Experimentální část diplomové práce byla zaměřena na praktické zjištění vlivu dělení testovaného materiálu pomocí laseru, stříhání a obrábění na cyklickou únavu.

Kvalita hran testovaných vzorků byla hodnocena pomocí metalografických výbrusů. Dělením laserem vznikla na řezné hraně tepelně ovlivněná oblast, která negativně ovlivnila povrchové mechanické vlastnosti zkušebních vzorků. U vzorků dělených metodou stříhání, vznikla velice kvalitní střížná hrana. To bylo způsobeno především vhodně zvolenou střížnou mezerou. Obrobená řezná hrana měla výslednou drsnost povrchu $R_a = 3,2 \mu\text{m}$. Kvalitnější obrobené plochy bychom dosáhli dokončovacími metodami, jako jsou broušení a leštění.

Únavové vlastnosti testovaných vzorků a tím i zjištění vlivu jednotlivých technologií dělení byly hodnoceny pomocí Wöhlerových křivek. Z naměřených dat a sestrojených Wöhlerových křivek je patrné, že nejhorší vliv na únavové vlastnosti má technologie řezání laserovým paprskem. To je dáno především tepelně ovlivněnou oblastí na řezné hraně vzorku. Mez únavy u takto vyrobených vzorků je 128,5 MPa. Nejpozitivnější vliv na únavové vlastnosti má technologie stříhání. To je dáno zpevněnou oblastí v horní části střížné hrany. Mez únavy stříhaných vzorků je 242 MPa. Obráběné vzorky, které byly brány jako referenční, měli téměř srovnatelné únavové vlastnosti jako stříhané vzorky. Jejich mez únavy je 209 MPa. Pokud bychom chtěli dosáhnout lepších výsledků, musely by se upravit řezné podmínky pro obrábění, aby nevznikalo tak vysoké tahové zbytkové napětí na povrchu řezné hrany.

Obvykle se experimentálně stanovují Wöhlerovi křivky pro dva různé zátěžné cykly, střídavý a míjivý. Vzhledem k časové náročnosti úlohy se nepodařilo uskutečnit cyklické zkoušky pro případ střídavého zátěžného cyklu. Pro budoucí využití TRIP oceli na dynamicky namáhané části automobilu, bych doporučil provést cyklické zkoušky i pro střídavý zátěžný cyklus. Další výzkum by měl být zaměřen na měření mikrotvrdosti řezné hrany, protože každá oblast řezné hrany vykazuje jiné mechanické vlastnosti.

6 Seznam použité literatury

- [1] [Online] URL: <www.worldautosteel.org> [Citováno: 2014-10-10].
- [2] Kolnerová, M.: *Trendy ve vývoji plechů pro automobilový průmysl*.
Technická univerzita v Liberci, Katedra strojírenské technologie, Liberec, 2008
[Online] URL: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf>, [Citováno: 2014-10-10].
- [3] Herditzky, A., Kicková, M., Olexová, M.: *Moderne koncipované ocele použité při výrobě automobilové karosérie*.
Technická univerzita v Košiciach, Katedra technológií a materiálov, Košice, 2008.
- [4] Girman, V., Hrabčáková, V.: *Kovové materiály automobilových konstrukcí – II Karoséria a karosárske plechy*.
Katedra fyziky kondenzovaných látok, UJPŠ, Košice, 2012.
- [5] Hall, J.N.: *Evolution of advanced high strength steels in automotive, USA*, 2011.
- [6] [Online] URL: <<http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/DS/DD/EN>>, [Citováno: 2014-10-13].
- [7] Kvackaj, T.: *Výskum ocel'ových materiálov pre ultral'ahkú karosériu osobných automobilov*, 2005.
- [8] Kříž, A.: *Kovové materiály*, ZČU, 2010.
- [9] [Online] URL: <<http://ispatguru.com/dual-phase-steels>>, [Citováno: 2014-10-13].

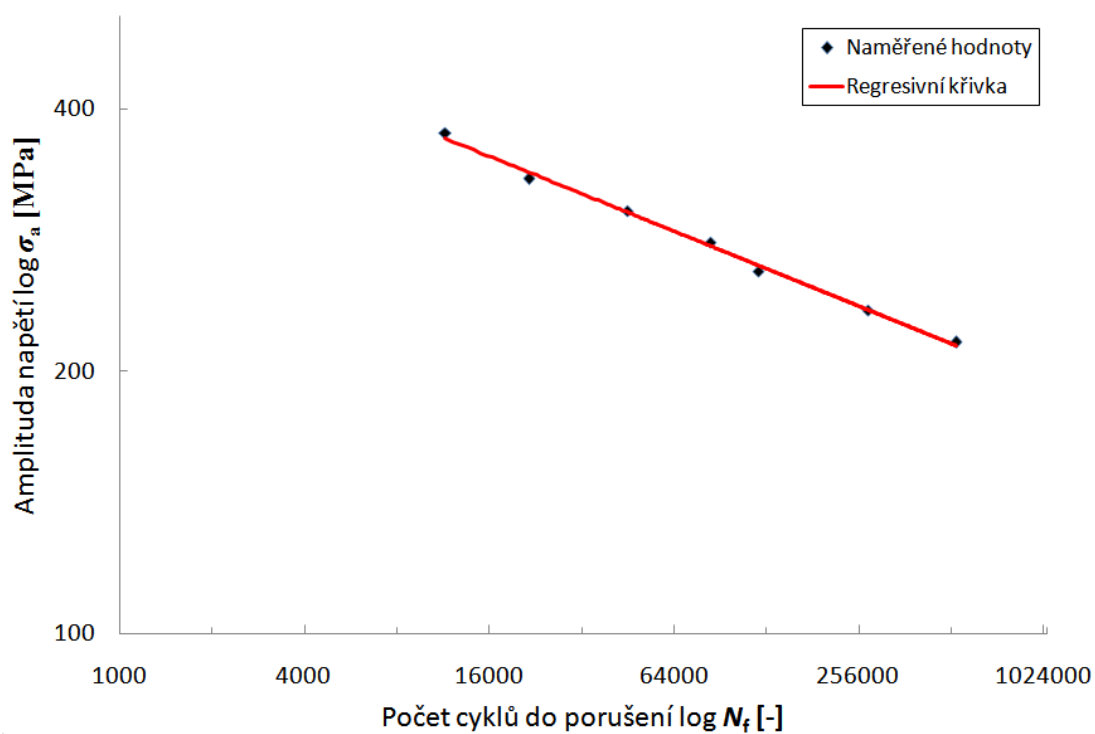
- [10] [Online] URL: <<http://www.thefabricator.com/article/metalsmaterials/introduction-toadvanced-high-strength-steels---part-i>>, [Citováno: 2014-10-14]
- [11] Mehta, R.: *Twinning induced plasticity (TWIP) steel improves car safety*, 2007.
[Online] URL: <www.iom3.org/content/materials-world>,
[Citováno: 2014-10-14].
- [12] AHSS Application Guidelines, WorldAutoSteel, 2009.
[Online] URL: <<http://www.worldautosteel.org/ahss-guidelines-v5-now-available-for-digital-reader>>, [Citováno: 2014-10-15].
- [13] Jágrová, J., Čapek, L.: *Dynamická únosnost a životnost*, Liberec, 2014.
- [14] [Online] URL: <http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/339/.content/files/VZM8_UnavaMaterialu.pdf>, [Citováno: 2014-12-10].
- [15] Růžička, M., Hanke, M., Rost, M.: *Dynamická pevnost a životnost*, ČVUT , Praha, 1989.
[Online] URL: <http://mechanika2.fs.cvut.cz/documents/dpz_high.pdf>,
[Citováno: 2014-12-10].
- [16] Serensen, S.V., Kogajev, V.P., Šnejderovič R.M.: *Únosnost a pevnostní výpočty strojních součástí*, SNTL, Praha 1967.
- [17] Peterson, R.E.: *Stress Concentration Factors*, John Wiley&Sons, New York, 1974.
- [18] Lauschmann, H.: *Mezní stavy I. Únava material*, ČVUT, Praha, 1999.
- [19] Höschl, C., a kol.: *Tabulky pro konstruktéry*, SNTL, Praha, 1961.
- [20] Holzmann, M., Klesni, M.: *Křehký a únavový lom materiálů a konstrukcí*, SNTL, Praha, 1972.

- [21] [Online] URL: <<https://www.efatigue.com/hightemp/background/tmf.html>>, [Citováno: 2015-01-15].
- [22] [Online] URL: <<http://met-tech.com/fractured-input-shaft.html>>, [Citováno: 2015-01-15].
- [23] Stančeková, D., Czán, A., Pilc, J.: *Integrita povrchu po deleni kovových materiálův najčastejšie používanými progresívnymi metódami*, ZČU, Plzeň, 2013.
[Online] URL: <http://integrita.zcu.cz/download/skola2/zilina_prez1.pdf>, [Citováno: 2015-01-15].
- [24] [Online] URL: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>>, [Citováno: 2015-01-15].
- [25] [Online] URL: <<http://www.techno-mat.cz/ksp-tpk/tzp>>, [Citováno: 2015-01-16].
- [26] Bumbálek, B.: *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti její plochy pro její funkci*.
[Online] URL: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf>, [Citováno: 2015-01-16].

7 Seznam příloh

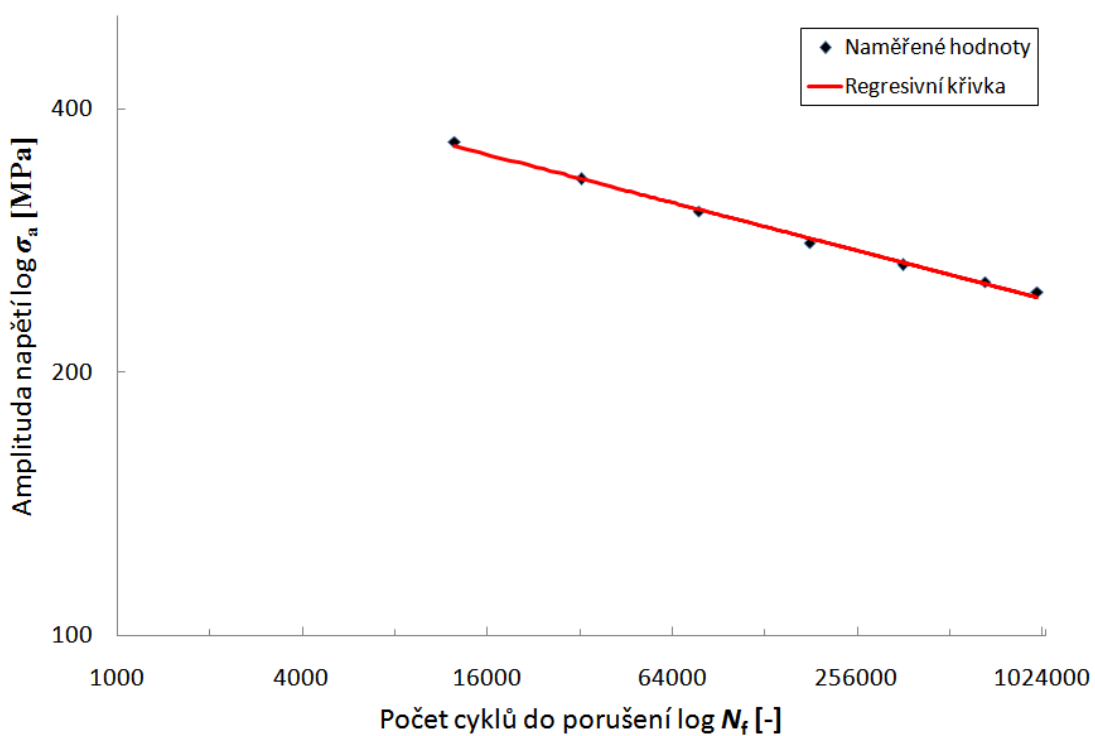
- I Oblast časované pevnosti zobrazená v logaritmických souřadnicích pro obrobené vzorky.
- II Oblast časované pevnosti zobrazená v logaritmických souřadnicích pro stříhané vzorky.
- III Detail křehkého lomu vzorku řezaného laserem (amplituda napětí 325 MPa).
- IV Detail šíření trhlin u vzorku řezaného laserem (amplituda napětí 201 MPa).
- V Detail křehkého lomu vzorku řezaného laserem (amplituda napětí 201 MPa).
- VI Detail šíření trhlin u obráběného vzorku (amplituda napětí 325 MPa).
- VII Detail křehkého lomu u obráběného vzorku (amplituda napětí 325 MPa).
- VIII Detail šíření trhlin u obráběného vzorku (amplituda napětí 235 MPa).
- IX Detail křehkého lomu u obráběného vzorku (amplituda napětí 235 MPa).
- X Detail vzniku lomu u stříhaného vzorku (amplituda napětí 325 MPa).

Příloha I



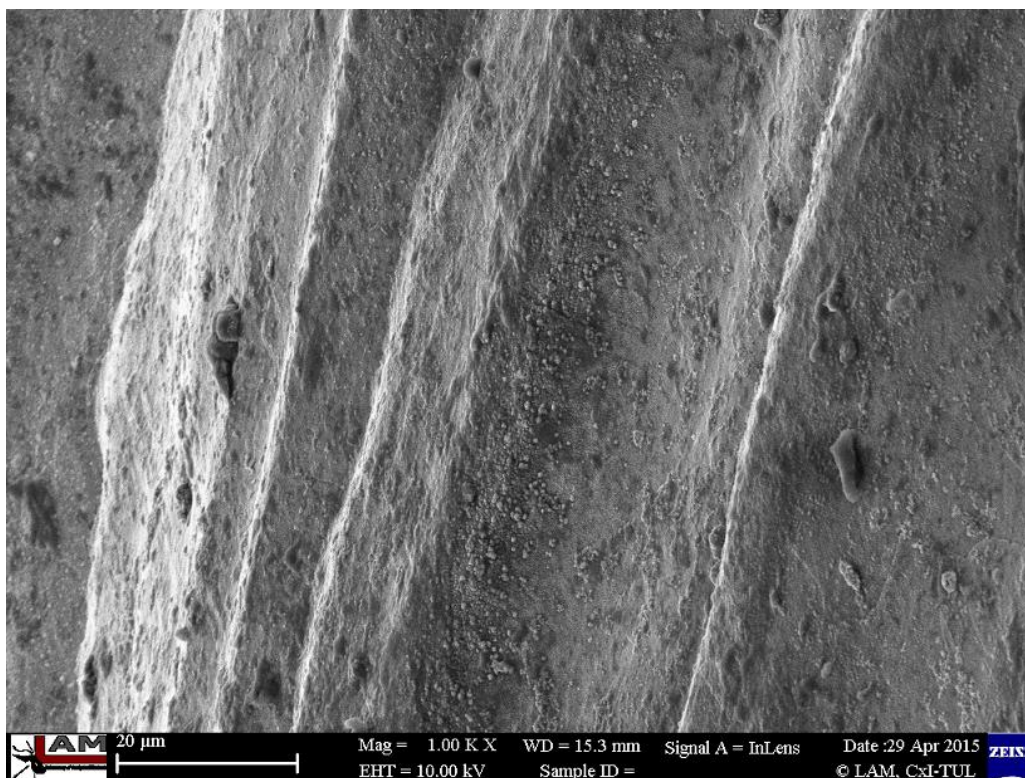
Oblast časované pevnosti zobrazená v logaritmických souřadnicích pro obrobené vzorky

Příloha II



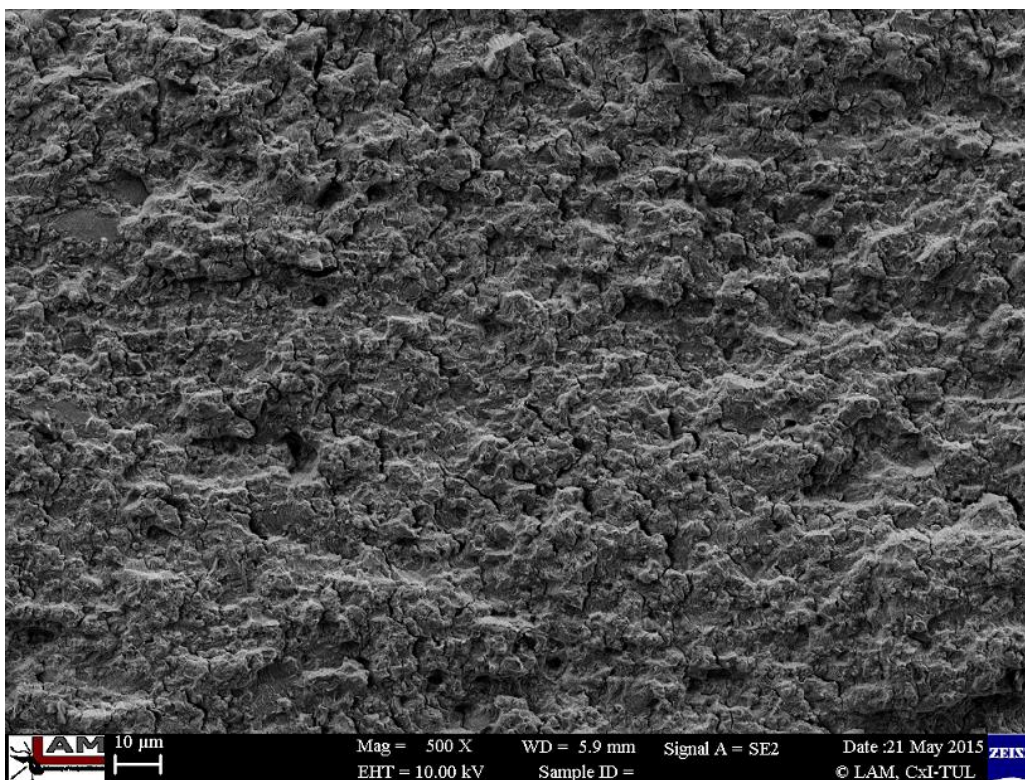
Oblast časované pevnosti zobrazená v logaritmických souřadnicích pro stříhané vzorky

Příloha III



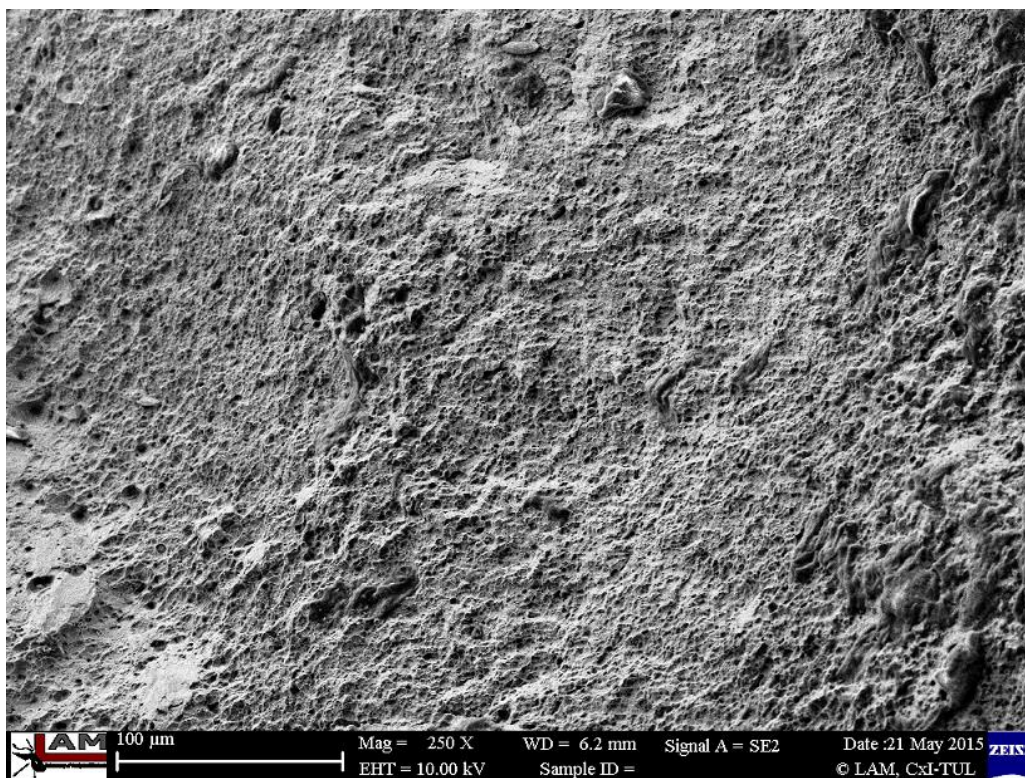
Detail křehkého lomu vzorku řezaného laserem (amplituda napětí 325 MPa)

Příloha IV



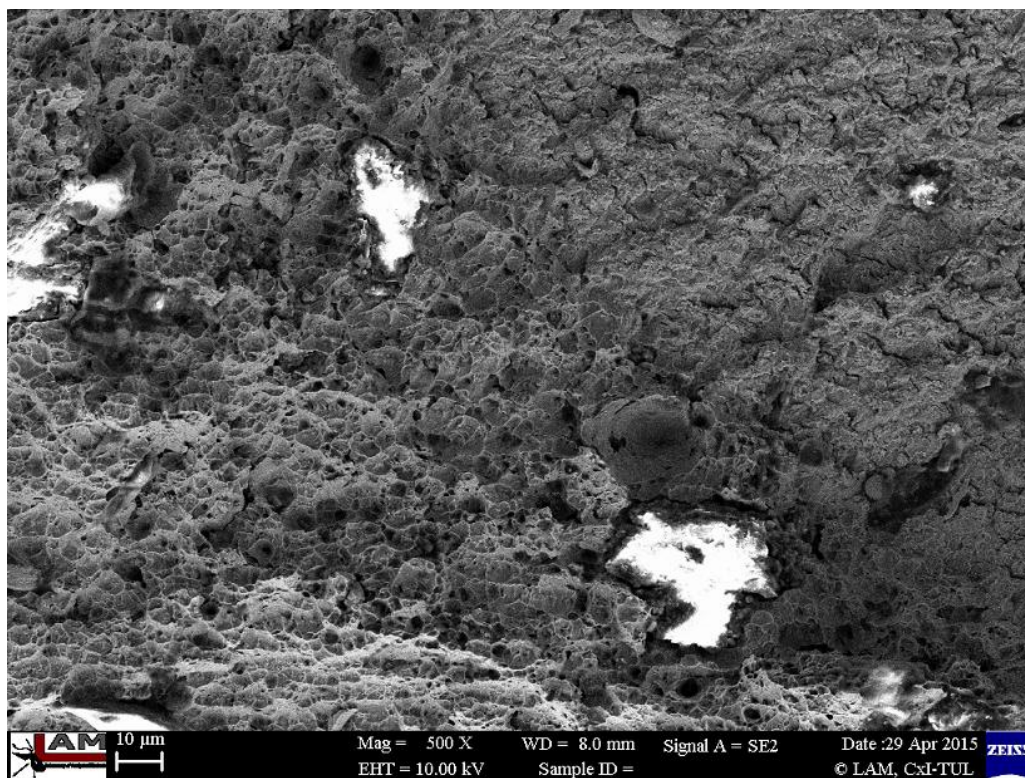
Detail šíření trhlin u vzorku řezaného laserem (amplituda napětí 201 MPa)

Příloha V



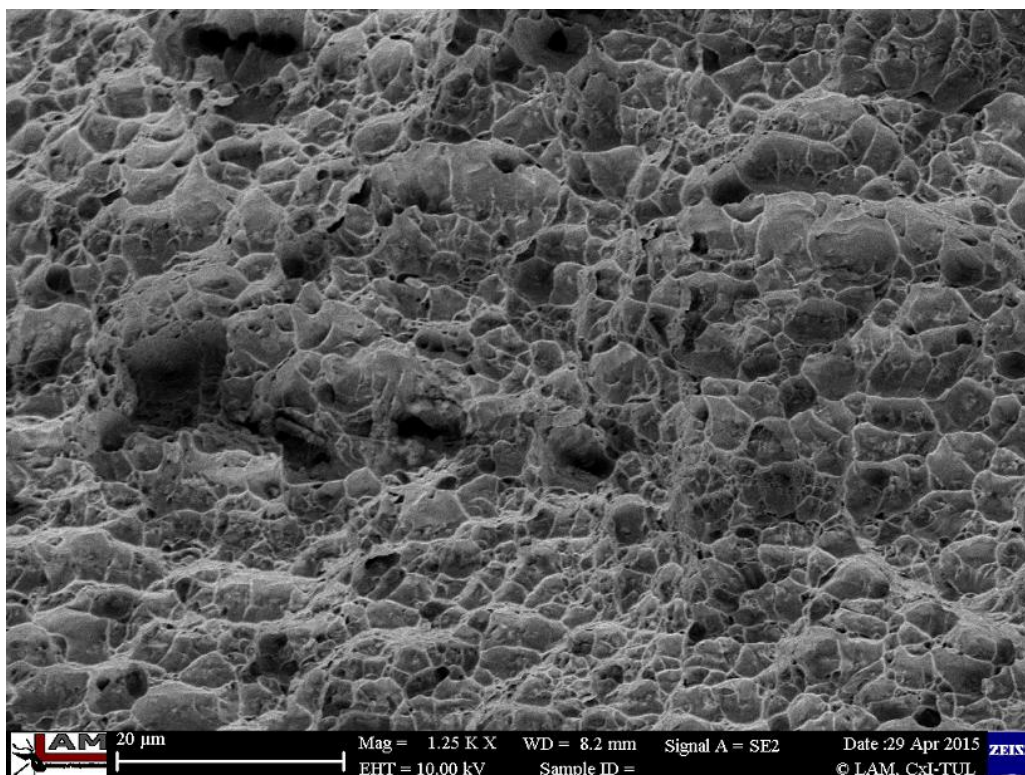
Detail křehkého lomu vzorku řezaného laserem (amplituda napětí 201 MPa)

Příloha VI



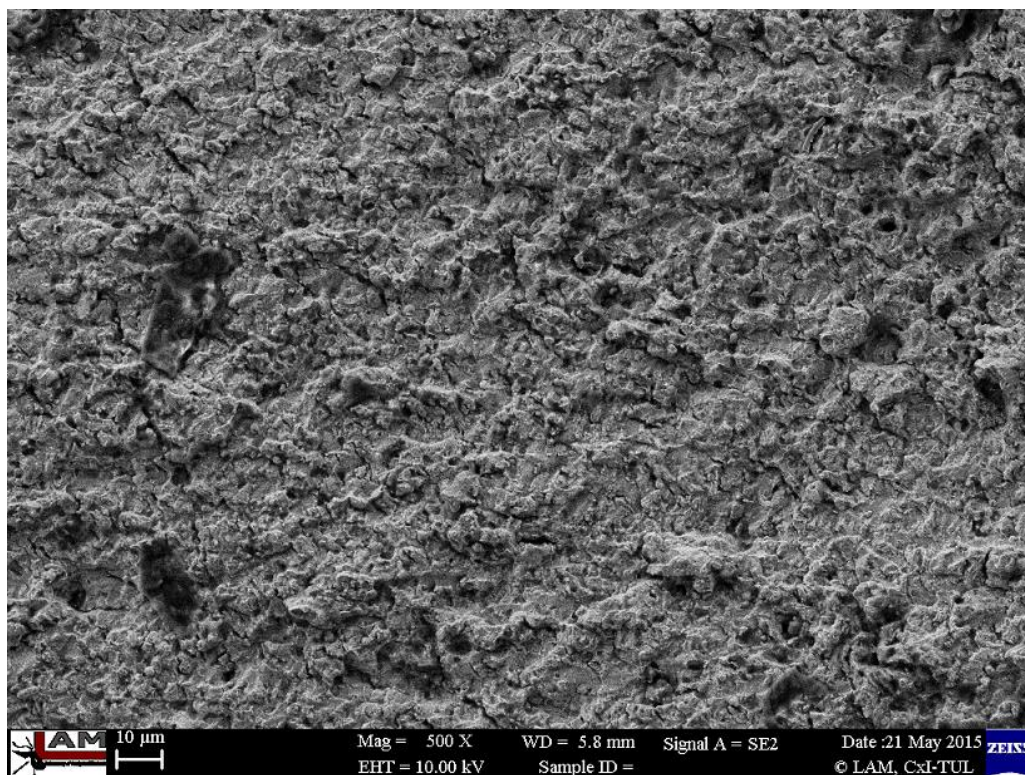
Detail šíření trhlin u obráběného vzorku (amplituda napětí 325 MPa)

Příloha VII



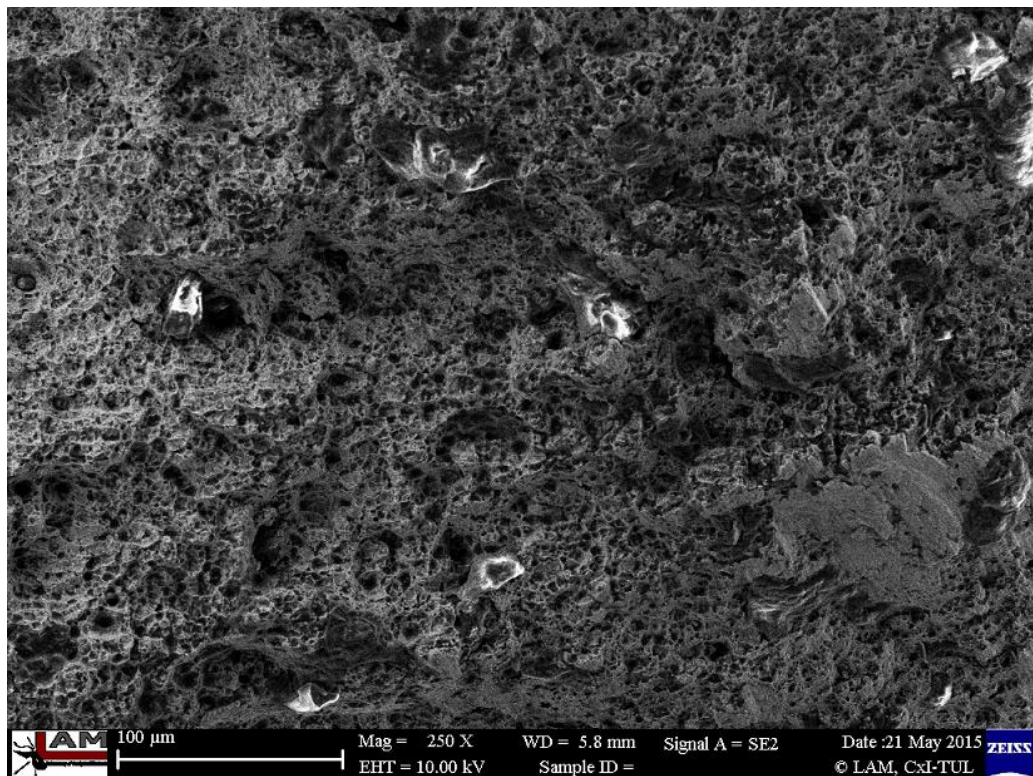
Detail křehkého lomu u obráběného vzorku (amplituda napětí 325 MPa)

Příloha VIII



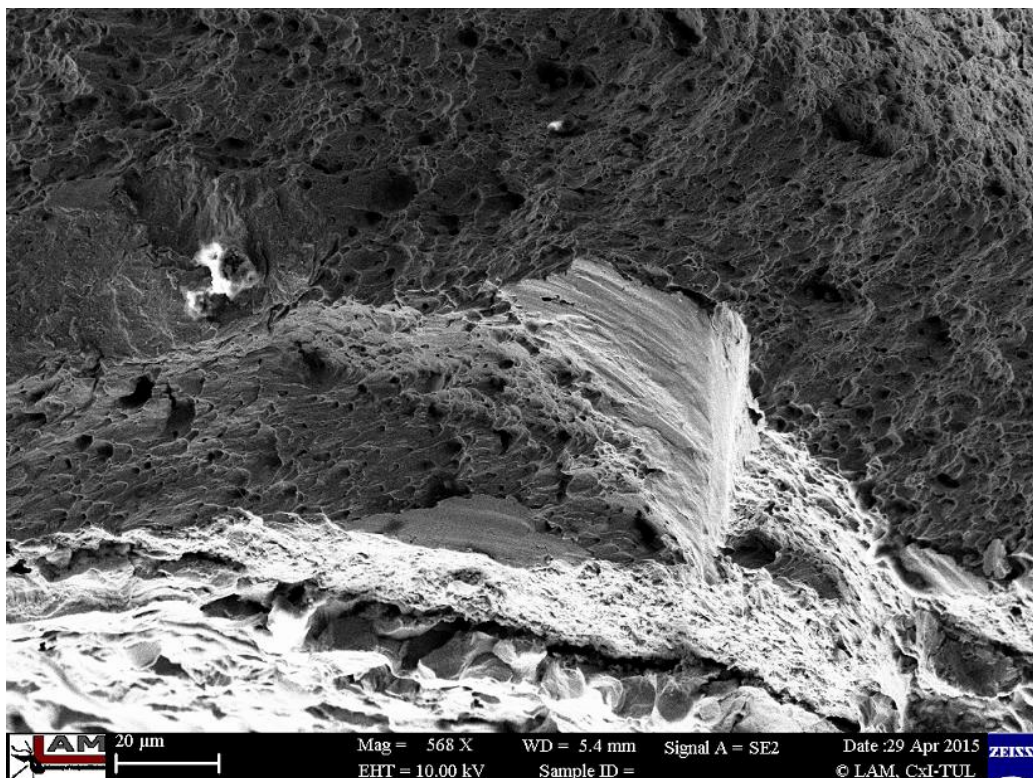
Detail šíření trhlin u obráběného vzorku (amplituda napětí 235 MPa)

Příloha IX



Detail křehkého lomu u obráběného vzorku (amplituda napětí 235 MPa)

Příloha X



Detail vzniku lomu u stříhaného vzorku (amplituda napětí 325 MPa)