

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270014 – Materiálové inženýrství a výrobní technologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zvyšování únavové životnosti svarů vysokopevnostních ocelí
metodou HFMI

Autor: **Bc. Bořek Ozom**
Vedoucí diplomové práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**
Konzultant diplomové práce: **Ing. Miloslav Kepka, Ph.D.**

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Bořek OZOM**
Osobní číslo: **S20N0042K**
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Téma práce: **Zvyšování únavové životnosti svarů vysokopevnostních ocelí metodou HFMI**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Aplikace vysokopevných ocelí pro kolejová vozidla
3. Únavové vlastnosti a zbytková napětí svařovaných konstrukcí
4. Popis technologie vysokofrekvenčního mechanického impaktu
5. Experimentální program – popis svarových spojů s aplikací HFMI
6. Diskuse výsledků
7. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MASUBUCHI, Koichi. Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences. Publisher: Pergamon Press, 1980. ISBN: 0080227147.

MARQUIS, Gary B., BARSOUM Zuheir. IIW Recommendations for the HFMI Treatment: For Improving the Fatigue Strength of Welded Joints. Springer Singapore, 2016. ISBN: 978-981-10-2503-7.

MALLICK, P. K. Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. Woodhead Publishing, 2010. ISBN: 9781613443644.

LI, Guo-Qiang, WANG Yan-Bo. Behavior and Design of High-Strength Constructional Steel. Woodhead Publishing, 2020. ISBN: 0081029314.

TAPAS, K. R., BASUDEV, B., CHIRADEEP, G. Advanced High Strength Steel: Processing and Applications. Springer Singapore, 2018. ISBN: 978-981-10-7891-0.

RAMESH, S. Welding processes handbook. JOHN WILEY & Sons, 2023. ISBN: 9781119819059.

MAHADEV, S., MURALIDHAR, T. Welding and Joining of Advanced High Strength Steels. Woodhead Publishing, 2015. ISBN: 085709436X.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Miloslav Kepka**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Ing. Josef Odehnal, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, IWE a konzultantovi Ing. Miloslavu Kepkovi, Ph.D. za vstřícnost, ochotu, pomoc, věcné připomínky, a především za čas, který mi věnovali v průběhu jejího psaní. Za pomoc a trpělivost děkuji také všem, kteří se na diplomové práci podíleli během zpracovávání její experimentální části. Zároveň bych chtěl poděkovat rodině za podporu v průběhu celého studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Ozom	Jméno Bořek	
STUDIJNÍ OBOR	N0715A270014 – Materiálové inženýrství a výrobní technologie		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Jméno Antonín	
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Zvyšování únavové životnosti svarů vysokopevnostních ocelí metodou HFMI		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	93	TEXTOVÁ ČÁST	74	GRAFICKÁ ČÁST	19
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	<p>Rešeršní část diplomové práce je zaměřena na problematiku únavové životnosti a zbytkových napětí u svařovaných konstrukcí. Zabývá se také možnostmi aplikace vysokopevnostních ocelí ve vazbě na kolejová vozidla a detailně popisuje technologii vysokofrekvenčního mechanického impaktu (HFMI) a její úskalí. Cílem diplomové práce je provést a vyhodnotit únavové zkoušky svařenců z ocelí S235JR a S460MC u nichž byla aplikována technologie HFMI. Výstupem experimentální části diplomové práce bude posouzení vlivu technologie HFMI u zkoušených materiálů.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	HFMI, svařování, zbytkové napětí, únavová životnost, kolejová vozidla

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Ozom	Name Bořek	
FIELD OF STUDY	N0715A270014 – Materials science and manufacturing technology		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU – FST – KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Increasing fatigue life of High Strength Steels using HFMI (High Frequency Mechanical Impact)		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	93	TEXT PART	74	GRAPHICAL PART	19
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	<p>The theoretical part of the diploma thesis is focused on the topic of fatigue life and residual stresses in welded structures. It also deals with the possibility of application of high-strength steels in connection with rail transport and describes in detail the technology of high-frequency mechanical impact (HFMI). The aim of the diploma thesis is to perform and evaluate fatigue tests on welded samples made of steels S235JR and S460MC and examine the influence of HFMI. The output of the experimental part of this thesis will be an assessment of the influence of HFMI technology on the tested materials.</p>
KEY WORDS	HFMI, welding, residual stresses, material fatigue, rail transport

Seznam použitých veličin a symbolů

Veličina	Jednotka	Název
f	[Hz]	Frekvence
E_I	[kN]	Energie úderu
ϕ	[°]	Úhel mezi povrchem a osou indentoru
ψ	[°]	Úhel mezi směrem opracování a osou indentoru
w	[mm/s]	Rychlost posuvu
l	[mm]	Délka
σ	[MPa]	Napětí
σ_a	[MPa]	Amplituda napětí
σ_c	[MPa]	Mez únavy (střídavé napětí)
σ_{HC}	[MPa]	Mez únavy (míjivé napětí)
ε	[-]	Deformace
ε_{at}	[-]	Amplituda celkové poměrné deformace
N_f	[-]	Počet cyklů do lomu
ε_{ae}	[-]	Amplituda elastické deformace
ε_{ap}	[-]	Amplituda plastické deformace
σ_f'	[MPa]	Součinitel únavové pevnosti
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu (Youngův modul pružnosti)
ε'_f	[-]	Součinitel únavové tažnosti
b	[-]	Exponent únavové pevnosti
c	[-]	Exponent únavové tažnosti
$\Delta\sigma$	[MPa]	Rozkmit napětí
$f(t)$	[-]	Korekční faktor tloušťky
t_{ref}	[mm]	Referenční tloušťka
n	[-]	Koeficient typu svaru
m	[-]	Směrnice šikmé části S-N křivky
q	[-]	Koeficient šikmé části S-N křivky
Q_s	[kJ/mm]	Specifické vnesené teplo
η	[-]	Součinitel účinnosti přenosu tepla
U	[V]	Svařovací napětí
I	[A]	Svařovací proud
v_s	[mm/s]	Svařovací rychlost

v_d	[<i>m/min</i>]	Rychlost drátu
σ_{hs}	[<i>MPa</i>]	Hot-spot napětí
t	[<i>mm</i>]	Tloušťka plechu
$\sigma_{0,4t}$	[<i>MPa</i>]	Napětí ve vzdálenosti 0,4t
$\sigma_{1,0t}$	[<i>MPa</i>]	Napětí ve vzdálenosti 1,0t
F	[<i>N</i>]	Síla

Další označení a zkratky

<i>HFMI</i>	Vysokofrekvenční dopad indentoru (z angl. <i>High-Frequency Mechanical Impact</i>)
<i>DP</i>	Diplomová práce
<i>RTI</i>	Regionální technologický institut Západočeské univerzity v Plzni
<i>UIT</i>	Ultrazvukové opracování indentorem (z angl. <i>Ultrasonic Impact Treatment</i>)
<i>UP</i>	Ultrazvukový peening (z angl. <i>Ultrasonic Peening</i>)
<i>UPT</i>	Ultrazvukové peeningové opracování (z angl. <i>Ultrasonic Peening Treatment</i>)
<i>HiFIT</i>	Vysokofrekvenční opracování (z angl. <i>High-Frequency Impact Treatment</i>)
<i>PIT</i>	Pneumatické opracování indentorem (z angl. <i>Pneumatic Impact Treatment</i>)
<i>UNP</i>	Ultrazvukový jehlicový peening (z angl. <i>Ultrasonic Needle Peening</i>)
<i>PSP</i>	Perzistentní skluzové pásy
<i>HSLA</i>	High Strength Low Alloy oceli
<i>ZN</i>	Zbytková napětí
<i>FAT</i>	Únavová pevnost (z angl. <i>Fatigue strength</i>)
<i>CEV</i>	Uhlíkový ekvivalent
<i>TOO</i>	Tepelně ovlivněná oblast
<i>NDT</i>	Nedestruktivní zkouška
<i>VT</i>	Vizuální zkouška
<i>RT</i>	Rentgenová prozařovací zkouška
<i>ZM</i>	Základní materiál
<i>IIW</i>	International Institute of Welding
<i>HV01</i>	Tvrдость dle Vickerse při zatížení 0,1 kg

Obsah

1. Úvod	13
1.1. Společnost Škoda Transportation a.s.	14
2. Únava materiálů	14
2.1. Vliv svarových spojů na únavové poškození	16
2.2. Mechanismus únavového porušení	17
2.2.1. První stádium – Změny vlastností materiálu	17
2.2.2. Druhé stádium – Iniclace únavových trhlin	18
2.2.3. Třetí stádium – Šíření únavových trhlin	19
2.2.4. Čtvrté stádium – Únavový lom	21
2.3. Křivky únavové životnosti	22
2.3.1. Wöhlerova křivka	23
3. Přehled metod pro úpravu svarových spojů po svařování	25
3.1. High-Frequency Mechanical Impact (HFMI)	27
3.1.1. Přístroje na aplikaci HFMI	27
3.1.2. Faktory ovlivňující kvalitu provedeného opracování	29
3.1.3. Úprava paty svaru	31
3.1.4. Hodnocení parametrů výsledného opracování	32
3.1.5. Zlepšení únavové životnosti metodou HFMI	33
4. Aplikace vysokopevnostních ocelí pro kolejová vozidla	37
4.1. HSLA oceli	38
4.1.1. Výroba kovaných HSLA ocelí	39
4.1.2. Výroba HSLA ocelí řízeným válcováním	40
5. Zbytková napětí svařovaných konstrukcí	41
6. Cíl experimentálního programu	46
7. Experimentální vzorky	46
7.1. Ocel S235JR	46
7.2. Ocel S460MC	47
7.3. Zkušební tělesa	48

7.3.1. Parametry svařování	50
7.4. NDT zkoušky zkušebních těles z oceli S460MC	52
7.4.1. Výsledky NDT zkušebních těles „1“	54
7.4.2. Výsledky NDT zkušebních těles „2“	55
7.4.3. Výsledky NDT zkušebních těles „3“	56
7.4.4. Výsledky NDT zkušebních těles „4“	58
8. Zkušební stand.....	59
9. Únavové zkoušky	60
9.1. Parametry únavových zkoušek a jejich vyhodnocení.....	61
9.1.1. Hodnocení únavových zkoušek z oceli S235JR.....	63
9.1.2. Hodnocení únavových zkoušek z oceli S460MC.....	64
9.2. Únavové trhliny ve vztahu ke struktuře materiálu	66
9.2.1. Hodnocení struktury a rozvoje trhlin u oceli S235JR	67
9.2.2. Hodnocení struktury a rozvoje trhlin u oceli S460MC	73
10. Měření mikrotvrdosti ve směru šíření trhliny	80
10.1. Mikrotvrdost u vzorků z oceli S235JR	82
10.2. Mikrotvrdost u vzorků z oceli S460MC.....	83
11. Diskuse výsledků.....	84
12. Závěr	85
13. Bibliografie.....	86
14. Seznam obrázků.....	90
15. Seznam tabulek.....	93

TEORETICKÁ ČÁST

1. Úvod

V současnosti patří svařování mezi nejrozšířenější způsoby spojování kovových materiálů a umožňuje vytvoření jednoduchých spojů s vysokou pevností. Během svařování však dochází ke vzniku nehomogenit, zbytkových napětí a dalších faktorů majících nepříznivý vliv na únavovou životnost součástí.

Technologie *HFMI* (High-Frequency Mechanical Impact) je spolehlivou, efektivní a lehce aplikovatelnou metodou pro lokální zlepšení únavových vlastností v místě, kde svar vniká do základního materiálu, tzv. paty svaru. Tato oblast je společně s kořenem svaru hlavním místem iniciace únavových trhlin.

V současnosti je vysokocyklová únavová životnost svarů u vysokopevnostních ocelí velmi diskutovanou problematikou, neboť brání jejich širší aplikaci v oblastech, kde tato vlastnost patří mezi hlavní kritéria použitelnosti určitého materiálu. Metody pro vylepšení vlastností v místě paty svaru byly rozsáhle zkoumány a bylo prokázáno, že je možné docílit zvýšené únavové životnosti aplikací technologie *HFMI* v místě přechodu svaru do materiálu. Poněvadž tato problematika není standardizovaná a zároveň jsou pokusy prováděny za různých zatěžovacích podmínek na různých materiálech se výstupy jednotlivých výzkumů mírně rozcházejí. V poslední řadě nesmí být opomenut lidský faktor, neboť i u této technologie, stejně jako u samotného svařování je zásadní, aby byla dodržena pravidla aplikace.

Souhrnným zjištěním na základě prováděných experimentů bylo, že při aplikaci metody *HFMI* je nárůst únavové životnosti úměrný pevnosti svařovaného materiálu, tj. s rostoucí pevností základního materiálu roste příznivý účinek *HFMI*.

Diplomová práce vznikla v rámci spolupráce s firmou Škoda Transportation a.s. a regionálním technologickým institutem (*RTI*) Západočeské univerzity v Plzni s cílem zlepšení únavové životnosti svarových spojů pro umožnění aplikace nových materiálů v konstrukci hrubé stavby kolejových vozidel. [1; 2]

1.1. Společnost Škoda Transportation a.s.

Společnost Škoda Transportation je česká strojírenská firma se sídlem v Plzni, která působí v oblasti dopravního strojírenství. Mezi portfolio výrobků patří jak vozy pro městskou dopravu, tak i pro železnici. Do obchodního rejstříku byla poprvé zapsána 1. března 1995 pod názvem Škoda Dopravní technika s.r.o., jakožto dceřiná společnosti Škody Plzeň. V prosinci roku 2004 byla firma přejmenována na Škoda Transportation, přičemž akciovou společností se stala až 1. dubna 2009. Od roku 2018 je majoritním vlastníkem firmy skupina PPF. V současnosti patří firma mezi významné výrobce kolejových vozidel zejména v Evropě a s jejími produkty je možné se často setkat i v České republice, kde například v hlavním městě Praze jezdí 250 kusů moderních a 100 % nízkopodlažních tramvají typu 15T. Aktuální logo společnosti Škoda Transportation je zobrazeno na *Obr. 1*. [3; 4; 5]

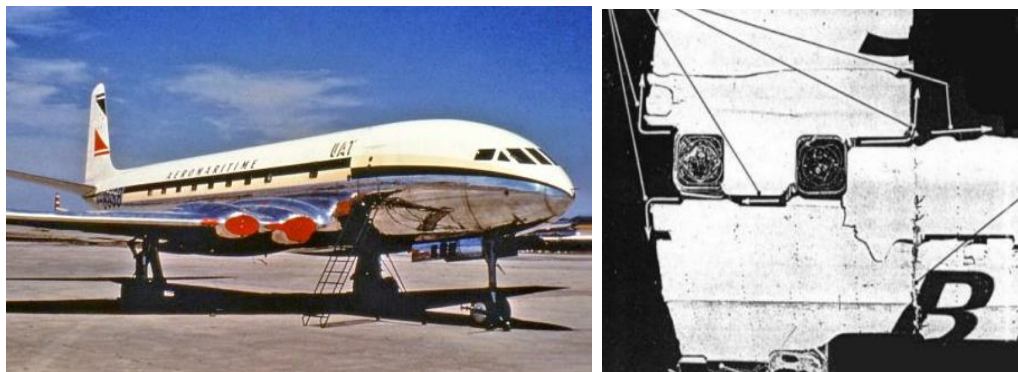


Obr. 1 - Logo Škoda Transportation a.s. [3]

2. Únava materiálů

Únavu materiálu lze popsat jako proces kontinuálního porušování materiálu způsobený namáháním cyklického charakteru. Kumulativním účinkem pomalu se hromadících dislokací v kritických místech může dojít k iniciaci a šíření únavové trhliny, která způsobí selhání namáhané součásti. Problematika únavy materiálů se týká zejména automobilové, letecké a železniční dopravy, dále také rotujících strojů, u nichž k cyklickému zatěžování dochází, například turbín. V případech, kdy kromě mechanického namáhání dochází i k namáhání teplotnímu je únavové hledisko o to významnější. Každý konstrukční celek má kritické body, které jsou na únavové porušení náchylnější. Jedná se o nejtenčí místa, geometrické přechody, ostré hrany, svary a jiné vruby. V současné době je ale na základě počítačového modelování a experimentů možné součásti dimenzovat tak, aby vydržely předepsaný počet cyklů.

Jednou z prvních katastrof způsobených únavovým selháním materiálu, které upozornily na důležitost této disciplíny, byly nehody letounů de Havilland Comet 1 v letech 1953 až 1954. U všech těchto nehod došlo k rozlomení trupu letadel v průběhu letu. Pozdější vyšetřování dospělo k tomu, že poškození bylo způsobeno únavovými trhlinami, které se šířily od ostrých hran špatně vytvořených nýtových spojů, které způsobily koncentraci napětí, viz Obr. 2. [6; 7]



Obr. 2 - Letoun "de Havilland Comet 1" (vlevo) a poskládané díly trupu po havárii, kde je možné vidět únavovou trhlinu šířící se od hrany okna (vpravo) [7]

Analogické riziko představují v konstrukcích svary, které jsou metalurgicko-technologickými vruby, a které zvyšují náchylnost materiálu na únavové poškození. Postupem času bylo na popud uvedených tragédií zjištěno, že je možné ovlivňovat únavové charakteristiky součásti třemi způsoby. Volbou materiálu, jeho zpracováním a geometrií konstrukce. Poněvadž jsou svary metalurgicko-technologickými vruby a v jejich místě dochází ke koncentraci napětí, začala být únava blíže zkoumána i ve vazbě ke svařovaným konstrukcím.

Proces únavy materiálu postupuje pomalu, ale pomocí postupně se zvětšující plastické deformace se v materiálu hromadí energie, při jejímž uvolnění dojde k iniciaci únavové trhliny, která se dál šíří, dokud nedojde k jeho poškození. Pro únavové trhliny je charakteristické, že se šíří od povrchu, kde bývá zpravidla největší napětí. Únavové lomy jsou nebezpečné tím, že vznikají i při napětích nižších, než je mez kluzu daného materiálu. [8; 9]

Materiál nepodléhá únavě pouze vlivem mechanického namáhání. Mezi další druhy patří únava akustická, kontaktní, teplotní, nebo únava opakovaným rázem. Zároveň jsou v praxi materiály běžně vystaveny i vlivům prostředí a únavové procesy jsou urychlovány korozi.

Faktorů ovlivňujících výslednou odolnost proti únavovým lomům je mnoho a patří mezi ně například:

- i. Typ materiálu (křehký, nebo houževnatý – čím křehčí, tím je náchylnější)
- ii. Inkluze (zušlechtěné oceli jsou náchylné již na vměstky o velikosti 4 μm)
- iii. Mez pevnosti v tahu
- iv. Mikrostruktura (čím je zrno větší, tím méně energie ocel dokáže pohltit a tím dříve dojde k iniciaci únavové trhliny)
- v. Geometrie a velikost součásti (ostré hrany, přechody a vruby jsou kritickými místy a s rostoucí velikostí součásti mez únavy klesá)
- vi. Kvalita povrchu (čím nižší je drsnost povrchu, tím vyšší je mez únavy)
- vii. Teplota (mez únavy s rostoucí teplotou klesá)
- viii. Tepelné / Chemicko-tepelné zpracování (kalení, cementace, nitridace, nebo zušlechtování zlepšují únavovou odolnost ovlivněním zbytkových napětí)
- ix. Charakter namáhání (tahem, ohybem, krutem, nebo složené – složené namáhání významně snižuje mez únavy materiálu)
- x. Mechanické povrchové úpravy (peening, *HFMI*, kladívkování – příznivý vliv na životnost)
- xi. Typ namáhání (rázové, mříjivé, kmitavé, náhodné)
- xii. Prostředí (korozní důlky působí jako vrub)

A další. [9]

Jedním z parametrů únavové odolnosti je mez únavy σ_c , která je v závislosti na materiálu vyjádřena amplitudou či rozkmitem napětí, při kterém materiál vydrží teoreticky nekonečný počet cyklů. [9]

2.1. Vliv svarových spojů na únavové poškození

Procesem svařování dochází k nerovnoměrnému vnášení tepla do materiálu, které výrazně ovlivňuje mikrostrukturu materiálu a může být původcem vad jakými jsou trhliny, nebo póry. Natavením základního materiálu dojde k úplnému rozrušení původní mikrostruktury v blízkosti svaru a ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti (dále *TOO*). Oceli mají před svařováním optimalizovaný poměr mechanických vlastností, které jsou v důsledku vneseného tepla změněny, zpravidla zhoršeny.

Mikrostruktura v *TOO* je oproti původní mikrostruktuře hrubší, což je z únavového hlediska nežádoucí. Zároveň je samotný svar metalurgicko-technologickým vrubem a představuje koncentrátor napětí. Kromě nehomogenit uvnitř materiálu dochází ke zvýšení napětí i v místech nespojitostí a změny tvaru (např. v patě svaru, kde svar přechází do základního materiálu). Z tohoto důvodu dochází v praxi běžně k přebrušování svarů, které to umožňují. Dalším způsobem, jakým svary nepříznivě ovlivňují únavové vlastnosti materiálu jsou zbytková napětí vzniklá nerovnoměrným ohřevem a chladnutím, která mohou být příčinou vzniku trhlin. [10]

2.2. Mechanismus únavového porušení

Přibližně 90 % mechanických poškození je důsledkem únavy materiálu, přičemž kromě již uvedených vlivů v úvodu této kapitoly, má na průběh šíření únavové trhliny vliv také počet zatěžovacích cyklů. [11]

Mechanismus únavového porušení lze popsat pomocí čtyř stádií:

- i. Změny vlastností materiálu
- ii. Iniclace únavových trhlin
- iii. Šíření trhlin
- iv. Porušení materiálu

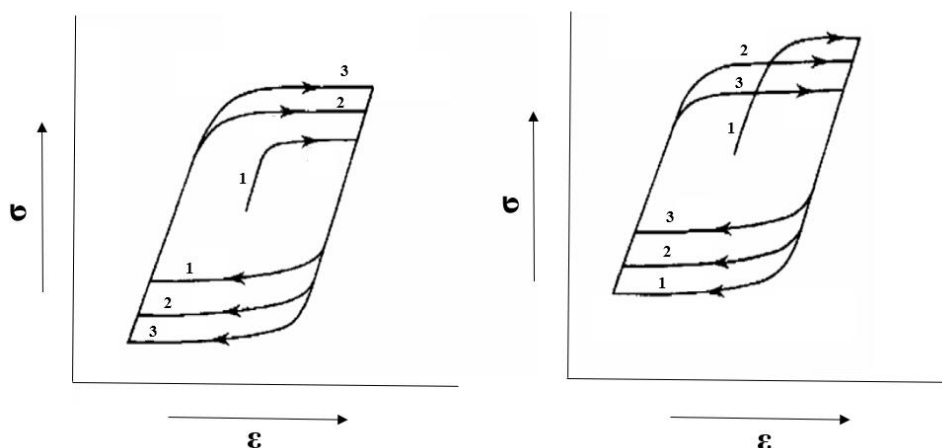
2.2.1. První stadium – Změny vlastností materiálu

Vlivem namáhání začne nejdříve docházet ke změnám mikrostruktury v celém objemu. Tyto změny ovlivňují jak mechanické a fyzikální, tak i elektrické a magnetické vlastnosti materiálu.

Nejvýraznější změny budou na začátku cyklického zatěžování a postupně se materiál bude přibližovat k ustálenému stavu. V prvním únavovém stádiu bude také v závislosti na materiálu docházet ke zpevnění nebo změkčení. Příčinou cyklického zpevnění je vznik stabilních dislokačních struktur, u nichž je zároveň vysoká hustota dislokací. Vznikají působením deformace a následnou interakcí s mřížkovými poruchami nebo mezi sebou. Příčinou cyklického změkčení je naopak uvolňování zablokovaných dislokací. Pro plastickou deformaci není jediným důležitým parametrem pouze počet dislokací, nýbrž i jejich

pohyblivost. Cyklické zpevnění je typické pro materiály s malou hustotou dislokací (řádově 10^6 mm^{-2}), zatímco cyklickému změkčení podléhají materiály precipitačně, deformačně, nebo strukturně zpevněné. Tyto materiály mají vysokou hustotu dislokací (řádově 10^9 až 10^{10} mm^{-2}) a jak již bylo uvedeno, zablokované dislokace se v průběhu cyklického zatěžování uvolňují.

Na *Obr. 3* je zobrazena hysterezní křivka závislosti napětí σ na deformaci ε pro oba druhy materiálů, která popisuje závislost deformace na napětí při cyklickém namáhání. [12; 13]



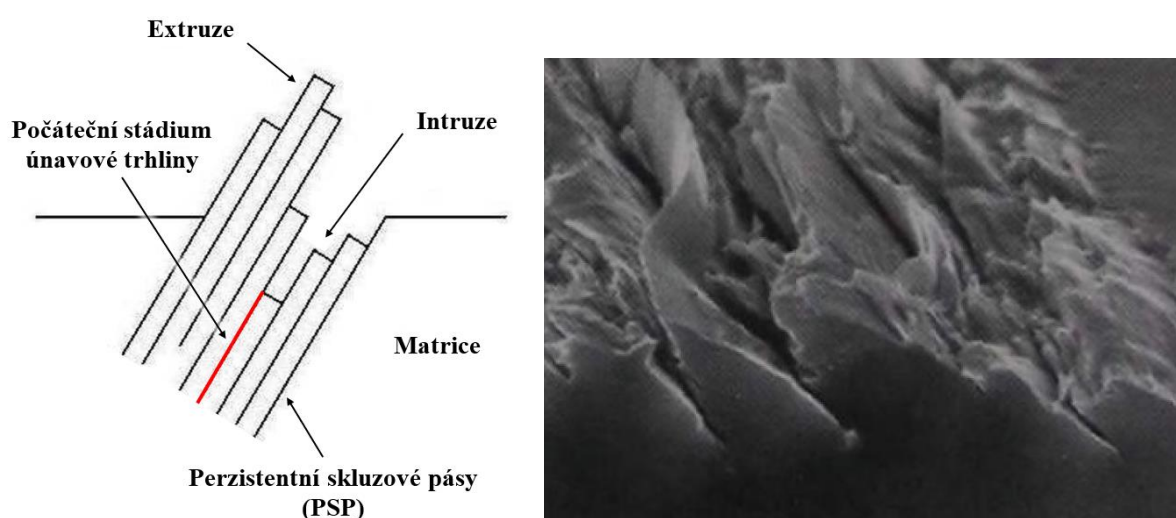
Obr. 3 - Hysterezní křivka závislosti napětí σ na deformaci ε pro materiály, které podléhají cyklickému zpevnění (vlevo) a cyklickému změkčení (vpravo) [12]

2.2.2. Druhé stadium – Iniciale únavových trhlin

U homogenních materiálů vzniká únavový lom zpravidla na povrchu součásti, kde je největší napětí. Místem iniciace trhliny jsou koncentrátoři napětí (vruby, mikronečistoty, velké změny průřezů, svary a další) a k tomuto jevu dochází pouze v malém objemu součásti. U heterogenních materiálů může únavová trhlina vzniknout i na částicích fáze s jinými elastickými vlastnostmi jako například na precipitátech, nebo inkluzích. K nukleaci trhliny mimo povrch může dojít pouze v případě kontaktní únavy a u materiálu s vnitřními geometrickými defekty nebo výraznými nehomogenitami. Obecně lze říci, že ke vzniku trhlin může dojít na třech typech nukleačních míst, kterými jsou:

- i. Perzistentní skluzové pásy (dále *PSP*) – bývají nejčastějším místem iniciace
- ii. Hranice zrn
- iii. Hranice mezi inkluzí a maticí

Vznik *PSP* začíná na konci stádia změn vlastností materiálu a jsou to oblasti, jejichž dislokační struktura je od struktury okolí odlišná. Na povrchu jsou *PSP* zakončeny intruzemi a extruzemi, přičemž jejich četnost i velikost rostou s počtem cyklů v důsledku intenzivního vzniku nových dislokací. Tyto dislokace se v povrchových vrstvách materiálu seskupují v rovinách s největším smykovým napětím, jehož působením dochází k vzájemnému prokluzu sousedících rovin. Tímto mechanismem vzniká na povrchu mikrorelief zobrazený na *Obr. 4*. [12; 13]



Obr. 4 - Mikrorelief zachycující prokluz sousedících rovin ve směru největšího smykového napětí [12]

Na povrchu monokrystalu vzniklé vyvýšeniny (extruze) a prohlubeniny (intruze) vytvoří v průběhu času při cyklickém namáhání makropásy. Inicie prvních mikrotrhlin je výsledkem propojení množiny intruzí podél *PSP* a navzdory tomu, že jsou mělké (řádově jednotky μm), tak jsou již poměrně dlouhé (řádově desítky μm). [13]

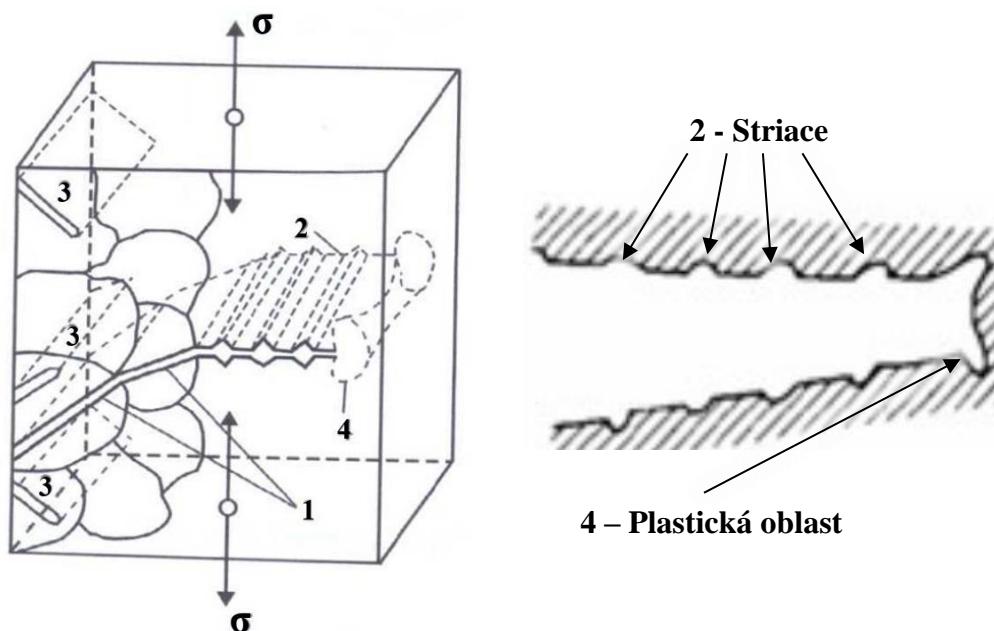
2.2.3. Třetí stádium – Šíření únavových trhlin

Stádium šíření únavových trhlin je možné rozdělit na dvě etapy:

- i. Šíření krátkých trhlin
- ii. Šíření dlouhých trhlin

Vzájemné rozlišení etap je možné pomocí několika kritérií, která jsou navázána buď na mikrostrukturu, poměr plastické zóny a délky trhliny, nebo pouze délku samotnou. V praxi je nejvíce používána nejjednodušší varianta, kde dochází k dělení pouze na základě jejich délky.

Za krátkou trhlinu se považuje trhlina s maximální délkou v rozmezí 0,5 až 1 mm. Krátké trhliny se šíří krystalograficky podél aktivních skluzových rovin (pod úhlem 45° vůči směru hlavního napětí) pouze, pokud mají vhodné podmínky pro svůj rozvoj. K šíření dochází vlivem dalšího cyklického zatěžování mechanismem propojování jednotlivých nukleovaných trhlin. Po dosažení určité délky závislé na materiálových vlastnostech se trhliny postupně začnou odklánět z PSP a šíří se dále ve směru kolmém na směr hlavního napětí viz Obr. 5 a).



Obr. 5 – a) Šíření únavové trhliny materiálem b) Detailní pohled na konec trhliny [12]

1 – Transkrystalické šíření materiálem ve směru PSP

2 – Šíření trhliny ve směru kolmém na hlavní napětí se striacemi

3 – Neefektivní trhliny

4 – Plastická oblast na čele trhliny

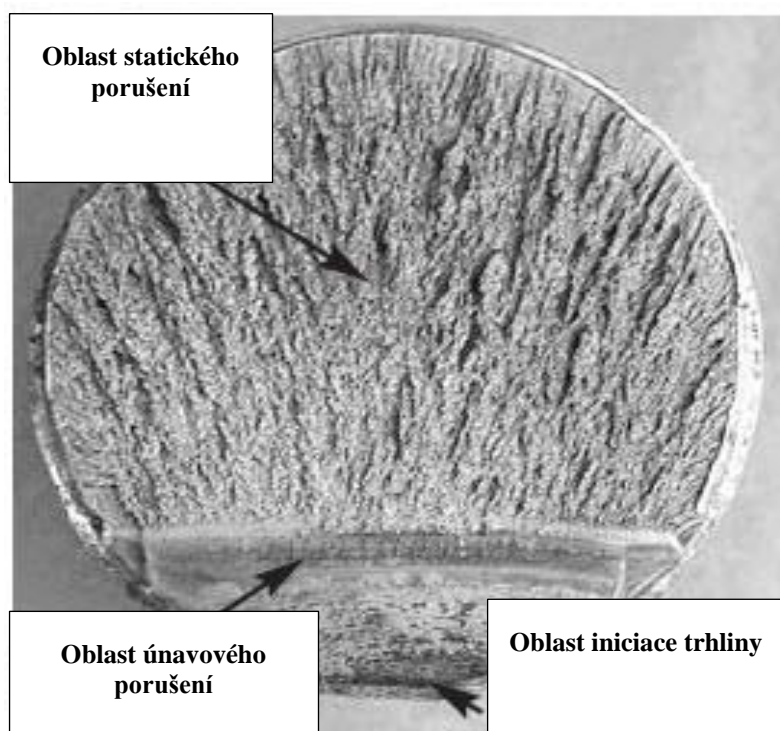
Z dynamiky růstu trhlin vyplývá, že je možné, aby se její růst zastavil. Za čelem trhliny totiž dochází ke koncentraci zbytkového tlakového napětí, které její čelo uzavírá. Jedná se o odpor materiálu vůči jejímu šíření. Pro následné otevření trhliny v oblasti čela je nutné tato zbytková napětí překonat.

Pokud se tak nestane, nebude se trhlina dále šířit a zůstane neefektivní. Jakmile je napětí překonáno, dojde ke znovuotevření trhliny skluzovým mechanismem. Vlivem rychlé oxidace nově exponovaného objemu materiálu na čele trhliny v kombinaci se skluzovým porušením dochází k postupnému prodlužování trhliny. Střídavé otevírání a uzavírání trhlin způsobí tvorbu charakteristických striací zobrazených na *Obr. 5 b*).

2.2.4. Čtvrté stádium – Únavový lom

Postupným zvětšováním délky trhliny dochází ke zmenšování oblasti nosného průřezu. Pokud napětí ve zbývajícím nosném průřezu dosáhne kritických hodnot, dojde k únavovému lomu, neboť již není schopný přenést požadované zatížení. K dolomení pak dochází velmi rychle. Velikost hladké plochy na porušeném průřezu je zcela závislá na konečné velikosti trhliny.

Drsnější povrch je dobrým ukazatelem rychlosti růstu trhliny, která se v průběhu postupného porušování mění v důsledku změn napětí, teplot, nebo dalších faktorů a vytváří tím postupové čáry. U houževnatých materiálů je také často patrná přítomnost čar, tzv. striací (viz *Obr. 5*), které zanechal postup čela únavové trhliny v jednotlivých cyklech. Závěrečné dolomení může mít jak křehký, tak i houževnatý charakter v závislosti na druhu zatěžování a materiálových vlastnostech. Pomocí makrofraktografických metod je možné rozlišit zejména dvě oblasti, kterými jsou oblast únavového porušení a oblast statického porušení. Plochy únavového porušení jsou hladké a lesklé, neboť v průběhu cyklického zatěžování dochází k jejich opětovnému přitlačování, které způsobí vzájemné vyhlazení. Čím větší počet cyklů součást před porušením vydrží, tím hladší tyto plochy jsou. Povrch lomové plochy, kde došlo ke statickému porušení je naopak hrubý a vzhledem se neliší od povrchů vzniklých statickou tahovou zkouškou. Poměr velikostí únavové a statické lomové plochy závisí na podmínkách namáhání, geometrii součásti, materiálu, vrubu, a především velikosti zatížení. Jednotlivé oblasti jsou velmi dobře rozpoznatelné na *Obr. 6*. [12; 13]

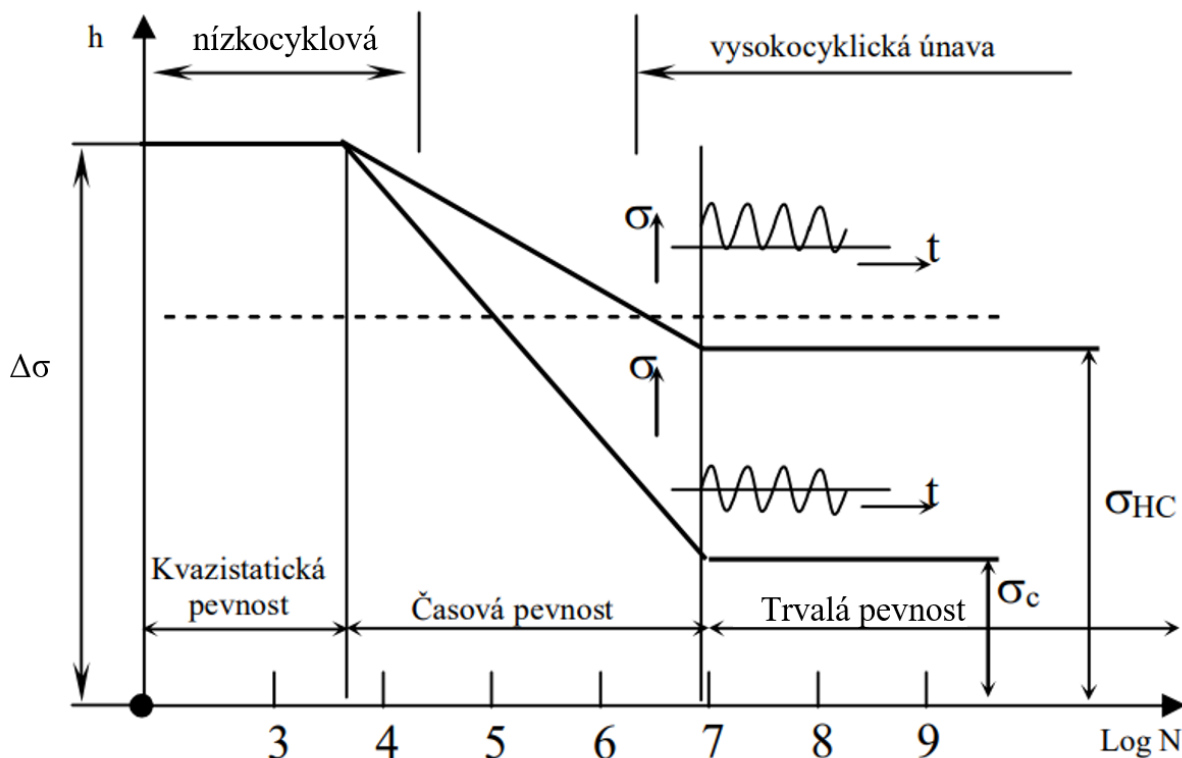


Obr. 6 - Lomová plocha únavově porušení součásti [42]

2.3. Křivky únavové životnosti

Při statickém namáhání materiálu v oblasti Hookeova zákona, tj. pod mezí kluzu, nedojde k jeho poškození. Překročením meze úměrnosti dochází ke kluzu ve vnitřní struktuře krystalů a tím i k neustálému porušování soudržnosti v submikroskopické oblasti.

Tyto změny nejsou zaznamenatelné pomocí statických ani rázových zkoušek. Chování materiálů je ale možné vyjádřit pomocí křivek únavové životnosti, které dávají do souvislosti amplitudu napětí a počet cyklů do porušení. Nejpoužívanější křivkou popisující vysokocyklovou únavovou životnost (10^5 až 10^8 cyklů) je tzv. Wöhlerův diagram (v anglické literatuře *S-N* křivka). Pro oblast nízkocyklové únavy (10^2 až 10^5 cyklů) jsou nejčastěji používané křivky Manson – Coffinova a Wöhler – Basquinova. Křivka rozlišení únavové životnosti v závislosti na počtu cyklů do lomu je zobrazena na *Obr. 7.* [12; 13]



Obr. 7 - Wöhlerova křivka únavové životnosti [14]

Diagram na Obr. 7 je možné rozdělit na tři typické úseky. Jeho první část odpovídá tzv. kvazistatické pevnosti (zpravidla do 10^2 cyklů). V druhé části diagramu dochází při použití logaritmického souřadnicového systému k přímkovému poklesu mezního napětí s rostoucím počtem cyklů. Pevnost vzorku je závislá na počtu cyklů. Tento úsek je nazýván oblastí časové pevnosti a tvoří šikmou větev Wöhlerovy křivky. V třetí části diagramu je dosaženo meze únavy. V normách je pro střídavé cyklické napětí se souměrným cyklem označována symbolem σ_c . Symbolem σ_{HC} je pak označována pro mívivé cyklické napětí. [14]

2.3.1. Wöhlerova křivka

Wöhlerova křivka (nebo také S-N křivka) je grafickou interpretací vztahu mezi amplitudou napětí a životností zkušebního tělesa. Platí, že pro každou amplitudu zatížení σ_a existuje určitý počet cyklů do porušení. Mezi únavy σ_c je nejvyšší amplituda napětí, při níž materiál vydrží nekonečný počet cyklů. Průběh křivky životnosti ovlivňuje mimo jiné i velikost středního napětí σ_m . [15]

Mezi zákonitostí únavového procesu vyjádřené $S-N$ křivkou patří:

- i. s klesající amplitudou napětí roste počet cyklů do porušení,
- ii. mez únavy je mezní amplitudou napětí, pod níž teoreticky nedojde k porušení ani při nekonečném počtu cyklů,
- iii. počet cyklů do porušení není dán pouze největší velikostí napětí σ_h , ale i velikostí amplitudy napětí σ_a . [15]

Wöhlerův diagram je nejpoužívanějším ukazatelem únavové životnosti, ale má svá omezení, která je nutné brát v potaz. Je vhodný pouze pro popis vysokocyklové únavové životnosti, neboť je napětí amplitudy vztažené na počáteční průřez – únavová křivka je platná jen tehdy, pokud dochází pouze k mikroplastickým deformacím.

Křivka životnosti má šikmou a vodorovnou větev, viz *Obr. 7*. Šikmá část je nejčastěji analyticky popisována pomocí jednoduchého mocninného vztahu pro amplitudu, nebo rozkmit napětí. Závislost rozkmitu na počtu cyklů je pro konstrukci únavových křivek lepší volbou, neboť je obsažena v normách pro svarové spoje:

$$\sigma^m \cdot N = C \quad \rightarrow \quad \left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right)^m \cdot N = C$$

V logaritmickém tvaru vypadá vztah následovně:

$$\log N = q - m \cdot \log \Delta\sigma$$

Parametry q a m se určují pomocí lineární regrese z hodnot naměřených při únavových zkouškách. [16]

Aby bylo možné brát mez únavy a Wöhlerovu křivku za materiálové charakteristiky, musejí být zkušební vzorky k jejímu sestrojení dokonale opracované, normalizované a bez vrubů. V důsledku velkého množství prováděných experimentů a dlouhodobého provozu různých cyklicky zatěžovaných konstrukčních celků bylo zjištěno, že materiál může vykazovat dva různé lomy. První nastává ve vysokocyklové oblasti, kde trhlina, jak již bylo popsáno, postupuje z povrchu. Druhým způsobem únavového porušení v oblasti platnosti Wöhlerova diagramu může být únava gigacyklová (při únavovém porušení nad 10^9 cyklů), při níž se trhlina iniciuje na hranicích zrn, nebo nekovových vměstcích.

Problematika gigacyklové únavy je v současnosti velmi aktuálním, ale zároveň dosud detailně neprozkoumaným tématem, neboť není experimentálně možné jednoduše ověřovat nové teorie z důvodu obrovské časové i finanční náročnosti.

Může také nastat případ, kdy není možné stanovit mez únavy σ_c , protože v diagramu nedojde ke vzniku oblasti trvalé únavové pevnosti (vodorovná část Wöhlerovy křivky).

Tato vlastnost náleží především tvárným materiálům s kubickou plošně středěnou krystalovou mřížkou. Jejich mez únavy je určována smluvně, jako například amplitudou napětí pro 10^7 cyklů, po jejichž dosažení dojde k únavovému lomu. [11; 12; 17]

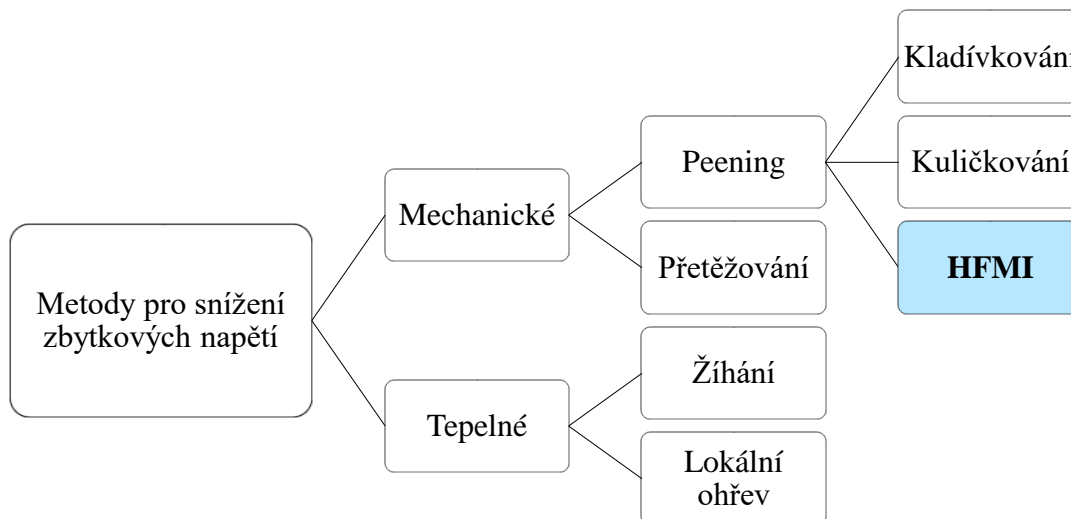
3. Přehled metod pro úpravu svarových spojů po svařování

Únavová životnost součásti je ze všeho nejvíce ovlivněna konstrukčním návrhem. Existují však způsoby pro její zlepšení, jako například využití nízkonapěťových svarových spojů, jakými jsou tupé svary, které svou geometrií zejména po přebroušení nemusí způsobovat významnou koncentraci napětí, nebo umístění svarů do oblastí, které jsou méně namáhány. Nezanedbatelný vliv má také kvalita jejich provedení, volba vhodného materiálu a příprava před svařováním. I dobře provedené svary v místech s nízkým napětím však představují vrub. Únavovou životnost je možné zvýšit i technologickými procesy po zhotovení svarového spoje.

Metody úprav svarového spoje po svařování je možné dělit do dvou hlavních skupin podle toho, jakým způsobem je dosaženo zlepšení jeho vlastností. Prvním způsobem jsou modifikace geometrie kritického místa svaru, které vedou k odstranění koncentrátorů napětí při současném zlepšení jakosti povrchu. Tyto úpravy jsou svou povahou mechanické. Druhým způsobem úpravy svaru po procesu svařování je odstranění zbytkových napětí, vyvolaných například fázovými změnami v průběhu chladnutí pomocí ohřevu. Modifikace tohoto typu se řadí mezi tepelné úpravy.

Technologické způsoby dodatečného zpracování svarových spojů jsou známé již od sedmdesátých let minulého století a patří mezi ně například kladívkování, válečkování, nebo temování svarů. Částečně lze mezi ně dále počítat i broušení po svařování, které slouží primárně k odstranění povrchových vad a koncentrátorů napětí vytvořením plynulého přechodu mezi svarem a základním materiálem.

Kladívkováním, nebo kuličkováním oproti tomu dosáhneme snížení zbytkových tahových napětí v materiálu způsobených jeho tepelnou roztažností za současného vnesení, pro materiál příznivých, tlakových napětí do kritické oblasti svaru. [1; 2; 18]



Obr. 8 - Rozdělení různých způsobů zlepšení životnosti svarového spoje [1]

Přehled různých způsobů dodatečného zpracování svarového spoje a jejich rozdělení podle principu úpravy je zobrazeno na Obr. 8.

Metoda *HFMI* patří do kategorie mechanických úprav a je druhem peeningu (proces opracování povrchu kovu pomocí indentorů různých druhů za účelem zlepšení materiálových vlastností). Aplikací *HFMI* dojde ke korekci geometrie svaru v místě přechodu mezi přídavným a základním materiálem. Dojde také ke zlepšení jakosti povrchu při současném vnesení tlakových napětí. [1]

3.1. High-Frequency Mechanical Impact (*HFMI*)

High-Frequency Mechanical Impact je souhrnné označení pro větší počet technologií, které v anglické literatuře mají různá označení (v závislosti na výrobcu) jako např. ultrasonic impact treatment (*UIT*), ultrasonic peening (*UP*), ultrasonic peening treatment (*UPT*), high-frequency impact treatment (*HiFIT*), pneumatic impact treatment (*PIT*), nebo ultrasonic needle peening (*UNP*), ale které fungují na stejném principu a mají stejný cíl. Indentor válcového tvaru kmitá při vysoké frekvenci (přibližně 90 Hz) proti materiálu. Jednotlivé technologie se liší především zdrojem energie, kterým mohou být piezoelektrické, popřípadě magnetostrikční elementy (materiál při zmagnetizování mění své rozměry), nebo stlačený vzduch. Příznivý efekt je pak způsoben energií jednotlivých úderů, jejichž síla se pohybuje v řádu kN/úder, v důsledku čehož je materiál ve výsledku plasticky deformován.

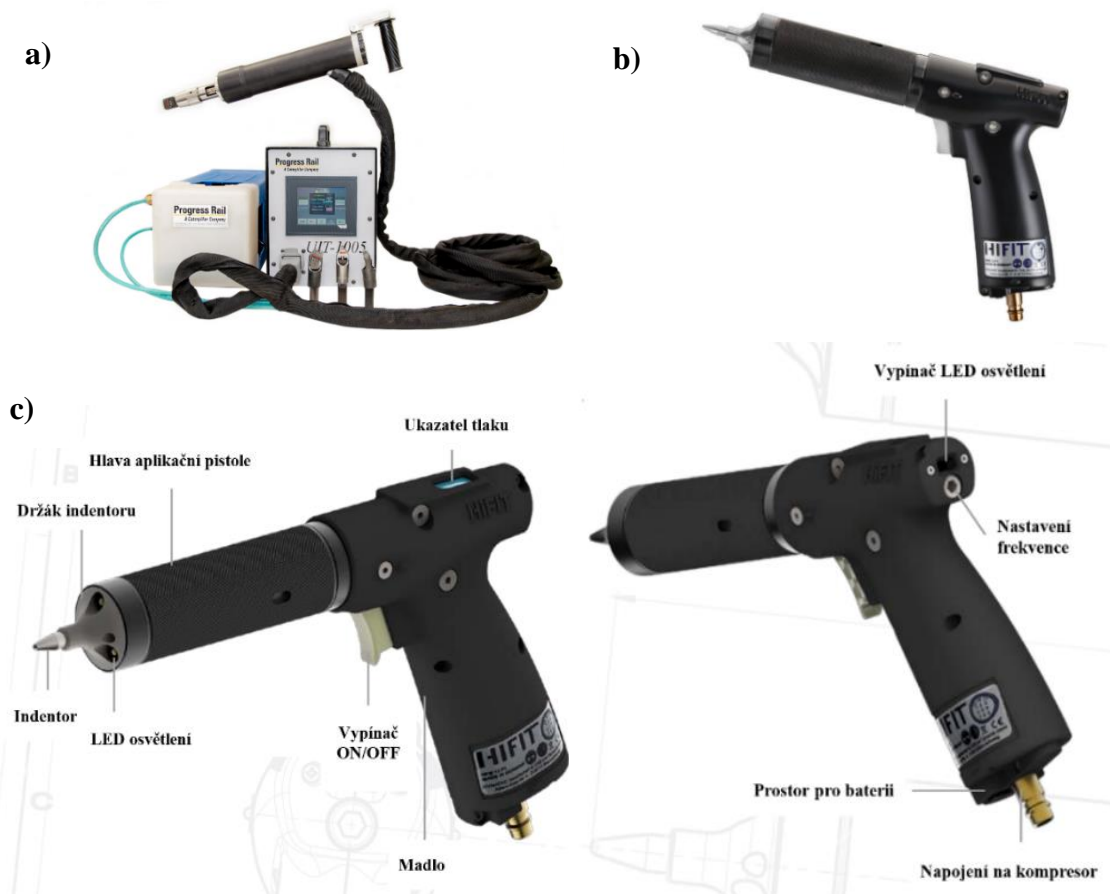
Tyto deformace vedou ke změnám mikrostruktury a geometrie, stejně tak jako ke změnám rozložení napětí v materiálu. Ve srovnání s kladívkováním, popřípadě jinými staršími technologiemi, je *HFMI* uživatelsky přívětivější a výsledný povrch je díky těsnějšímu uspořádání vtisků indentoru lépe opracován. [1; 19]

Zároveň byla provedena rešerše zaměřená na aplikaci technologie *HFMI* ve vazbě na stavbu kolejových vozidel a bylo zjištěno, že jedinou společností, která používá/používala tuto technologii je kanadská společnost Bombardier. Místem aplikace je/byl podvozek kolejového vozidla. S ohledem na utajení, které doprovází konstrukční činnosti jednotlivých společností, nebylo možné dohledat detaily ani další informace o této technologii. Aplikace *HFMI* může potenciálně vést k umožnění použití vysokopevnostních ocelí a s tím spojených úspor hmotnosti, což v průmyslovém prostředí představuje konkurenční výhodu. [20]

3.1.1. Přístroje pro aplikaci *HFMI*

V řádu posledních 10 let bylo vyvinuto několik druhů zařízení a nové postupem času stále přibývají, neboť tato technologie stále ještě prochází vývojem. Na *Obr. 9* jsou zobrazeny některé tyto typy, které jsou v současnosti aktivně používány. Experimentálním výzkumem bylo prokázáno, že aplikační pistole různých výrobců mají na materiál stejný vliv ve smyslu prodloužení únavové životnosti.

Jak již bylo uvedeno v popisu metody *HFMI*, největším rozdílem mezi jednotlivými výrobci je princip, na kterém fungují samotné pistole. Pneumatická pistole je tedy poháněna jiným zdrojem, než pistole fungující na principu piezoelektrických elementů a bude se tak lišit svojí konstrukcí.



Obr. 9 - Různé druhy aplikačních pistolí a) Magnetostrickní aplikační pistole od výrobce Progress Rail [39] b) Aplikační pistole od výrobce HiFIT Scandinavia [21] c) Popis jednotlivých částí pistole z Obr. 9 b) [40]

Vyměnitelné hroty indentorů, připevněné na kmitajících koncích aplikačních pistolí, jsou vyrobené z vysokopevnostních ocelí a mají válcový tvar. Efektivita hrotů je dána kombinací mnoha faktorů, jako například vnějším průměrem hrotu, jeho geometrií, nebo využitím uspořádání s více indenty. Na Obr. 10 jsou znázorněny různé typy používaných hrotů aplikačních pistolí.



Obr. 10 - Různé typy a konfigurace indentorů [41]

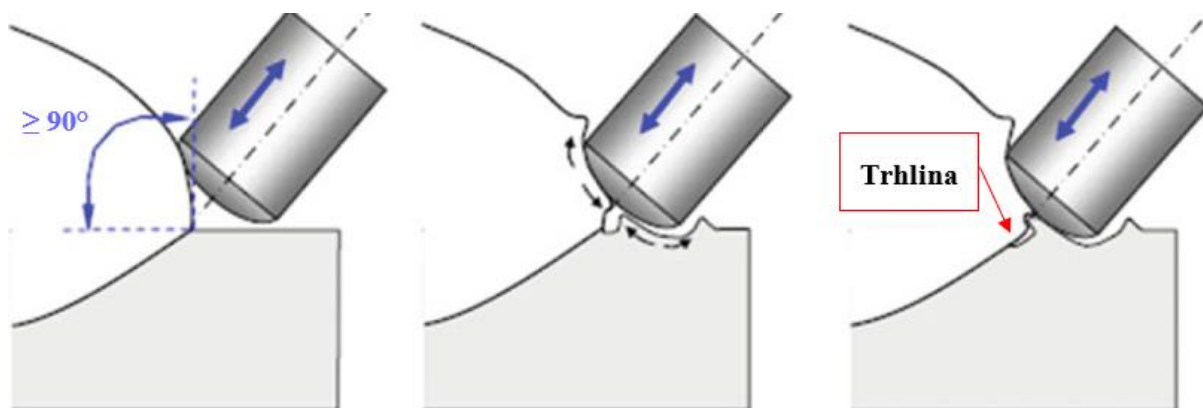
Nástavce jsou při použití metody *HFMI* stejně tak jako břitové destičky při obrábění opotřebovávány a je tak nutné je po čase vyměnit, nebo renovovat. Jeden hrot s jedním indentorem od výrobce *HiFIT* slouží k opracování přibližně deseti metrů svaru a pak by měl být nahrazen. [1; 21]

3.1.2. Faktory ovlivňující kvalitu provedeného opracování

Je velmi důležité si uvědomit, že ačkoliv je princip této technologie jednoduchý, kvalita provedení bude velmi záviset na tom, kdo ji bude aplikovat. Bývá pravidlem, že při dodání *HFMI* zařízení uspořádá jeho výrobce až dvoudenní výcvikový kurz. V konstrukcích se často setkáváme se svary, které nejsou v jedné rovině, nebo vedou podél zakřivené plochy. Zejména v těchto případech je kladen velký důraz na zručnost operátora, neboť opracování takových svarů vyžaduje mnohem více praxe a zkušeností.

Podstatné je také znát všechny z únavového hlediska kritické oblasti. Únavově zatěžované konstrukční celky mají zpravidla jenom omezené množství kritických míst. Správná identifikace těchto oblastí je proto důležitá zejména z ekonomických důvodů, neboť technologie nebude použita v místech, kde to z únavového hlediska nedává smysl. Zároveň ale musí být bráno v potaz, že opracování jedné oblasti, může vyvolat selhání v oblasti jiné.

Posledním významným faktorem, ovlivňujícím výsledné zlepšení únavové životnosti, je příprava svarového spoje před aplikací technologie *HFMI*. Je důležité povrch svaru očistit, nebo případně obrousit od oxidů a jiných nečistot. Zároveň je důležitá geometrie svaru samotného, neboť pokud je úhel mezi povrchem základního materiálu a lícem svaru v oblasti jeho paty moc velký, může opracováním dojít k tvorbě trhliny v důsledku použití indentoru s moc velkým průměrem. Také bylo vyzorováno, že ke stejnému problému může dojít v případě, když je konkrétní místo lokálně opracované více, než je předepsáno. Toto riziko je graficky znázorněno na *Obr. 11*.



Obr. 11 - Riziko vzniku trhliny způsobené geometrií svaru, nebo špatně zvoleným indentorem [1]

Je nutné zmínit, že technologie *HFMI* je neúčinnější, pokud je aplikována přesně na místo paty svaru. Broušení po svařování zabraňuje dobrému rozeznání paty svaru a není z tohoto důvodu doporučováno.

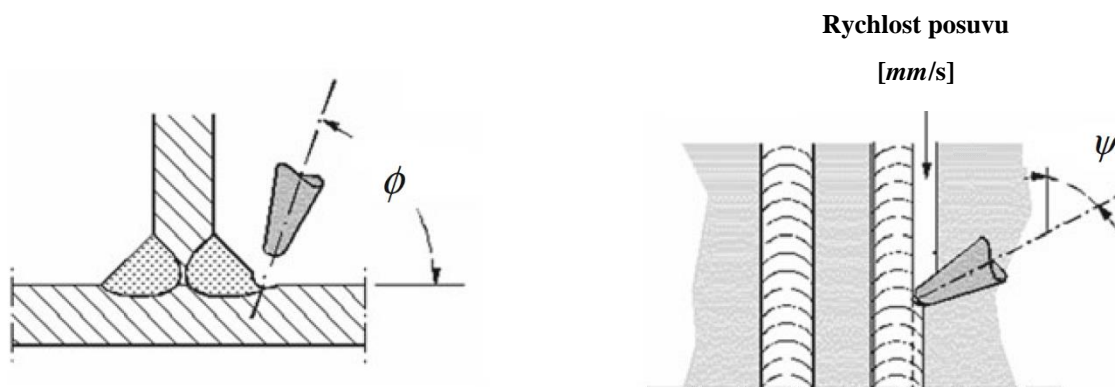
Uvedeným nedostatkům ovlivňujícím kvalitu aplikace technologie není vždy možné zcela předejít, avšak jejich vliv může být v závislosti na konkrétním místě použití zanedbatelný. [1]

3.1.3. Úprava paty svaru

Specifické procesy úpravy paty svaru se vzájemně liší v závislosti na aplikaci a použitém nástroji. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, mělo by být zamezeno přílišnému opracování, aby nedošlo k vytvoření trhliny nevhodnou úpravou geometrie svaru. Technologie *HFMI* však není náchylná na takové poškození v tom smyslu, že je velmi těžké při následování předepsaných pokynů „netrefit“ tzv. oblast zlepšení únavové životnosti. Vzorové parametry pro aplikaci *HFMI* v závislosti na použitém nástroji jsou znázorněny v *Tab. 1*.

Parametry	Druhy zařízení na aplikaci <i>HFMI</i>	
	<i>HiFIT</i>	<i>UIT</i>
Zdroj	Pneumatický	Ultrazvukový magnetostrikční
Počet indentorů na hrotu	1	1–4
Úhel mezi povrchem základního materiálu a osou indentoru, ϕ (viz <i>Obr. 12</i>)	60° - 80°	30° - 80°
Úhel mezi směrem opracování a osou indentoru, ψ (viz <i>Obr. 12</i>)	70° - 90°	90° (Všechny hroty by se měly dotýkat paty svaru)
Rychlost posuvu	3–5 mm/s	5–25 mm/s

Tab. 1 - Parametry procesu aplikace HFMI v závislosti na použitém nástroji [1]



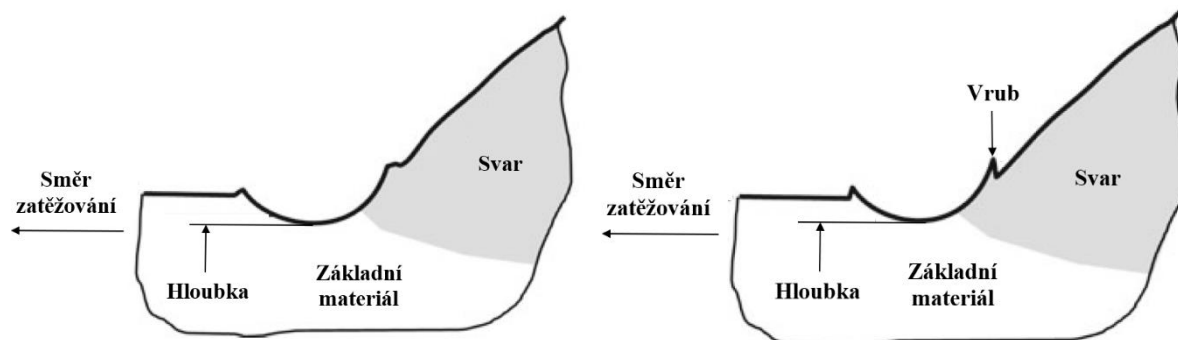
Obr. 12 - Pozice indentoru vůči svaru v průběhu opracování [1]

Po aplikaci *HFMI* by nemělo následovat další tepelné zpracování ani žárové pozinkování, neboť by ohřev na vysoké teploty způsobil uvolnění příznivých tlakových napětí způsobených plastickou deformací materiálu. Mezi další důležité doporučení patří, že se má technologie *HFMI* aplikovat u některých konstrukčních sestav, až když jsou kompletně složené, neboť by mohlo dojít k případu, kdy statické zatížení vyvolané jedním prvkem může vyvolat tahová napětí v oblasti aplikace *HFMI* a tím částečně vyrušit její vliv. Lepší únavové životnosti je dosaženo, pokud jsou prvky, které konstrukci staticky zatíží v tahu, upevněny již před aplikací technologie *HFMI*. [1]

3.1.4. Hodnocení parametrů výsledného opracování

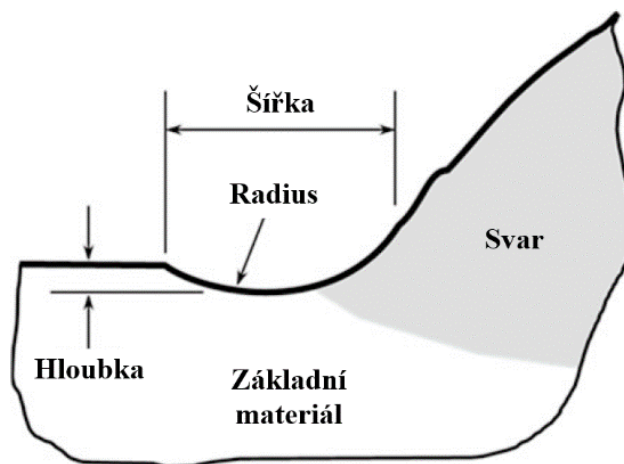
Vizuální kontrola po aplikaci *HFMI* sestává z kvalitativního i kvantitativního hodnocení parametrů vytvořené stopy, mezi které patří její hloubka, šířka a tvar. Stopa, vytvořená jednotlivými údery indentoru, má být plynulá podél celého svaru. Správně opracovanou patu svaru poznáme podle toho, že je stopa hladká a lesklá. Pro zjišťování povrchových vad je vhodné provést kapilární zkoušku na opracované ploše, kde by neměla být nalezena žádná porézní místa. [22]

Pokud není možné, aby bylo opracování svaru provedeno bez přerušení (například u dlouhých svarů, nebo v rozích), je doporučeno, aby mezi jednotlivými stopami byla mezera o velikosti alespoň 10 mm. Vlivem velké plastické deformace způsobené opracováním může dojít k vytvoření trhliny. Trhlina by měla být broušením odstraněna, aby nedošlo ke snížení únavové životnosti. Oblast je posléze nutné znovu ošetřit. Na *Obr. 13* je možné vidět porovnání správně a špatně opracované oblasti.



Obr. 13 - Porovnání správně (vlevo) a špatně (vpravo) opracované oblasti [1]

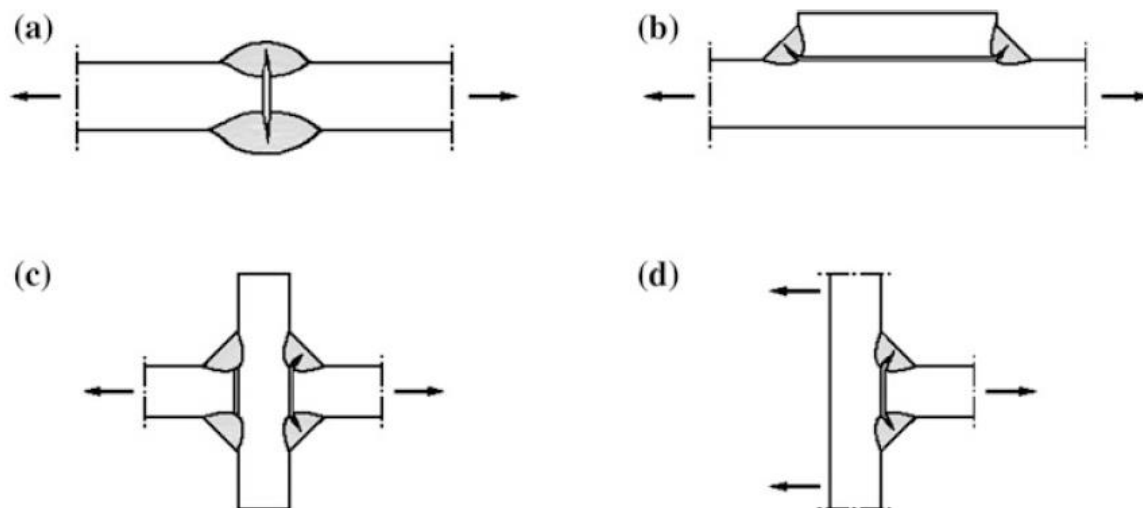
Nejlepším ukazatelem míry opracování paty svaru je hloubka stopy, která, aby bylo možné garantovat, že dojde ke zvýšení únavové životnosti, musí být minimálně 0,1 až 0,2 mm. V optimálním případě a při dodržení předepsaných postupů má být stopa hluboká v rozmezí 0,2 až 0,6 mm a široká 3 až 6 mm, viz Obr. 14. Je však nutné poznamenat, že stopa žádných rozměrů není vhodná pro všechny aplikace a že použitím technologie HFMI na vysokopevnostních ocelích dosáhneme přirozeně mělčí stopy, než při jejím použití na běžných konstrukčních ocelích. U složitých konstrukčních celků nebude teplo, vnesené procesem svařování, ve všech místech rovnoměrné a z tohoto důvodu se i naměřené tvrdosti podél stopy mohou lišit. Kontroly geometrie stopy vytvořené technologií HFMI je nezbytné provádět v pravidelných intervalech, aby byla zaručena požadovaná kvalita opracování. [1]



Obr. 14 - Významné parametry stopy vytvořené aplikací HFMI na patu svaru [1]

3.1.5. Zlepšení únavové životnosti metodou HFMI

Aby bylo možné metodu HFMI účinně aplikovat, je nezbytné vědět, u jakých typů svarů dojde technologií ke zlepšení únavových vlastností. Je proto potřeba zmínit zejména nutnost průvaru u svařového spoje. Svary bez průvaru mají totiž, kromě paty svaru, kritické místo zároveň v oblasti kořene svaru. Odtud by se únavová trhлина začala šířit v případě, kdy by došlo k opracování paty svaru a aplikace HFMI by ve výsledku nepřinesla potřebné zlepšení únavové životnosti. Svary, které nejsou pro HFMI vhodné jsou zobrazeny na Obr. 15, kde je zároveň vidět místo vzniku trhliny v závislosti na způsobu namáhání. [1]

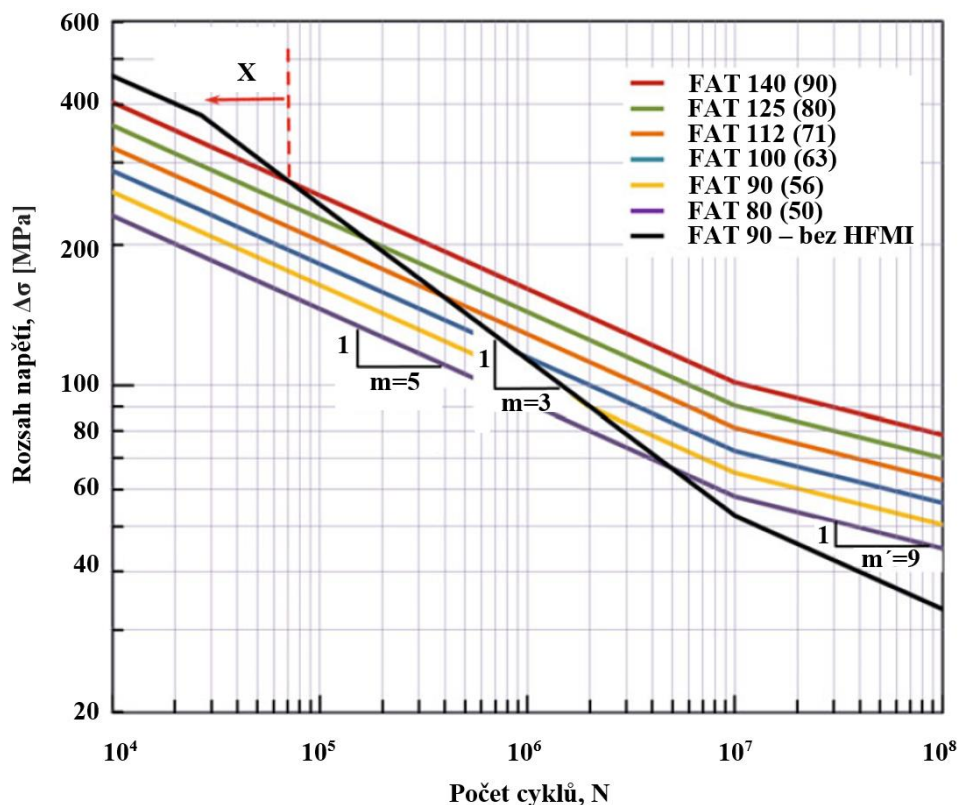


Obr. 15 - Svary, u nichž aplikací HFMI nedojde ke zvýšení životnosti

(Černé šipky symbolizují směry namáhání) [1]

Úroveň zlepšení únavové životnosti konstrukcí je nejčastěji popisována pomocí metody nominálních napětí, která bere v potaz vlivy koncentrace napětí způsobené geometrií svarového spoje, jeho nedokonalosti a *ZN*. Výsledné zlepšení životnosti se projeví zvýšením třídy *FAT*, která je definována přípustným rozkmitem napětí s 95 % spolehlivostí při dvou milionech cyklů. Třídy *FAT* jsou závislé na druhu svaru, který ovlivňuje velikost napětí, nikoliv na materiálu, neboť vychází ze dvou předpokladů. Prvním je, že svar již vlivem technologie obsahuje mikrotrhlinu a druhým je, že se trhlina v různých konstrukčních ocelích šíří přibližně stejnou rychlostí. Přínos aplikace *HFMI* byl zkoumán pouze v rozmezí tříd *FAT* 50 až *FAT* 90. Třídy nižší, než *FAT* 50, jsou náchylné na lomy mimo oblast paty svaru, a nejsou proto pro technologii *HFMI* vhodné. Mezi třídy, vyšší než *FAT* 90, patří naopak nesvařované součásti, u nichž nehrozí riziko porušení v oblasti paty svaru a svařované celky s již zlepšenou únavovou životností (např. přebroušené svary). [1; 23; 24]

Pomocí prováděných experimentů bylo zjištěno, že opracováním paty svaru u ocelí s mezí kluzu pod 355 MPa dojde ke zvýšení třídy FAT násobkem 1,6. Když tedy svařovaný celek klasifikovaný jako FAT 90 podstoupí proces zlepšení únavové životnosti pomocí HFMI, je možné deklarovat u něj třídu FAT 140. [1]



Obr. 16 - Charakteristické S-N křivky pro svarové spoje se zlepšenou únavovou životností pomocí metody HFMI pro oceli s mezí kluzu do 355 MPa [1]

Na Obr. 16 jsou znázorněny S-N křivky vzorků s vylepšenou únavovou životností pro oceli s mezí kluzu pod 355 MPa, přičemž původní třída FAT před aplikací HFMI je vždy v závorce. Koeficient m popisuje stoupání únavových křivek (s klesajícím koeficientem m roste strmost únavové křivky). K protnutí dvou únavových křivek stejného typu svarového spoje (původní třída FAT 90) s aplikací HFMI a bez ní, dochází v bodě X při přibližně 72 000 cyklech, což odpovídá počtu cyklů životnosti, pod nějž nepřinese tato technologie užitek.

Z grafu na *Obr. 16* je tak patrné, že je technologie *HFMI* není vhodnou metodou ke zlepšení odolnosti materiálu v oblasti nízkocyklové únavy. [1]

Mezi další faktory, které je nutné zahrnout do výpočtů předpokládané životnosti, patří vliv velikosti součásti a tloušťky použitých plechů. Technologie *HFMI* je doporučována pro tloušťky plechů od 5 mm do 50 mm. Tloušťka použitého polotovaru a velikost svaru totiž ovlivňují lokální koncentraci napětí v místě paty svaru a gradient napětí uvnitř plechu. Obecně platí, že s rostoucí tloušťkou klesá únavová životnost, protože se u tlustších plechů napěťové pole rozpíná ve větším objemu.

Neméně důležité je zmínit, že samotná problematika únavy materiálu je velmi komplexní disciplínou, a proto kromě již uvedených faktorů bude mít na přínos *HFMI* vliv dále také způsob zatěžování a mez kluzu materiálu.

Již provedenými experimenty bylo prokázáno, že s každým nárůstem meze kluzu materiálu o 200 MPa bude únavová životnost zvýšena o jednu třídu *FAT*. Přínos technologie *HFMI* tak bude růst společně s pevností materiálu. Do roku 2020 přispíval výzkumný tým* univerzity v rakouském Leoben, ve spolupráci s předními odborníky na tuto technologii, velmi pravidelně publikacemi na téma *HFMI* a došel pomocí prováděných experimentů na svařených vzorcích různých druhů vysokopevnostních ocelí k závěru, že při aplikaci *HFMI* u oceli S355 téměř nedojde ke zlepšení únavové životnosti, zatímco u ocelí S690 muselo být napětí u vzorku po aplikaci *HFMI* zvýšeno o přibližně 25 %, aby došlo k porušení vzorku při stejném počtu cyklů jako u vzorku bez úpravy. U oceli S960QL muselo být napětí při porovnání s neopracovanými vzorky zvýšeno dokonce až o 60 %. [1; 25]

4. Aplikace vysokopevnostních ocelí pro kolejová vozidla

Kolejová vozidla, stejně tak jako jiná odvětví průmyslu, prochází z bezpečnostních, ekonomických a technologických důvodů neustálým vývojem. Stoupají nároky jak na konstrukce samotné, tak i na použité konstrukční materiály. Kolejová vozidla jsou zatěžována staticky, cyklicky i dynamicky, a to i za snížených teplot. Hlavním cílem použití vysokopevných materiálů je snížení hmotnosti při zachování požadované pevnosti.

Jedním z největších problémů je při použití těchto materiálů únavová životnost svarových spojů a vysoká vrubová houževnatost i při nízkých okolních teplotách (až do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Vhodnou aplikací vysokopevných ocelí je skříň kolejového vozidla zobrazená na *Obr. 17*. [18]



Obr. 17 - Skříň vozidla Bombardier Regio 2N (vlevo) a BART (vpravo) [44; 45]

Mezi hlavní důvody snižování hmotnosti kolejových vozidel patří především technické, ekonomické a ekologické požadavky. Zpravidla jsou od použitých materiálů požadovány protichůdné vlastnosti, jako například vyšší pevnost i tažnost při současně dobré svařitelnosti. Hmotnost vozidel částečně charakterizuje jejich technickou úroveň, protože velmi úzce souvisí s jízdním odporem a s tím spojenou spotřebou energie. Přímou ovlivňuje odpor proti valení, stoupání i proti zrychlení. Lehkou konstrukcí se dosáhne snížení spotřeby materiálu a tím i snížením nákladů na jeho zpracování a přepravu. Snížením hmotnosti se dále redukuje opotřebení dvojkolí, kolejí a dalších částí kolejového vozidla. Je nutné, aby skříň kolejových vozidel byly po celou dobu životnosti (alespoň 30 let) schopné odolávat zatížením daným běžnými provozními podmínkami. Zároveň musí splňovat bezpečnostní nároky na ně kladené v případě srážky.

Možné řešení přináší aplikace High Strength Low Alloy (*HSLA*) ocelí, které mají vyhovující vlastnosti. Jsou to mikrolegované oceli, jejichž struktura je precipitačně zpevněna. Velkou výhodou *HSLA* ocelí je schopnost absorpce velkého množství rázové energie při plastické deformaci (požadavek z hlediska bezpečnosti). [18; 26]

4.1. *HSLA* oceli

Vysocepevné mikrolegované oceli vynikají především lepšími mechanickými vlastnostmi a odolností proti atmosférické v porovnání s konvenčními uhlíkovými oceli. Nejedná se o slitinové oceli, ačkoliv je jejich vlastností dosaženo pomocí legujících prvků.

HSLA oceli jsou klasifikovány jako oddělená kategorie ocelí, která je podobná ocelím válcovaným se zlepšenými mechanickými vlastnostmi. Vyrábí se speciálními technologickými postupy, jakými jsou například řízené válcování, nebo urychlené ochlazování. Tyto oceli se prodávají se zaručenými minimálními mechanickými vlastnostmi a definovaným obsahem přísadových prvků. Celkově je možné tyto oceli podle jejich vlastností rozdělit do šesti kategorií. [26]

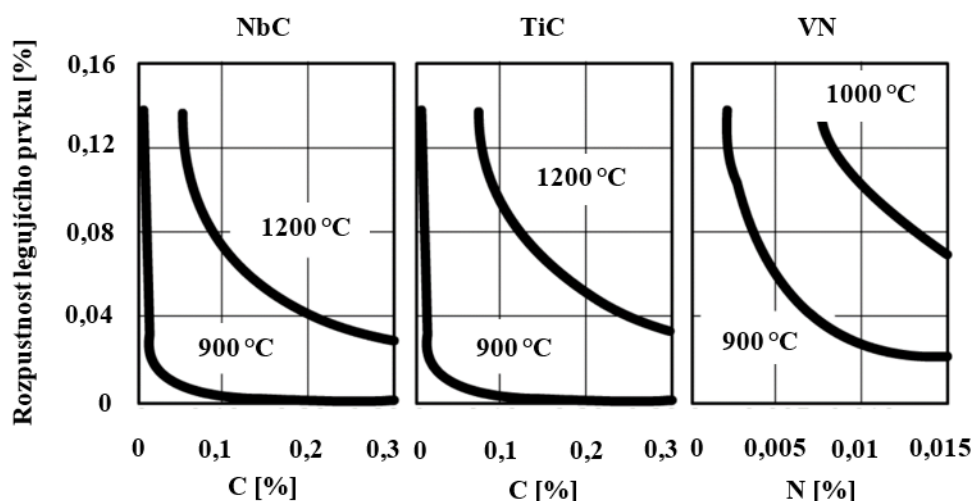
- i. Oceli s odolností proti atmosférické korozi – se zlepšenou korozní odolností
- ii. Mikrolegované feriticko-perlitické oceli – precipitačně zpevněné se zjemněným zrnem
- iii. Válcované perlitické oceli – oceli se zlepšenou pevností, houževnatostí a svařitelností
- iv. Oceli s jehlicovým feritem – s mezí pevnosti až 690 *MPa* a dobrou svařitelností
- v. Dvoufázové oceli – s disperzně rozptýleným martenzitem ve feritické matici
- vi. Oceli s kontrolovaným tvarem vměstků – sulfidické vměstky ve tvaru sférických globulí

Volba konkrétního druhu *HSLA* oceli je zcela závislá na požadavcích pro její použití. Obsažené mikropřísady v těchto materiálech mají vliv na schopnost přechodových prvků tvořit různé karbidy, nitridy a oxidy včetně jejich potenciálu na precipitační zpevnění. Využití nalézají v automobilovém, zemědělském i kolejovém průmyslu. Mikrolegované oceli mohou být buď válcované, nebo kované. [26; 27]

4.1.1. Výroba kovaných *HSLA* ocelí

Při vývoji *HSLA* ocelí je upřednostňováno snížení výrobních nákladů. Po kování proto převládá snaha o užívání řízeného ochlazování po kování. Tímto způsobem jsou materiálové vlastnosti zajištěny bez nutnosti dalšího kalení a žihání, které vyžadují konvenční oceli. Aby došlo k plnému využití zpevňovacího potenciálu mikrolegur, musí být materiál ohřátý po určité době na teplotu umožňující úplné rozpuštění mikrolegujících přísad (nad 1100 °C). Redukcí konečné kovací teploty lze docílit podstatného zvýšení tažnosti a houževnatosti, protože vzroste podíl feritu. Z důvodu minimalizace opotřebení zápustek se však nízké kovací teploty nepoužívají. Specifických vlastností *HSLA* ocelí je dosahováno především ochlazovacím procesem po kování. Zvýšením rychlosti chlazení se dosáhne zvýšení meze kluzu a pevnosti, neboť budou zrna jemná a precipitačně vytvrzená.

Pokud však bude optimum rychlosti ochlazování překročeno, dojde k redukci pevnosti vlivem potlačení precipitace a růstu nízkoteplotních transformačních produktů. Optimální rychlost ochlazování a maximální tvrdost jsou velmi závislé na chemickém složení oceli. Díky zajištěnému obsahu jednotlivých prvků je možné dosáhnout specifických vlastností v širokém rozsahu rozměrů a ochlazovacích podmínek. [26]



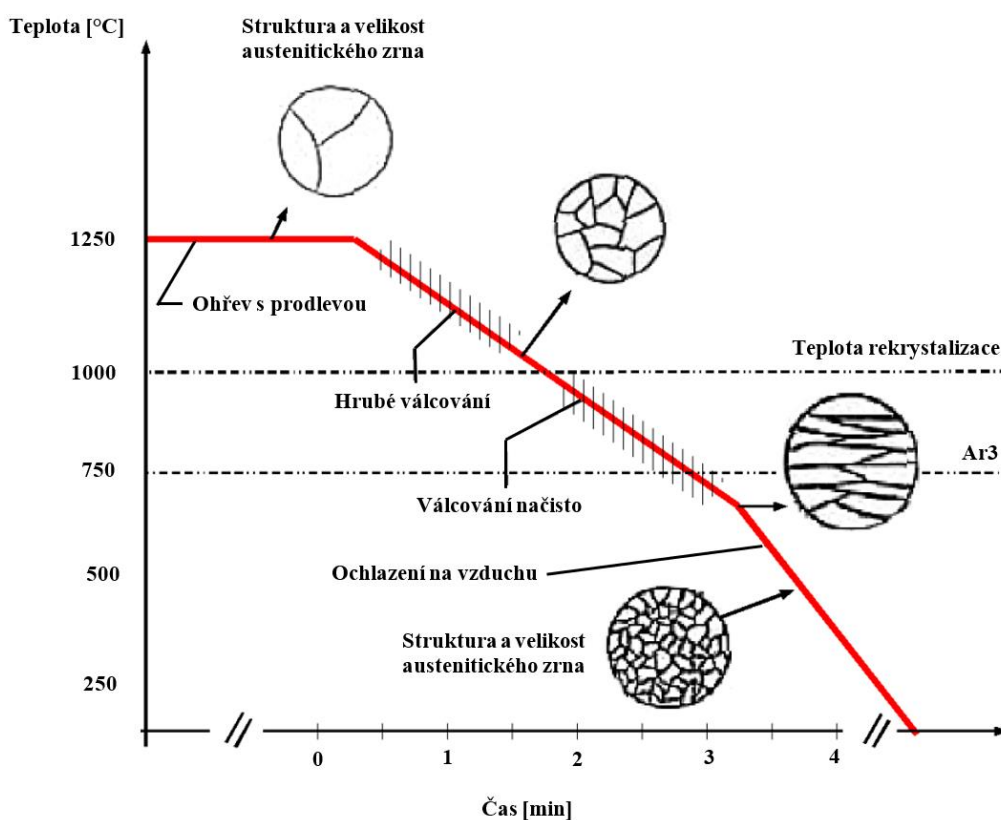
Obr. 18 - Závislost rozpusťnosti precipitátů NbC, TiC a VN na obsahu uhlíku, nebo dusíku v oceli. [46]

Rozpusťnost precipitátů NbC, TiC a VN v závislosti na obsahu uhlíku, nebo dusíku uvádí Obr. 18. Vyšší austenitizační teplota zpravidla zvyšuje množství rozpuštěných legur. [28]

4.1.2. Výroba HSLA ocelí řízeným válcováním

Řízené tváření je pojmem, označující proces zpracování materiálu při definovaných parametrech výrobních podmínek, za cílem dosažení požadovaného strukturního stavu. Jedná se především o termomechanické a časové vlastnosti pro výrobní fáze tváření a ochlazování. Dosažení vysokých hodnot mechanických vlastností je podmíněné vhodnou mikrostrukturou. Cílem řízeného válcování je dosažení jemnější struktury austenitického zrna, ze kterého posléze dochází i ke vzniku jemnějšího feritu. Tato požadovaná mikrostruktura zaručuje vyšší mez kluzu a pevnosti, lepší precipitační zpevnění a zároveň i pomalejší hrubnutí při sekundární rekrytalizaci.

K řízenému tváření dochází několikafázově v teplotním rozmezí od 1000 °C do přibližně 750 °C. Při vyšších teplotách je materiál válcován nahrubo a posléze (od 900 °C níže) načisto. Příklad termomechanického zpracování popisuje Obr. 19. [26; 29]



Obr. 19 - Schéma teplotního průběhu termomechanického zpracování

Ve většině případů dochází k řízení vývoje struktury bržděním rekrystalizace austenitu buď účinkem mikrolegujících prvků, nebo řízenou precipitací. Mezi používané druhy řízeného válcování patří:

- i. Konvenční řízené válcování
- ii. Rekrystalizací řízené válcování
- iii. Dynamickou rekrystalizací řízení válcování

Rozdíl mezi metodami spočívá především ve výsledné jemnosti feritických zrn. [29]

5. Zbytková napětí svařovaných konstrukcí

Obecně jsou zbytková napětí (dále *ZN*) taková napětí, která v tělese trvale působí i při absenci vnějšího zatížení a jsou důsledkem technologických procesů, kterými daný materiál prošel. Původcem zbytkové napjatosti jsou teplotní, deformační, nebo silová zatížení, jimiž dochází ke vzniku pružně-plastického přetvoření materiálu. Po odstranění vnějšího zatížení zůstávají v součásti zbytková napětí. Tato napětí je možné klasifikovat podle různých hledisek, z nichž nejvýznamnější je velikost objemu materiálu, v němž je napětí jednotné velikostí a směrem.

- i. Zbytková napětí I. druhu – Makroskopická (homogenní v řádu *mm* – mnoho zrn)
- ii. Zbytková napětí II. druhu – Mikroskopická (homogenní v oblastech jednotlivých zrn)
- iii. Zbytková napětí III. druhu – Submikroskopická (nehomogenní)

Zbytková napětí v konkrétním bodě celého objemu tělesa jsou vždy superpozicí všech tří druhů, přičemž *ZN* I. druhu, jsou střední hodnotou velké množiny *ZN* II. druhu. Zásadním rozměrem, pro výše uvedenou klasifikaci *ZN*, je strukturní hrubozrnnost.

Klasifikace *ZN* ve vztahu k procesům svařování, popřípadě tepelného zpracování, se od obecného rozdělení liší. Jednotlivá kritéria jsou následující:

- i. Doba životnosti – Napětí dočasná, nebo trvalá
- ii. Směrovost – Napětí podélná (ve směru svařování), nebo příčná (kolmá na směr svařování)
- iii. Původ vzniku – Vznik *ZN* změnou objemu, nebo tvaru

V souladu s prvním kritériem je nutné rozlišovat mezi zbytkovou napjatostí dočasnou (vznikající v průběhu vnášení tepla do materiálu) a napjatostí trvalou (po úplném ochlazení a vyrovnání teplot). Zatímco dočasná napětí jsou důležitým faktorem pro samotnou svařitelnost, tak trvalá napětí předurčují životnost a pevnost svařované sestavy.

Změny objemu materiálu jsou způsobeny teplotní roztažností materiálu, fázovými transformacemi, nebo chemickými přeměnami, zatímco změny tvaru jsou způsobeny plastickými, nebo viskoplastickými (creep, relaxace) deformačními procesy. [30; 31]

Objemové a tvarové změny, které byly výše popsány, neprobíhají odděleně, nýbrž současně. Nerovnoměrně rozložené teplo, vnášené svařováním, způsobuje ohřev a s tím spojenou expanzi materiálu. Následně součást chladne a smršťuje se. Teplotní roztažnost materiálu způsobuje v průběhu ohřívání a chladnutí tzv. teplotní napjatost, která po ochlazení na pokojovou teplotu vymizí, a proto nemusí být nutně považována za druh napjatosti zbytkové. Pokud ovšem v důsledku velkých nehomogenit teplotního pole dojde ke vzniku plasticky deformovaných oblastí, zůstanou tyto oblasti přetvořené i po vychladnutí na pokojovou teplotu včetně zbytkových napětí.

Jedná-li se zároveň o materiál, v němž jsou přítomné fázové transformace, vznikne současně i transformační zbytková napjatost. Obecně lze tedy *ZN*, způsobené procesem svařování, klasifikovat jako kombinaci napětí teplotních a transformačních.

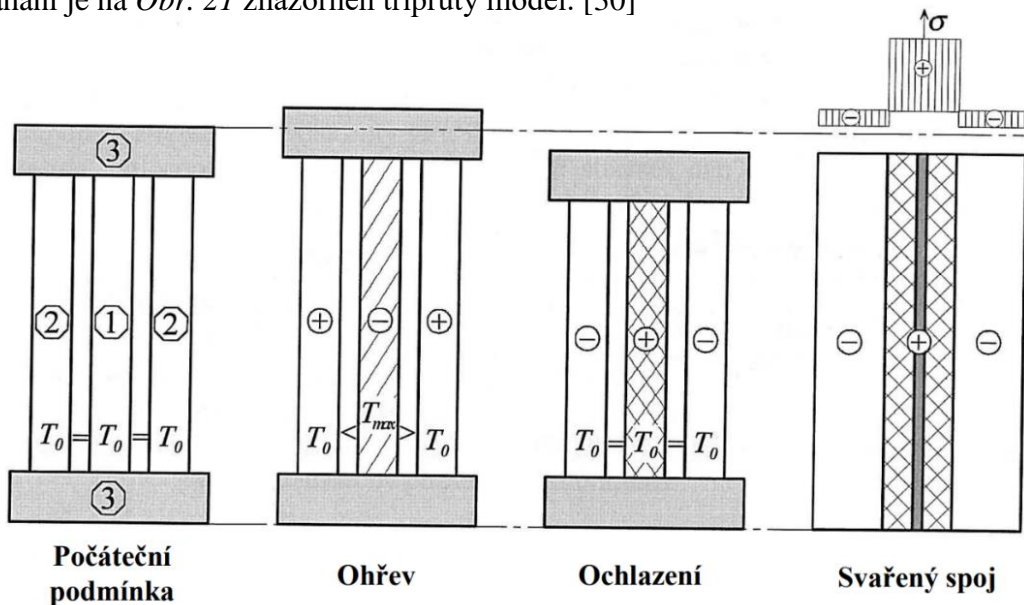
V oblastech, kde převládá teplotní deformace, se vyskytuje tahová zbytková napjatost a v oblastech, kde převládají transformační deformace, napjatost tlaková. Průběhy ZN v závislosti na převládajícím způsobu deformace jsou znázorněny na Obr. 20. [30]



Obr. 20 - Průběhy teplotní a transformační napjatosti [30]

Svařování způsobuje velmi nerovnoměrné zahřívání jednotlivých objemů materiálu. Oblasti, které jsou v těsné blízkosti svařovacího oblouku (tepelného zdroje), jsou zahřívány na teploty převyšující tisíc stupňů. Toto teplo je vedením odváděno do okolního objemu tělesa. Lokálním zahříváním a ochlazováním tak dochází ke vzniku objemových změn produkujících dočasná i trvalá napětí. Pokud je těleso složeno z konečného počtu velikostně jednotných kubických elementů, bude jejich zahříváním docházet k postupnému rozepínání do všech prostorových směrů. Nerovnoměrné zahřívání způsobí, že se každý z těchto elementů bude rozpínat úměrně k teplotě v dané jednotce objemu, což způsobí, že elementy budou rozdílně velké. Ve stejném čase dochází i k rozpínání sousedního elementu, který je svým okolím omezován a deformuje se. Vzniká složitý, deformačně napěťový stav na úrovni jak elementu, tak i celého objemu tělesa. Pokud by deformace v elementech byly pouze elastické, došlo by k ochlazení bez jakéhokoliv zbytkového napětí. Pokud ale dochází k plastické deformaci, elementy rozdílných tvarů a velikostí nemohou být znovu seskupeny v celistvé těleso beze změny deformačně-napěťového stavu a vznikají zbytková napětí.

Zpravidla je zbytková napjatost po svařování trojosá, protože se elementy rozpínají v každém směru odlišně. Pro snadné pochopení problematiky vzniku ZN při teplotním namáhání je na *Obr. 21* znázorněn tříprutý model. [30]



Obr. 21 - Schématické znázornění vývoje zbytkových napětí v průběhu svařování [30]

Model se skládá z jednoho prutu č. 1 a dvou prutů č. 2, které jsou připevněny k tuhému základu č. 3. Po celou dobu je vzdálenost mezi deskami pevné základny č. 3 stejná. Centrální prut č. 1 je vystaven působení vysokých teplot simulujících oblast blízko svaru, zatímco oba krajní pruty č. 2 jsou drženy na konstantní teplotě. Zahříváním prostředního prutu dojde ke zvětšování jeho délky v důsledku teplotní roztažnosti. Protože je ale prut vložen mezi dvě pevně uložené desky a nemá se kam prodloužit, dojde k nevratné plastické deformaci a vzniku tlakových napětí. V průběhu ochlazování deformovaného prostředního prutu č. 1 začne docházet ke smršťování, zatímco krajní elementy mají snahu si svou původní délku udržet. V těsné blízkosti oblasti svaru vzniká v důsledku deformace a následného smrštění tahová zbytková napjatost. V krajních oblastech zůstává napjatost tlaková. [31]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6. Cíl experimentálního programu

Cílem experimentálního programu je provedení únavových zkoušek na zkušebních tělesech z vybraných materiálů (oceli S235JR a S460MC) a hodnocení přínosu technologie *HFMI*. Tyto zkoušky byly prováděny na experimentálním standu zkušebny provozní pevnosti a únavové životnosti pracoviště *RTI/ZČU*. Následně byly na základě výsledků zkoušek sestrojeny *S-N* křivky pro oba zkoušené materiály ve stavu opracovaném pomocí metody *HFMI* i bez ní a byl hodnocen přínos této technologie. Mezi hlavní části experimentálního programu patří popis zkušebních vzorků, zkušebního standu, ucelený popis experimentu a vyhodnocení získaných dat.

7. Experimentální vzorky

Zkušební vzorky pro únavové zkoušky byly připraveny ze dvou materiálů. Pro úvodní pokus, jehož hlavním cílem bylo vyzkoušet si připravenou metodiku únavové zkoušky, byl pro přípravu svařeného zkušebního tělesa použit jako polotovar plech z oceli S235JR o tloušťce 15 mm. Ocel S235JR byla pro zkoušky zvolena jako zástupce běžně používaných konstrukčních ocelí a na základě dostupné literatury by zde aplikace *HFMI* měla mít pouze malý přínos. Druhým zkoušeným materiálem byla zvolena ocel S460MC o tloušťce 15 mm, tedy vysokopevnostní termomechanicky zpracovaná ocel. Tento materiál byl naopak zvolen na základě možnosti potenciální aplikace v kolejovém průmyslu, neboť by mohl být vhodnou náhradou za konvenčně používané oceli S235JR a S355NL. Pro oba materiály bylo vytvořeno celkem osm zkušebních těles, jejichž geometrie bude popsána níže v této kapitole. Vzorky z oceli S460MC byly po svaření a před únavovou zkouškou podrobeny *NDT* zkouškám, aby bylo zajištěno, že experiment nebude zatížen vadami vzniklými již při svařování. *NDT* zkouškami, které byly provedeny, jsou zkouška vizuální a zkouška prozařovací *RT* paprskem. U poloviny vzorků z obou materiálů byla po svařování, pro zvýšení únavové životnosti, aplikována technologie *HFMI*.

7.1. Ocel S235JR

Ocel S235JR patří do kategorie nelegovaných jakostních konstrukčních ocelí vhodných ke svařování všemi obvykle používanými způsoby. S rostoucí tloušťkou a hodnotou uhlíkového ekvivalentu *CEV* dochází ke zvyšování rizika výskytu trhlin za studena v oblasti svaru, avšak i pro tloušťky nad 100 mm je materiál klasifikován jako velmi dobře svařitelný.

Do tloušťky 50 mm se ocel svařuje bez předehřevu a nenásleduje relaxační žihání. Modifikace těchto ocelí mohou být také vhodné pro tváření za tepla i za studena. Tato ocel je určena pro všeobecné technické použití a výrobu ocelových konstrukcí, zároveň je vhodná i pro použití ve stavitelství. Pro tloušťky pod 40 mm má ocel S235JR mez kluzu 235 MPa a minimální mez pevnosti v tahu 360 MPa. Chemické složení oceli S235JR je popsáno v Tab. 2. [32]

C_{\max} pro tloušťku $t \leq 16$ mm	Mn_{\max}	Si_{\max}	P_{\max}	S_{\max}	N_{\max}	CEV_{\max}
0,17	1,4	-	0,035	0,035	0,012	0,35

Tab. 2 – Chemické složení oceli S235JR v % [32]

7.2. Ocel S460MC

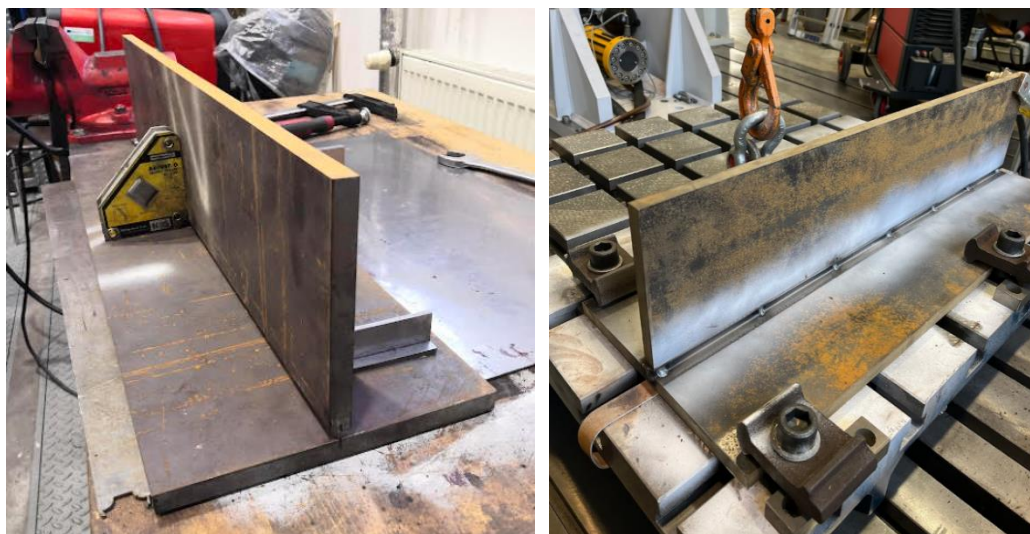
Ocel S460MC patří do kategorie legovaných jakostních konstrukčních ocelí s vyšší mezí kluzu určených pro tváření za studena. Tvářením za studena dochází ke zvyšování tvrdosti za současného poklesu pevnosti, tváření za tepla (za teplot vyšších než 580 °C) není u těchto ocelí povolené, neboť by vedlo k nevratným strukturním změnám a materiál by ztratil vlastnosti dosažené primárním zpracováním. Ze stejných důvodů je důležité správně nastavit parametry svařování a hlídat vnesené teplo. Ocel je možné tepelně dělit běžnými způsoby bez předehřevu (plamenem, plazmou a laserem) a je dobře svařitelná. Použití předehřevu není vyžadováno pro tloušťky plechů pod 25 mm. Pro snížení rizika studených trhlin je velmi důležitá čistota svarových ploch a použití přídatných materiálů s nízkým obsahem vodíku (dle ISO 6390 do 5 ml / 100 g). Díky nízkému obsahu uhlíku a legur jsou v *TOO* příznivé pevnostní vlastnosti i u větších svařovacích příkonů. Pokud je po svařování nezbytné materiál žíhat na snížení zbytkových napětí, je doporučeno teplotní rozmezí 530 až 580 °C s následným ochlazováním na vzduchu. Polotovary z oceli S460MC se vyrábí v tloušťkách od 1,5 mm do 20 mm. Chemické složení oceli je popsáno v Tab. 3. [33; 34]

C_{\max}	Si_{\max}	Mn_{\max}	P_{\max}	S_{\max}	Al_{\min}	Nb_{\max}	V_{\max}	Ti_{\max}	CEV_{\max}
0,12	0,5	1,6	0,025	0,015	0,015	0,09	0,2	0,15	0,4

Tab. 3 – Chemické složení oceli S460MC v % [33]

7.3. Zkušební tělesa

Tvar zkušebních těles je dán možnostmi pro uchycení na experimentálním standu. Jedná se o svařenec dvou plechů, z nichž jeden tvoří základnu a druhý je na něj navařený pomocí oboustranného koutového svaru. Plechy byly nařezány na vodní pile. Na *Obr. 22 – Obr. 24* je zobrazen postup svařování. Prvním krokem bylo upnutí plechů do polohy, v níž dále budou svařovány. V této poloze bylo provedeno bodové svařování („heftování“) a následně odstraněny přípravky na upevnění, viz *Obr. 22*.



Obr. 22 – Upnutí před svařováním (vlevo) a bodové svařování (vpravo)

Následně byla vytvořena kořenová vrstva pomocí střídavě přerušovaných koutových svarů o délce 100 mm, která byla posléze doplněna na souvislý svar, viz *Obr. 23*.



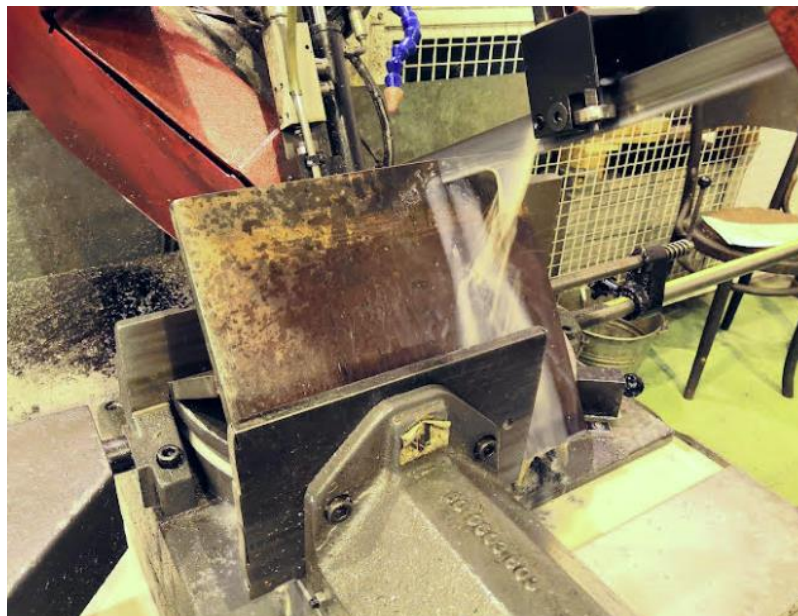
Obr. 23 – Kořenová vrstva svaru, přerušované svary (vlevo) a souvislý svar (vpravo)

V posledním kroku byla vytvořena krycí vrstva a plechy v celé délce svařeny oboustranným koutovým svarem o rozměru a_8 .



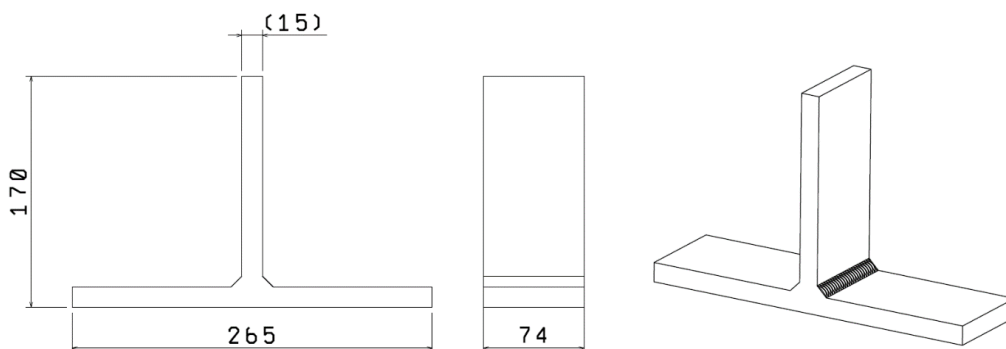
Obr. 24 - Konečný tvar svařence před rozřezáním na zkušební tělesa

Po vychladnutí svařence byla oboustranně aplikována technologie *HFMI* na polovině jeho celkové délky a byl rozřezán na osm zkušebních těles, viz *Obr. 25*. Průměr použitého indentoru aplikační pistole byl 3 mm . Hloubka vytvořené stopy byla 1 mm . Kromě prvních a posledních 30 mm svařence byly také uříznuty 30 mm v oblasti nájezdu technologie *HFMI*. Bylo tak učiněno, aby tyto problematické oblasti neovlivnily výsledky únavových zkoušek.



Obr.25 – Řezání svařence na jednotlivá zkušební tělesa

Geometrie a rozměry zkušební tělesa jsou zobrazeny na *Obr. 26*.



Obr. 26 - Tvar a rozměry zkušebních těles

Pro zkušební tělesa z oceli S235JR byl použit přídatný materiál G3 Si1, zatímco pro vzorky z oceli S460MC byl jako přídatný materiál použit G46 4 M21 4Si1. Chemické složení přídatných materiálů uvádí *Tab. 4* a *Tab. 5*. Přídatné materiály byly ve formě drátu o průměrech 1 mm pro S235JR a 1,2 mm pro S460MC. Ochranným plynem byl pro svařování všech vzorků Stargon C18, tedy směs Argonu a CO₂ v poměru 82/18.

C	Mn	Si
0,12	0,5	1,6

Tab. 4 – Chemické složení přídatného materiálu G3Si1 v % [35]

C	Mn	Si
0,1	1,7	1,0

Tab. 5 – Chemické složení přídatného materiálu G46 4 M21 4Si1 v % [36]

7.3.1. Parametry svařování

Parametry svařování pro ocel S460MC jsou zobrazeny v *Tab. 6*. Hodnota specifického vneseného tepla byla dopočtena a vztahuje se k jednotce délky svaru.

Počítá se pomocí vztahu:

$$Q_s = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s}$$

kde:

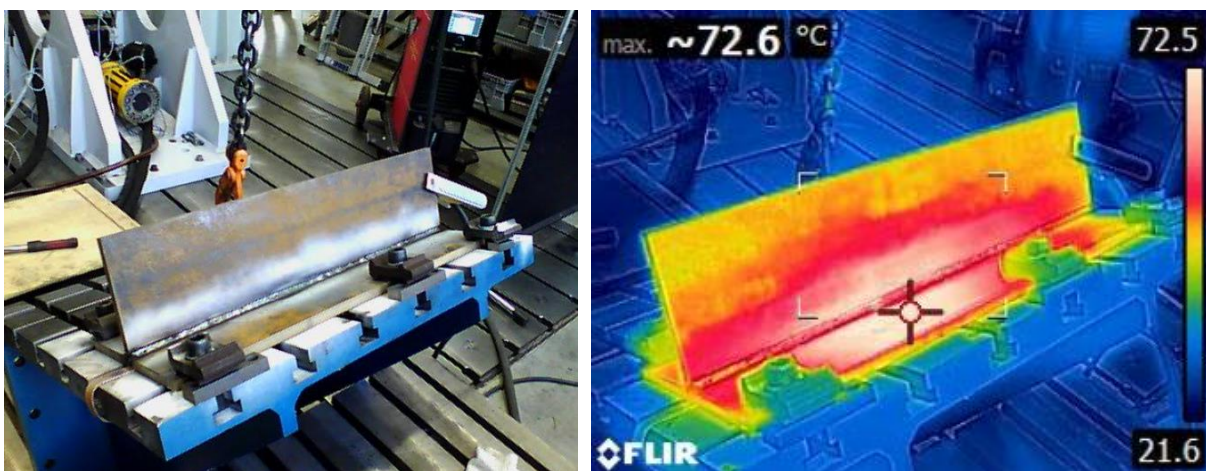
- Q_s je specifické vnesené teplo [kJ/mm]
- η je součinitel účinnosti přenosu tepla [-]
- U je svařovací napětí [V]
- I je svařovací proud [A]
- v_s je svařovací rychlost [mm/s]

Parametry / Svar	Kořenová vrstva	Krycí vrstva
	(Přerušovaný koutový svar 100 mm)	(Souvislý koutový svar 700 mm)
Svařovací napětí – U	26 V	29 V
Svařovací proud – I	210 A	230 A
Rychlost drátu – v_d	7 m/min	10,5 m/min
Svařovací rychlost – v_s	361 mm/min	134 mm/min
Specifické vnesené teplo – Q_s	0,728 kJ/mm	2,39 kJ/mm

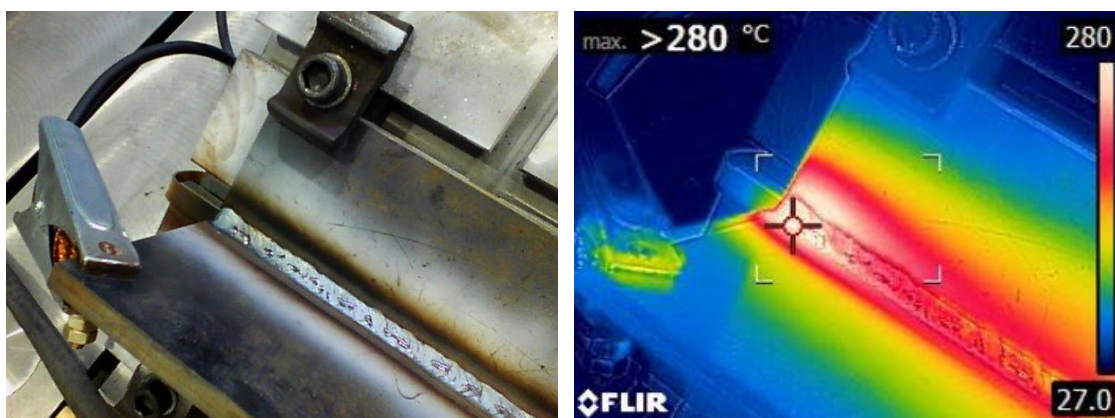
Tab. 6 - Parametry svařování vzorků z oceli S460MC

Pro úplnost informací o svařovacím postupu a utvoření si obrázku o materiálových pochodech uvnitř zkušebních vzorků, byla zároveň pomocí termokamery změřeny teplota interpassu a teplota housenky po svaření.

Měření ukázala, že teplota interpassu nepřesáhla 80 °C a teplota housenky nepřesáhla hranici 300 °C. Vnesené teplo lze považovat za příliš nízké. Důsledkem nízkého vneseného tepla nedošlo u svařovaných vzorků k úplnému propojení housenek. V místě kontaktu kořenové a krycí housenky vznikla napříč několika vzorky podélná dutina o průměru přibližně 0,5 mm. Výsledky měření teplot jsou zobrazeny na Obr. 27 (interpass) a Obr. 28 (krycí housenka).



Obr. 27 - Měření teploty interpassu, snímek uchycení (vlevo) a výstup z termokamery (vpravo)

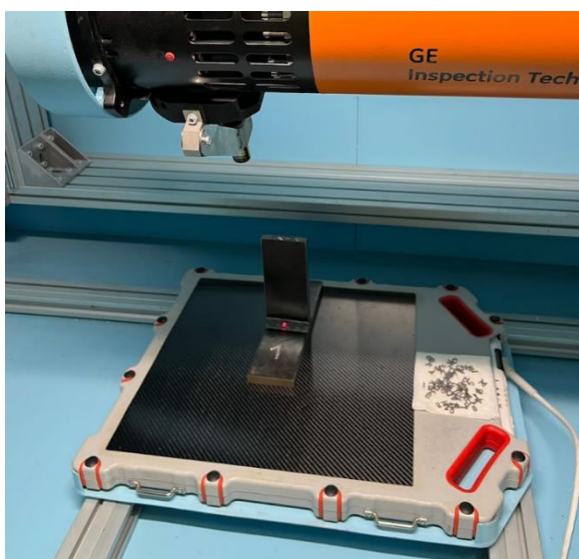


Obr. 28 - Měření teploty krycí housenky po dokončení svaru, snímek uchycení (vlevo) a výstup z termokamery (vpravo)

7.4. NDT zkoušky zkušebních těles z oceli S460MC

Nedestruktivní zkoušky jsou ve strojírenství velmi významné, neboť umožňují zjišťování vad, aniž by došlo k poškození zkoumaného vzorku. Tyto zkoušky byly provedeny pouze u zkušebních těles z oceli S460MC, neboť právě zde se očekává významný přínos

technologie *HFMI*. Aby bylo zajištěna identifikace povrchových i vnitřních nedostatků na zkušebních vzorcích před únavovými zkouškami, byla provedena vizuální zkouška (dále *VT*) dle ČSN EN ISO 17637 a prozařovací zkouška pomocí rentgenu (dále *RT*) dle ČSN EN ISO 17636. Zkušební tělesa byla označena čísly od 1-4, v závislosti na amplitudě síly, kterou budou během zkoušek únavy zatěžovány. Bylo tak učiněno, aby bylo i po únavových zkouškách zajištěno, že nedojde k pomíchání vzorků a že bude možné konkrétní vzorek přiřadit ke konkrétním podmínkám zatěžování. Ke každému číslu potom náležely dva vzorky, z nichž jeden byl upraven pomocí technologie *HFMI*, zatímco druhý vzorek nebyl nijak upraven. Zkušebních těles bylo celkem osm. Nedostatkem, který byl zpozorován napříč všemi vzorky, byl neprovařený kořen svaru. Dutina je přibližně 0,5 mm vysoká a 1,5 mm široká. Příčinou neprovaření kořene svaru byly buď nízké parametry svařování (elektrický proud), špatně připravená svarová plocha kořenové housenky (provádí se důkladné očištění vzniklých oxidů), nebo částečná kombinace obojího. Dalším nedostatkem, který vedl napříč vícery tělesy je dutina o průměru přibližně 0,5 mm, která byla s největší pravděpodobností způsobena špatným napojením mezi kořenovou a krycí vrstvou v důsledku kombinace nízkých svařovacích parametrů a nízké teploty interpassu, tj. málo vneseného tepla. Zkušební tělesa se pro *RT* ukázala jako nevhodná z důvodu velké prozařované tloušťky. Jak již bylo uvedeno, polotovarem pro výrobu vzorků byl plech o tloušťce 15 mm. Rentgenové záření procházelo kolmo svarem a prozařovaná tloušťka tak mohla být až dvojnásobná. Na *Obr. 29* je vidět, v jaké poloze byly zkušební vzorky vůči zdroji záření během prozařovací zkoušky.

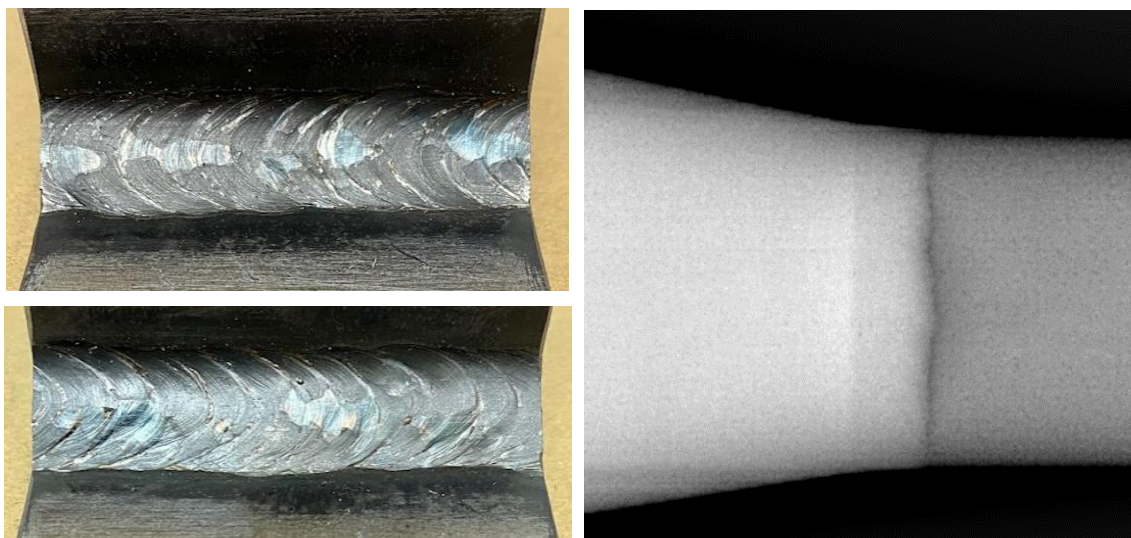


Obr. 29 - Poloha vzorků během RT

Zkušební tělesa, u nichž nedošlo k aplikaci *HFMI*, budou dále označována pouze číslem (tj. 1, 2, 3, 4). Zkušební tělesa, u nichž k aplikaci *HFMI* došlo, budou dále označována číslem a hvězdičkou (tj. 1*, 2*, 3*, 4*).

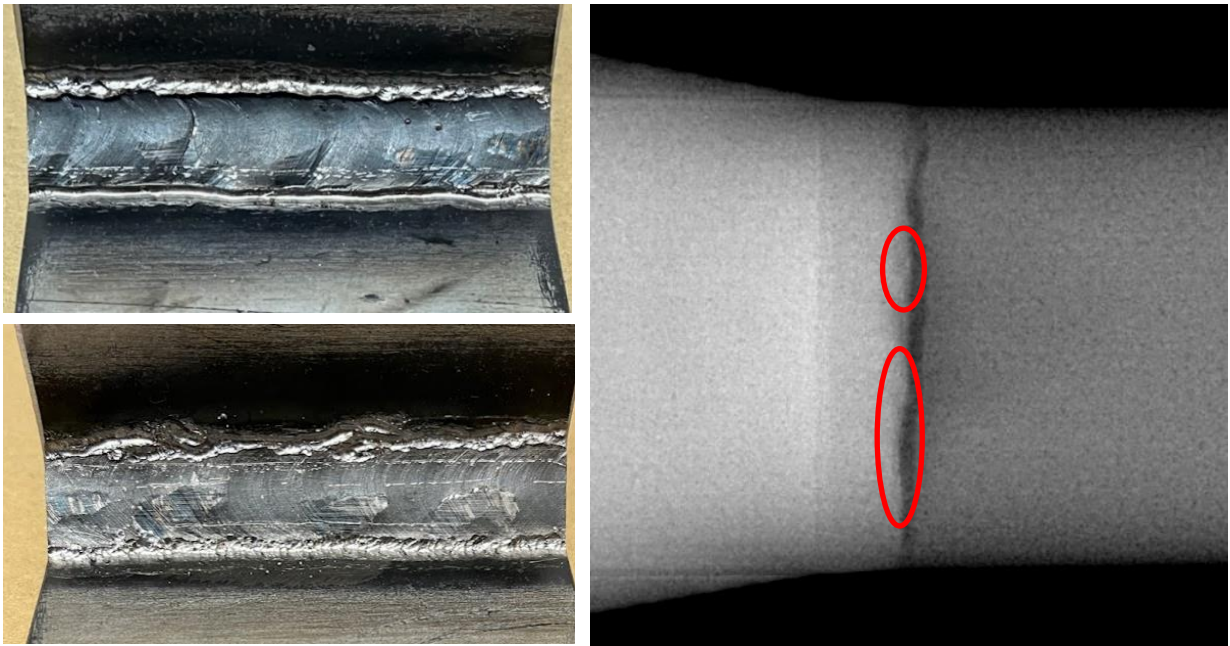
7.4.1. Výsledky *NDT* zkušebních těles „1“

Na pravé straně zkušebního tělesa č. 1 byl během *VT* zpozorován zápal na horní hraně přechodu svaru do základního materiálu (dále *ZM*) ve vzdálenosti přibližně 40 *mm* (ve směru svařování). Na levé straně je možné pozorovat rozstříky. Pomocí *RT* nebyly zjištěny žádné nedostatky. Snímky zkušebního tělesa jsou zobrazeny na *Obr. 30*.



Obr. 30 - Zkušební těleso č. 1 (Vlevo nahoře pravá strana, vlevo dole levá strana vzorku)

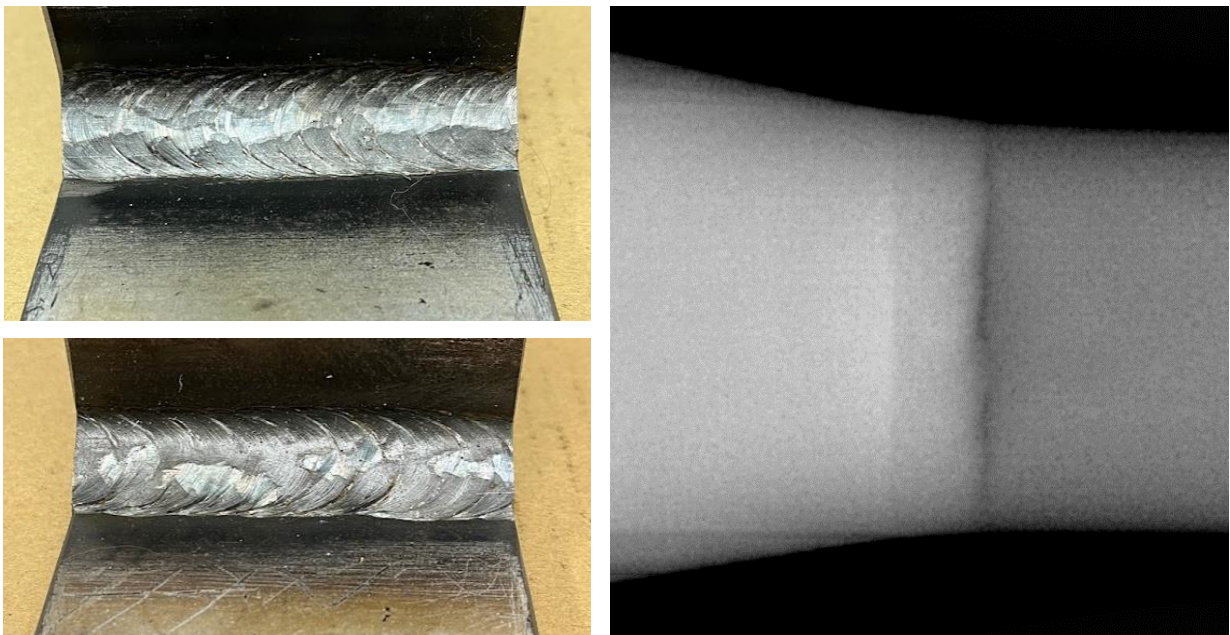
Na pravé straně zkušebního tělesa č. 1* byl během *VT* zpozorován rozstřík ve vzdálenosti 20 *mm* (ve směru svařování) a opracováním byly vytvořeny lesklé a hladké stopy. Na levé straně zkušebního vzorku došlo během úpravy ve dvou případech k vadnému napojení. Výsledkem špatné aplikace technologie *HFMI* může dojít ke snížení únavové životnosti během zkoušek. Místa, kde došlo ke špatnému opracování vzorků, byla viditelná i během *RT* a jsou na *Obr. 31* zvýrazněna. Náchylnost vzorku na porušení v důsledku nedodržení podmínek opracování odhalí až únavové zkoušky.



Obr. 31 - Zkušební těleso č. 1* (Vlevo nahoře pravá strana, vlevo dole levá strana vzorku)

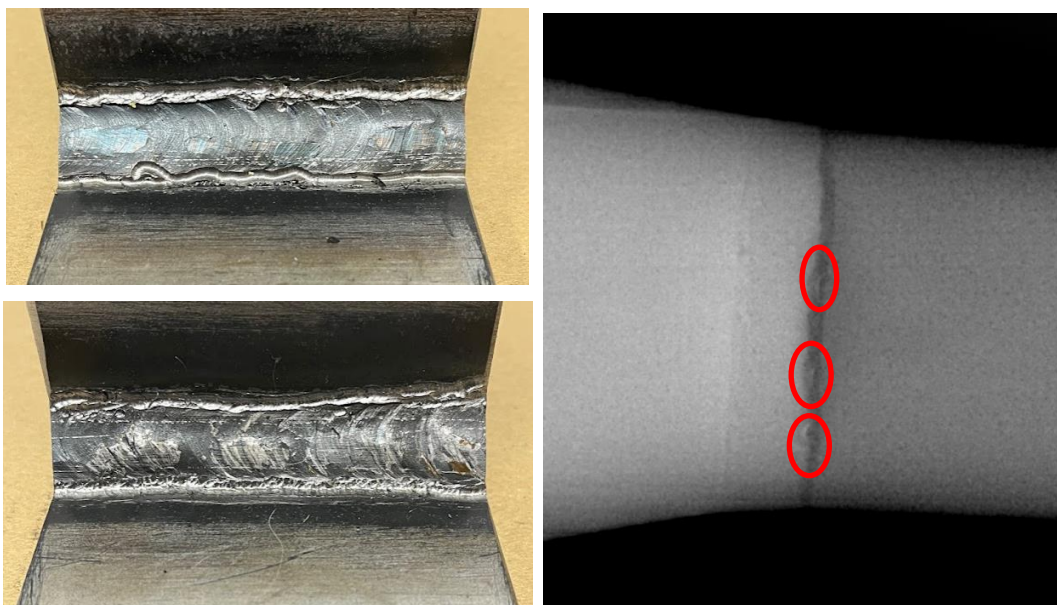
7.4.2. Výsledky NDT zkušebních těles „2“

Během VT ani RT nebyly u zkušebního tělesa č. 2 zpozorovány žádné nedostatky. Snímky zkušebního tělesa jsou zobrazeny na Obr. 32.



Obr. 32 - Zkušební těleso č. 2 (Vlevo nahoře pravá strana, vlevo dole levá strana vzorku)

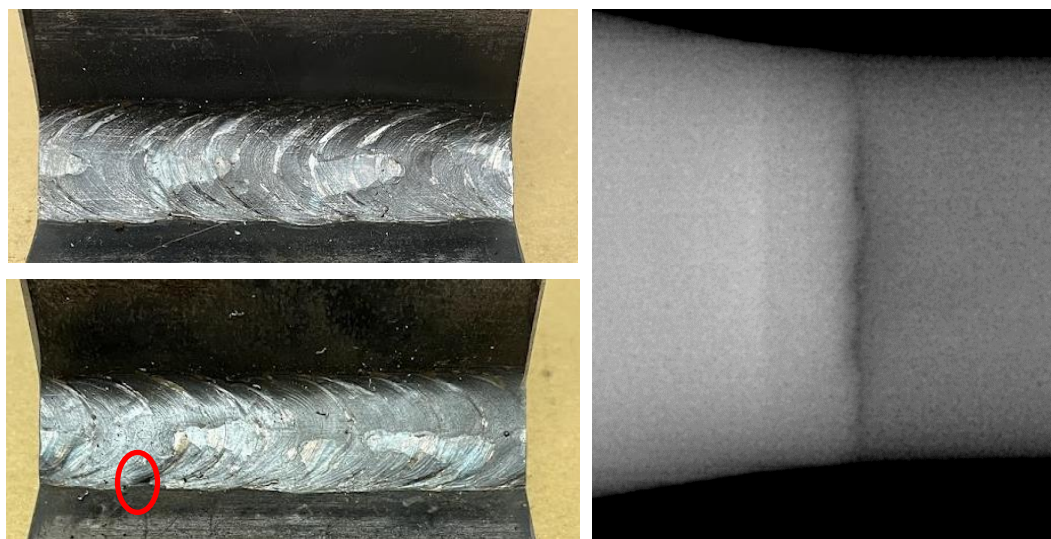
U zkušební tělesa č. 2* nebyly během VT zpozorovány žádné nedostatky způsobené svařováním. Na obou stranách zkušební tělesa jsou vady způsobené chybami během opracování pomocí HFMI. Na pravé straně došlo k přerušení a znovunapojení při opracování spodní hrany. Na levé straně je viditelná stejná chyba na horní hraně přechodu do ZM, a to na počátku i na konci zkušební vzorku. Oblast uprostřed a celá spodní hrana jsou opracovány správně tak, že výsledný povrch je hladký a lesklý bez viditelných přeložek, nebo přerušení. Velkou nejistotu do zkoušek únavy vnáší RT, kde jsou vidět tři místa indukující trhlinu. Není však možné bez dalšího vyšetřování tvrdit, že se o trhlinu jednat musí. Stejně jako v případě zkušební tělesa č. 1* přinesou prokazatelné výsledky až zkoušek únavy. Snímky zkušební tělesa č. 2* jsou zobrazeny na Obr. 33.



Obr. 33 - Zkušební těleso č. 2* (Vlevo nahoře pravá strana, vlevo dole levá strana vzorku)

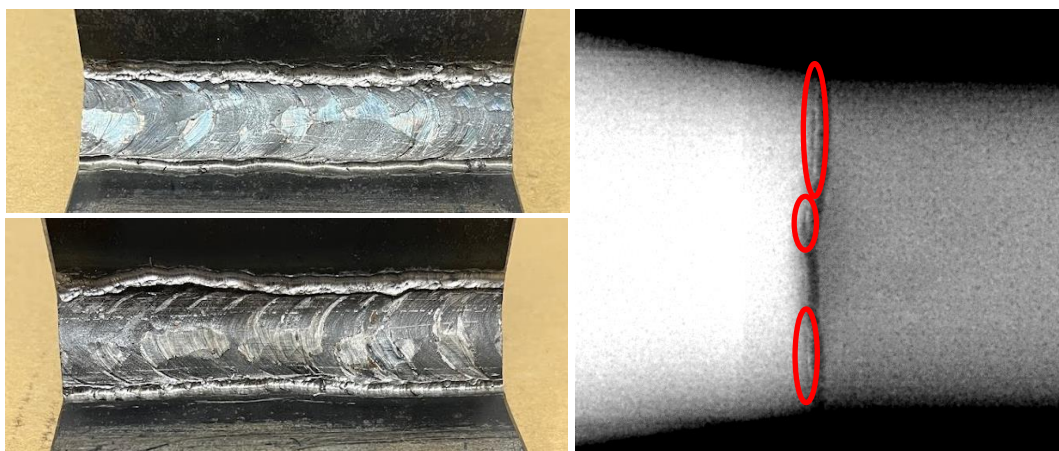
7.4.3. Výsledky NDT zkušebních těles „3“

Na pravé straně nebyly u vzorku č. 3 při VT zpozorovány žádné nedostatky. Na levé straně došlo ve vzdálenosti přibližně 55 mm (ve směru svařování) ke studenému spoji na spodní hraně přechodu svaru do ZM. Studený spoj byl na Obr. 34 zvýrazněn. Během RT nebyly zpozorovány žádné nedostatky.



Obr. 34 - Zkušební těleso č. 3 (Vlevo nahoře pravá strana, vlevo dole levá strana vzorku)

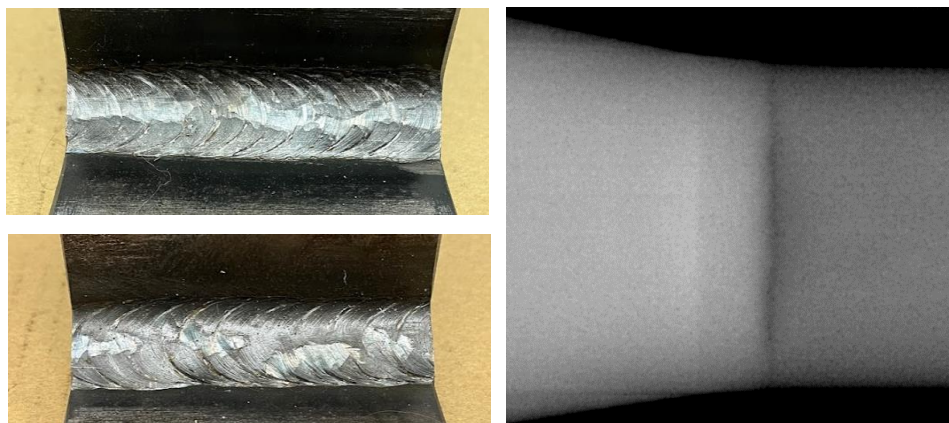
U zkušebního vzorku č. 3* nebyly zpozorovány žádné vady v technologii svařování. Technologie HFMI u tohoto vzorku byla aplikována bez viditelných přerušení. Na pravé straně tělesa nebyly zpozorovány žádné nedostatky. Na levé straně zkušebního vzorku byl podél horní hrany přechodu do ZM, navzdory hladké a lesklé drážce, zpozorován vrub ve vzdálenosti přibližně 20 mm (ve směru svařování). Na Obr. 35 je u vzorku dobře viditelné, že technologií HFMI bylo u přechodu do ZM vytlačeno velké množství materiálu, v jehož důsledku vznikla tzv. přeložka. Na snímku získaném z RT je vidět, jak se tato vada táhne podél téměř celého vzorku.



Obr. 35 - Zkušební těleso č. 3* (Vlevo nahoře pravá strana, vlevo dole levá strana vzorku)

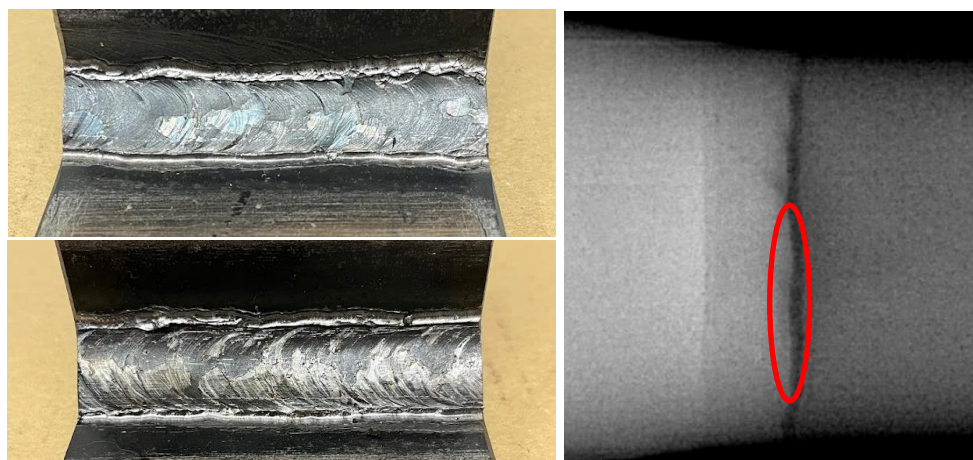
7.4.4. Výsledky NDT zkušebních těles „4“

Během VT ani RT nebyly u zkušebního tělesa č. 4 zpozorovány žádné nedostatky. Snímky zkušebního tělesa jsou zobrazeny na Obr. 36.



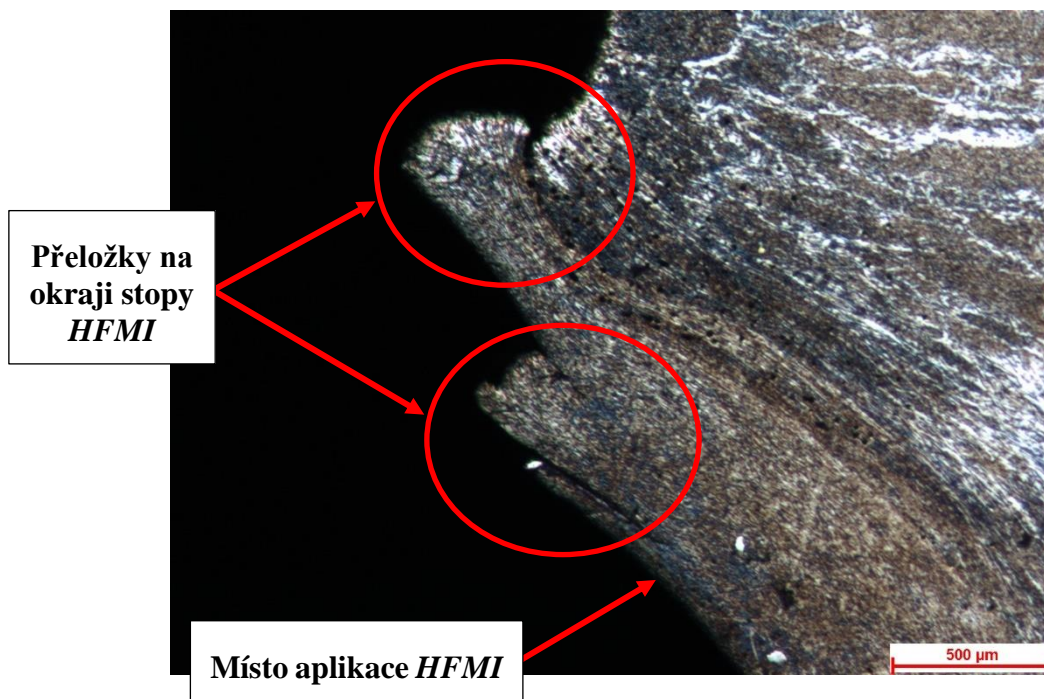
Obr. 36 - Zkušební těleso č. 4 (Vlevo nahoře pravá strana, vlevo dole levá strana vzorku)

U zkušebního vzorku č. 4* nebyly zpozorovány žádné vady v technologii svařování. Spodní hrana, kde svar přechází do ZM, je na levé i pravé straně dobře opracovaná bez viditelných nedostatků. Na levé straně zkušebního tělesa nebyly zpozorovány chyby opracování ani na horní hraně přechodu do ZM. Na pravé straně vzorku je opět viditelná snaha o znovunapojení HFMI stopy po přerušení ve vzdálenosti přibližně 20 mm (ve směru svařování). Vzniklá přeložka je velmi nenápadně viditelná i na snímku získaného pomocí RT. Oproti zkušebnímu vzorku č. 3* se však netáhne podél celé stopy. Snímky zkušebního tělesa č. 4* jsou přiloženy v Obr. 37.



Obr. 37 - Zkušební těleso č. 4* (Vlevo nahoře pravá strana, vlevo dole levá strana vzorku)

Po provedení zkoušek únavy byl středem vzorku č.4* veden řez a přeložka byla blíže pozorována pomocí světelného mikroskopu viz *Obr. 38*. Vzniklý vrub lze považovat za chybu v aplikaci *HFMI*.



*Obr. 38 – Detailní pohled na okraj stopy vytvořené pomocí technologie HFMI u zkušebního tělesa č. 4**

8. Experimentální zařízení

Pro únavové zkoušky bylo použito experimentální zařízení na konstrukční uzly s koutovými svary. Zkušební vzorky jsou na držák připevněny pomocí čtyř šroubů M12, po jejichž odšroubování lze vzorky volně vyjmout z přípravku. Držák je ke svařovanému podstavci, který je namontován k T-drážkovému poli a vymezuje polohu vůči elektrohydraulickému pístu, připevněn pomocí čtyřech šroubů M20. K zatěžování vzorků byl použit elektrohydraulický systém od společnosti INOVA, konkrétně se jedná o hydraulický válec AH-25-100-M06 a snímač síly GTM série K 25 kN, na jehož konci je připevněn klín na zatěžování vzorku. Součásti jsou vůči sobě vystředěny pomocí středového kolíku a při jejich montáži je nutné kontrolovat jejich polohu, aby byl zajištěn rovnoměrný kontakt klínu se zkušebním vzorkem. Vzorek upevněný ve zkušebním standu je zobrazen na *Obr. 39*. [37]



Obr. 39 – Uchycení zkušebního tělesa na standu pro zkoušky konstrukčních uzlů s koutovými svary [37]

9. Únavové zkoušky

Cyklické zatěžování zkušebních těles během únavové zkoušky bylo řízeno silově. Vzorky byly namáhány nenulovým minimálním napětím (10 MPa) tak, aby byly neustále zatíženy tahovým napětím a nedocházelo k nárazům mezi klínem standu a zkušebním tělesem, ke kterým by docházelo v případě mívivého zatěžovacího cyklu. Nejprve byly únavové zkoušky provedeny na oceli S235JR a posléze na oceli S460MC. Únavové zkoušky byly započaty na vysokých hodnotách středních zatěžovacích napětí (sil) aby bylo zajištěno, že k lomu dojde v oblasti časové pevnosti (viz Obr. 7), které se postupně snižovaly.

První vzorky z obou druhů ocelí byly zatíženy kmitavým cyklem o amplitudě $4,4 \text{ kN}$ a střední síle $4,6 \text{ kN}$, byly tedy zatěžovány v rozmezí sil od $0,2 \text{ kN}$ do 9 kN . U vzorků, které následovaly, byla amplituda a střední hodnota sil postupně snižována, přičemž minimální zatěžovací síla byla v průběhu experimentu konstantní ($0,2 \text{ kN}$).

Jako kritérium ukončení životnostních zkoušek bylo považováno povolení vzorku o 5 mm ve směru zatěžování. Pokud byla zkouška v důsledku dosažení tohoto kritéria ukončena, byla provedena penetrační zkouška, během níž byla ve všech nalezena trhlina, která vedla podél svaru na horním okraji jeho přechodu do materiálu. U vzorků bez následného opracování je tento přechod dobře viditelný.

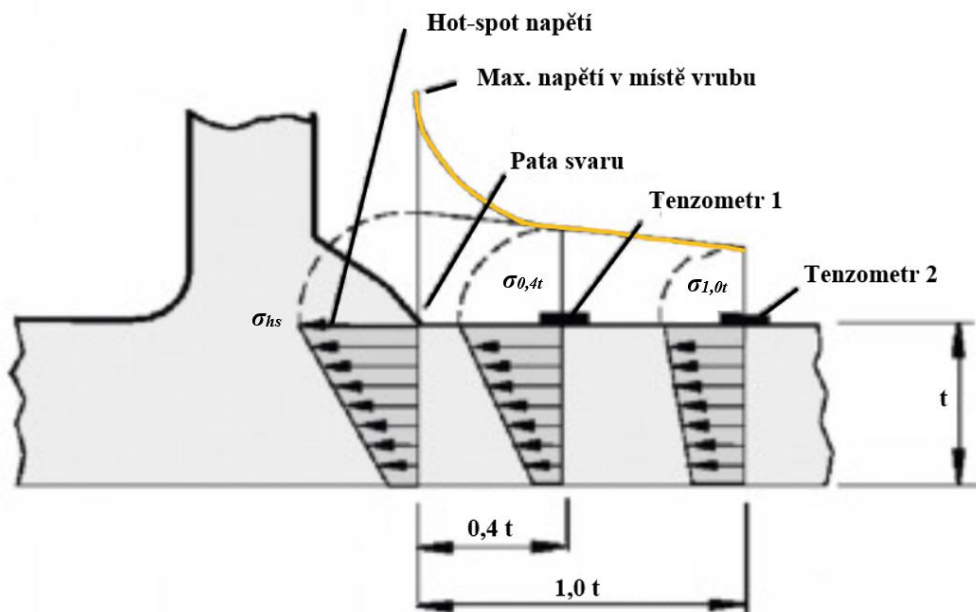
U vzorků, u nichž byla aplikována technologie *HFMI*, tento přechod zaniká v důsledku opracování indentorem a bylo předmětem zkoumání, kde dojde k její iniciaci a kudy trhlina poroste. K iniciaci trhliny, stejně tak jako k jejímu růstu, docházelo uprostřed kulové plochy vytvořené metodou *HFMI*. Bez ohledu na přeložky materiálu a potenciální vruby zpozorované v průběhu *VT* (viz *Obr. 34*) se trhlina šířila ve všech případech uvnitř vytvořené stopy podél hranice přechodu svaru do *ZM*.

9.1. Parametry únavových zkoušek a jejich vyhodnocení

Zkušební tělesa byla zatěžována cyklicky v rozmezí amplitud 4,4 až 2,9 *kN* (zatížení v průběhu únavových zkoušek postupně klesalo) a hranice teoreticky neomezené životnosti, kdy zkoušky byly ukončeny při 10^7 cyklech, aniž by došlo k porušení zkušební tělesa, bylo dosaženo ve dvou případech. Uvedená hranice neomezené životnosti v podobě 10^7 cyklů je doporučována společenstvím *IIW*. Oba případy, u nichž k porušení nedošlo, nastaly u zkušebních těles z materiálu S460MC.

Aby bylo možné únavové zkoušky vyhodnocovat ve vztahu k napětí, byl jeden vzorek ještě před jejich spuštěním zatížen staticky. Při různých velikostech statického zatížení bylo pomocí tenzometrů, umístěných v definovaných místech, měřeno napětí. Pravidla pro vyhodnocování únavové životnosti svarů jsou dána doporučeními *IIW*. Pro přepočet síly na napětí byla zvolena extrapoláční metoda hot-spot stress (napětí v kritickém místě), která vychází z teorie, že vrubem u svarového spoje je místo přechodu svaru do *ZM*, tzv. pata svaru.

Poněvadž není možné umístit tenzometr přímo do místa paty svaru, jsou v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu předepsána jiná doporučená umístění, která jsou znázorněna na *Obr. 40*. Oproti zobrazené konfiguraci bylo nutné tenzometry umístit vertikálně, neboť byla při zkoumaných podmínkách namáhání kritickým místem horní pata svaru.



Obr. 40 - Hot-spot napětí u koutového svaru

Napětí změřené pomocí tenzometrů je dosazováno do níže uvedeného vzorce extrapolované jmenovité napětí hot-spot:

$$\sigma_{hs} = 1,67 \cdot \sigma_{0,4t} - 0,67 \cdot \sigma_{1,0t}$$

kde:

σ_{hs} je hot-spot napětí [MPa]

t je tloušťka plechu [mm]

$\sigma_{0,4t}$ je napětí ve vzdálenosti 0,4t [MPa]

$\sigma_{1,0t}$ je napětí ve vzdálenosti 1,0t [MPa]

[38]

Hlavním cílem těchto výpočtů bylo získání koeficientu, který umožní převod mezi napětím a silou a sestavení únavových křivek. Pomocí výše uvedeného vztahu bylo vypočteno, že zatížení 1 kN odpovídá, v místě přechodu svaru do ZM, napětí 49 MPa.

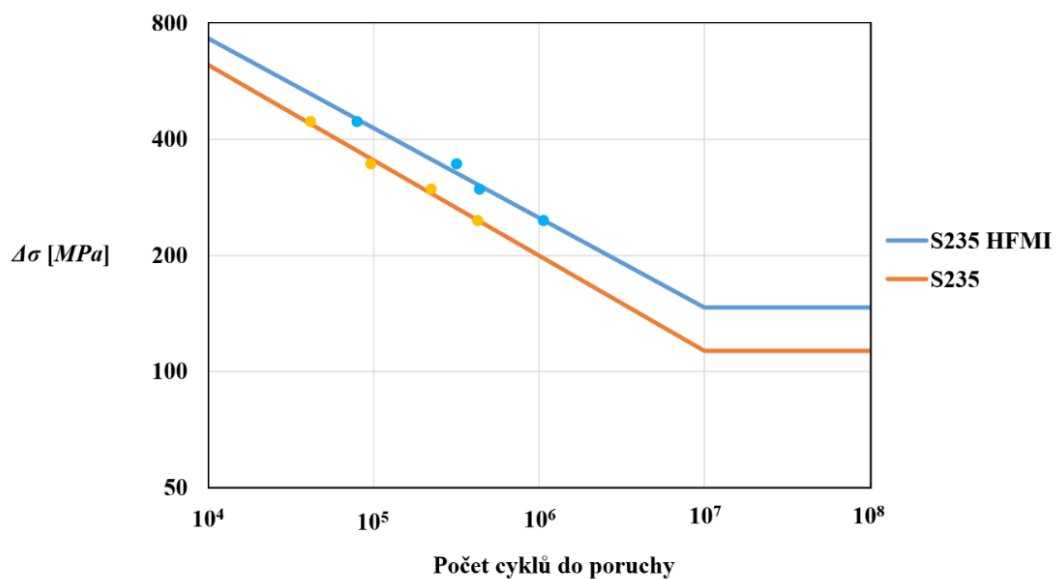
9.1.1. Hodnocení únavových zkoušek z oceli S235JR

Primárním důvodem provádění zkoušek na vzorcích z oceli S235JR bylo vyzkoušení metodiky experimentu a ověření jeho proveditelnosti. Zatěžovací podmínky jsou včetně výsledků experimentu zaneseny v *Tab. 7*.

Pořadí zkoušek	Střední síla [kN]	Amplituda [kN]	Max. síla [kN]	Počet cyklů do lomu vzorku bez aplikace HFMI	Počet cyklů do lomu upraveného vzorku s aplikací HFMI	Poměrné zlepšení životnosti ve vztahu k počtu cyklů do porušení
1	4,6	4,4	9	42.000	79.000	1,9
2	3,6	3,4	7	97.000	316.000	3,3
3	3,1	2,9	6	225.000	439.000	2
4	2,6	2,4	5	428.000	1.070.000	2,5

Tab. 7 - Parametry únavových zkoušek pro ocel S235JR

Na první pohled je patrné, že technologie *HFMI* měla pozitivní přínos na životnost vzorků. Také je možné vidět trend, že přínos *HFMI* roste směrem k nižším amplitudám napětí. Na základě získaných výsledků byly sestrojeny Wöhlerovy křivky pro zkušební tělesa. Závislost rozkmitu napětí na počtu cyklů do poruchy (za definovaných podmínek) pro ocel S235JR ve stav s i bez aplikace technologie *HFMI* je zobrazena na *Obr. 41*.



Obr. 41 - Wöhlerovy křivky pro ocel S235JR

9.1.2. Hodnocení únavových zkoušek z oceli S460MC

Podmínky zatěžování pro jednotlivá zkušební tělesa z materiálu S460MC, společně s počtem cyklů do ukončení únavových zkoušek, jsou zobrazeny v Tab. 8. Značení zkušebních těles není z VT dále přenášeno a dáváno do vztahu se získanými výsledky, neboť sloužilo především pro jednoznačnou identifikaci zkušebních těles v případě předčasného lomu. K této situaci během životnostních zkoušek nedošlo.

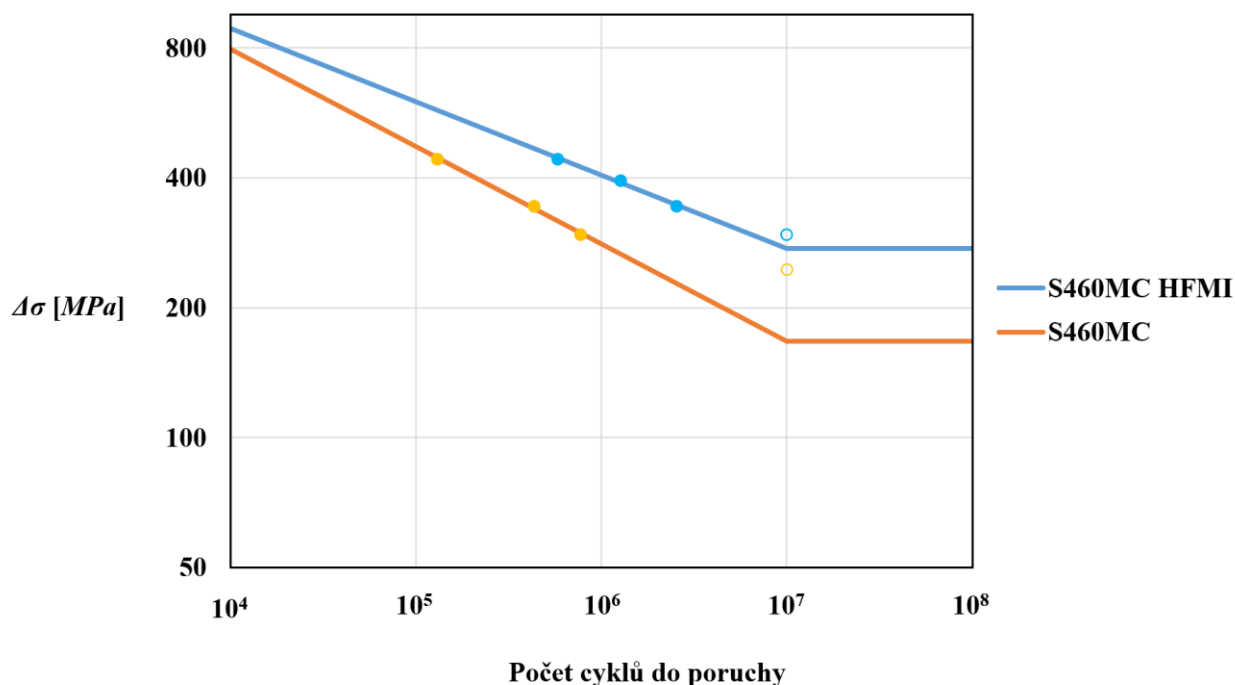
Pořadí zkoušek	Střední síla [kN]	Amplituda [kN]	Max. síla [kN]	Počet cyklů do lomu vzorku bez aplikace HFMI	Počet cyklů do lomu upraveného vzorku s aplikací HFMI	Poměrné zlepšení životnosti ve vztahu k počtu cyklů do porušení
1	4,6	4,4	9	131.000	581.000	4,5
5	4,1	3,9	8	Zk. nebyla provedena	1.270.000	-
2	3,6	3,4	7	434.000	2.550.000	5,9
3	3,1	2,9	6	775.000	10.000.000 Bez porušení	≥ 10
4	2,6	2,4	5	10.000.000 Bez porušení	Zk. nebyla provedena	-

Tab. 8 - Parametry únavových zkoušek pro ocel S460MC

Nejdříve byly provedeny zkoušky únavy za stejných zatěžovacích podmínek jako u oceli S235JR. U čtvrtého experimentu, který byl prováděn na zkušebním tělese bez aplikace technologie HFMI při střední síle 2,6 kN a amplitudě 2,4 kN došlo k dosažení 10^7 cyklů bez dosažení podmínky porušení. Z toho důvodu nebyl při stejných zatěžovacích podmínkách proveden experiment pro těleso s následným opracováním. Namísto toho byla únavová zkouška provedena při střední síle 4,1 kN a amplitudě 3,9 kN.

Ze získaných výsledků je patrné, že technologie *HFMI* měla u oceli S460MC příznivý vliv na únavové vlastnosti materiálu a že tento vliv byl oproti běžné konstrukční oceli větší. Oba trendy, které byly v minulé kapitole uvedeny, se zde projevují ve větší míře. Na základě získaných výsledků byly pro zkušební tělesa sestrojeny Wöhlerovy křivky.

Závislost rozkmitu napětí na počtu cyklů do poruchy (za definovaných podmínek) pro ocel S460MC ve stavu s i bez aplikace *HFMI*, je zobrazena na *Obr. 42*. Vzorky, u nichž k porušení nedošlo, jsou zobrazené pouze obrysem značky.



Obr. 42 - Wöhlerovy křivky pro ocel S460MC

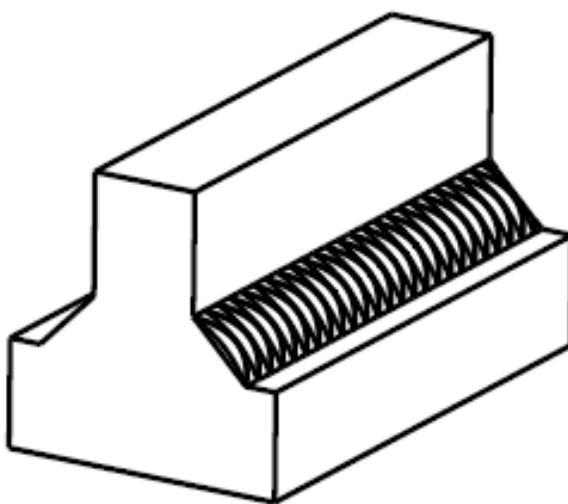
Únavová křivka materiálu bez aplikace *HFMI* je strmější a lze tedy říci, že přínos *HFMI* prokazatelně roste se snižujícím se rozkmitem napětí.

V poslední řadě není možné opomenout vliv materiálového faktoru, který se také během tohoto experimentu projevilo. Zkušební tělesa z oceli S460MC, i bez dodatečného opracování, dosahovaly napříč všemi vzorky z únavového hlediska lepších výsledků, než zkušební tělesa z oceli S235JR, u nichž byla technologie *HFMI* aplikována.

9.2. Únavové trhliny ve vztahu ke struktuře materiálu

Po únavových zkouškách byla rozřezána celkem čtyři zkušební tělesa mechanickou pilou s chlazením. V prvním kroku byly odříznuty dlouhé konce, které sloužily pouze k uchycení v únavovém standu, aby byla umožněna snazší manipulace se vzorky. V druhém kroku byly řezy vedeny středem základny ve směru namáhání. Výsledkem po vybroušení a vyleštění byla celkem čtyři tělesa, jejichž tvar je pro lepší představu zobrazen na *Obr. 43*, která byla určena pro pozorování pod mikroskopem a měření mikrotvrdosti. U všech metalografických vzorků byla struktura zviditelněna 1% roztokem Nitalu.

Ve vzorcích byly zastoupeny všechny zkoušené konfigurace. Jak ocel S235JR, tak i S460MC ve variantě bez úpravy *HFMI* i s ní. Mezi zkoumané vzorky bylo vybráno i jedno zkušební těleso z materiálu S460MC, u něhož nedošlo k ukončení životnostních zkoušek z důvodu dosažení podmínky porušení soudržnosti materiálu, nýbrž z důvodu dosažení 10^7 cyklů. U tohoto konkrétního vzorku bylo zkoumáno především kritické místo svaru, kde svar přechází do *ZM*, tzv. hranice ztavení na povrchu, odkud by se trhlina při vyšších amplitudách namáhání začala šířit.

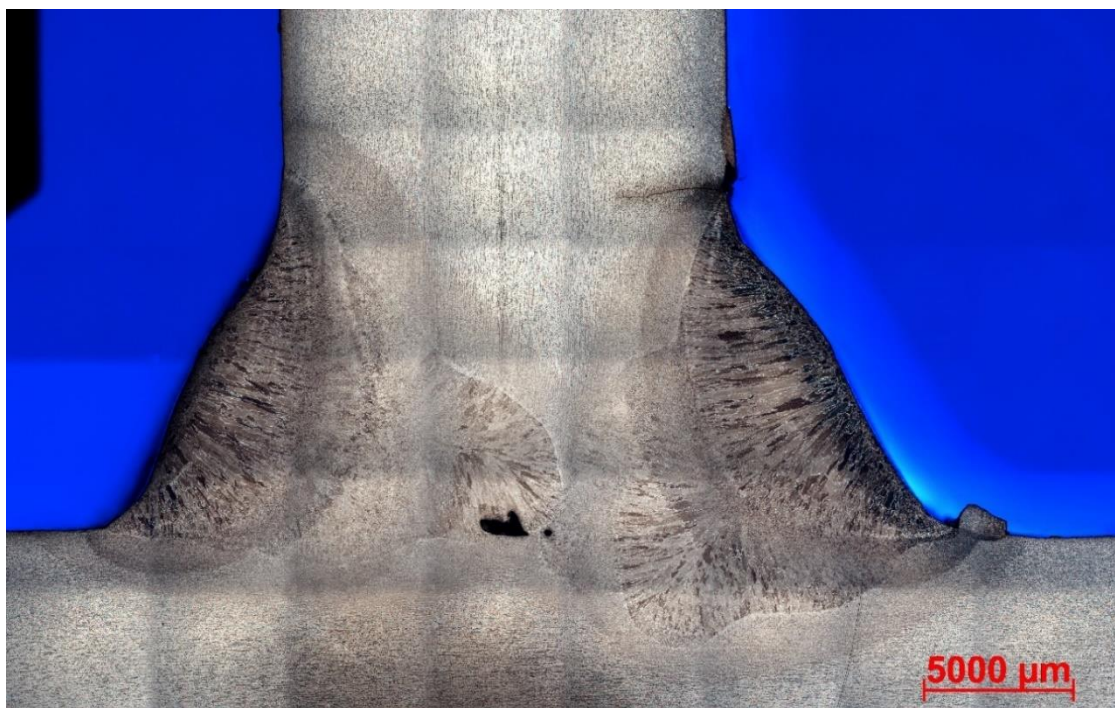


Obr. 43 - Geometrie tělesa pro mikroskopii

9.2.1. Hodnocení struktury a rozvoje trhlin u oceli S235JR

V oblastech, které jsou od svarového spoje vzdálené, je možné zpozorovat neovlivněnou homogenní feriticko-perlitickou strukturu oceli S235JR s vyřádkováním ve směru válcování. Z únavového hlediska jsou zajímavá zejména místa iniciace trhliny a směr jejího růstu. Z technologického hlediska je pak nutné pozorovat vliv aplikace *HFMI* na strukturu, stejně tak jako její vliv na místo iniciace trhliny.

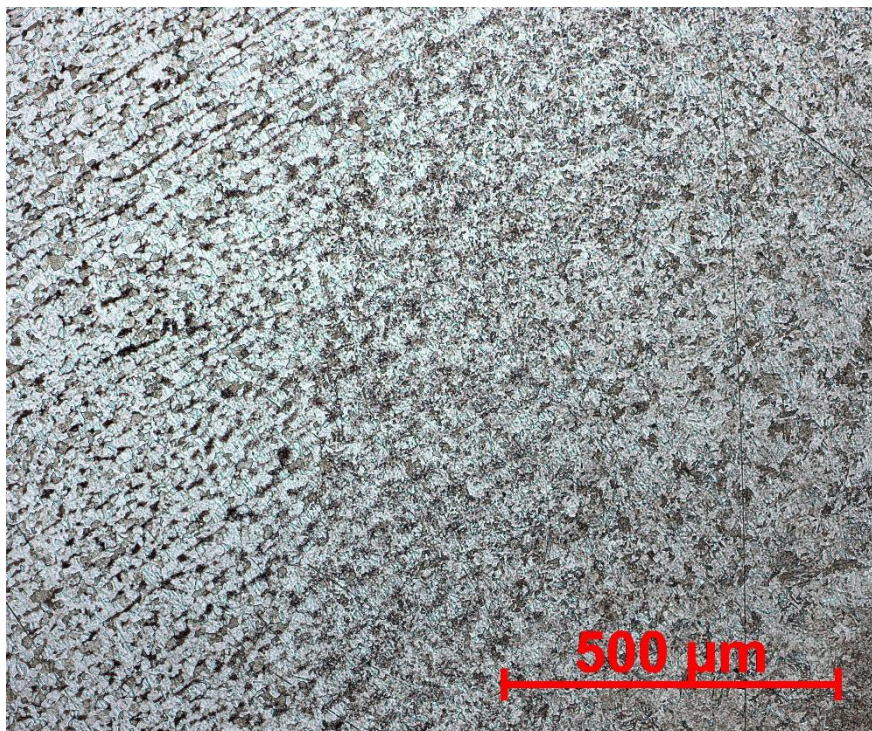
Na *Obr. 44* je zobrazen vzorek, který nebyl upravený pomocí technologie *HFMI*. U tohoto zkušebního tělesa, stejně jako u všech ostatních těles bez aplikace *HFMI*, došlo k iniciaci trhliny v místě koncentrace největšího napětí, na hranici ztavení. Hranice ztavení je u svarů místem, kde je materiál do jisté míry poškozen v důsledku vysokého teplotního gradientu během svařování a jím způsobeným teplotním šokem.



Obr. 44 - Výbrus S235JR bez HFMI (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 1 viz. Tab. 7)

Na *Obr. 44* je také vidět vada typu neprovařeného kořene a velká *TOO*, v níž jsou zrna oproti *ZM* hrubší a v důsledku teplotního režimu, kterým si materiál prošel, místy zaniká viditelné vyřádkování.

Detail popsané mikrostruktury v oblasti *TOO* je zobrazen na *Obr. 45*.



Obr. 45 – Detail *TOO* u výbrusu S235JR bez HFMI (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 1 viz. Tab. 7)

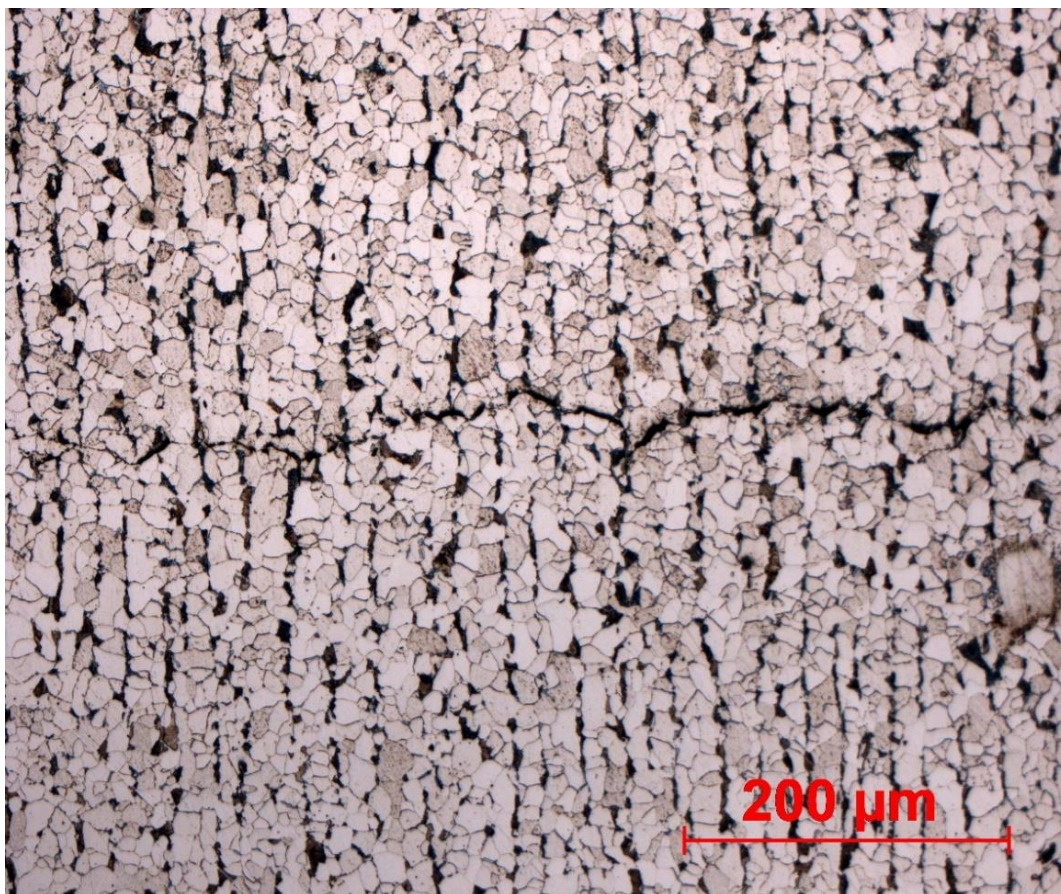
Na *Obr. 46* je možné vidět zvětšený pohled na samotnou trhlinu.



Obr. 46 - Výbrus S235JR bez HFMI, trhlinka (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 1 viz. Tab. 7)

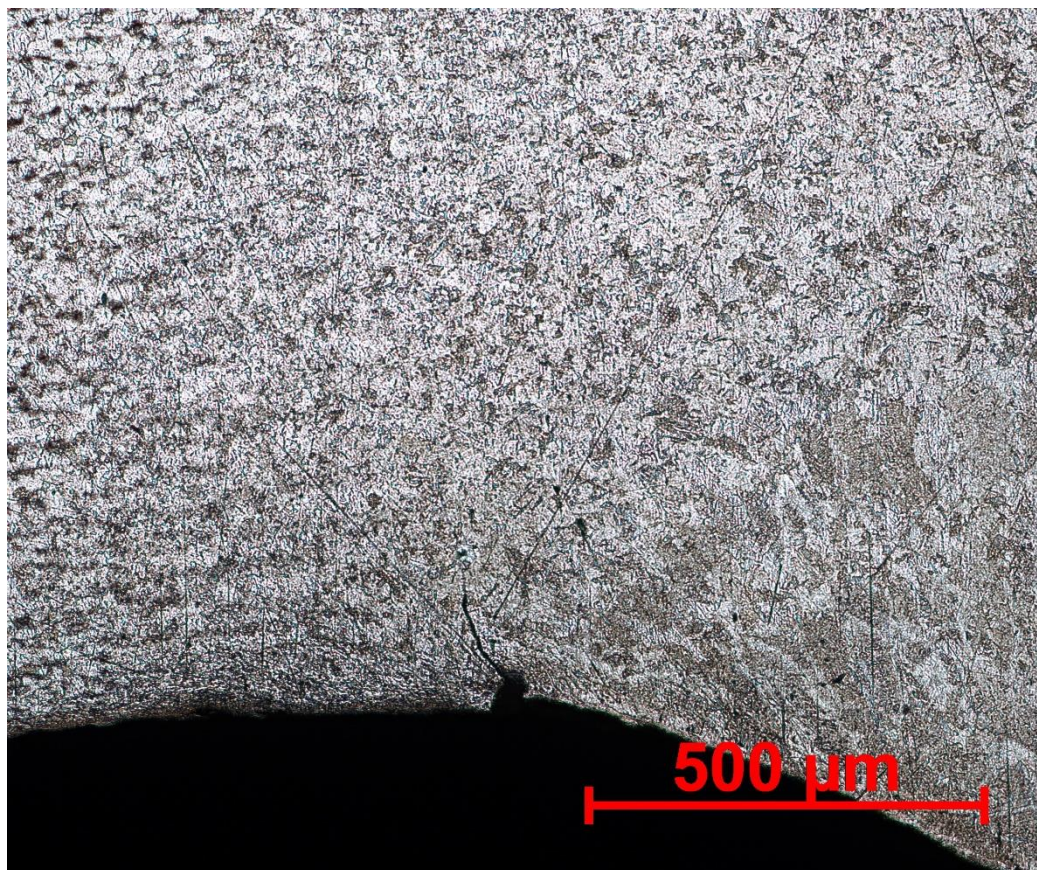
Tato trhlina vznikla v porovnání se všemi ostatními trhlinami nejrychleji, neboť se jedná o trhlinu v horším z obou zkoušených materiálů, která vznikla při nejvyšší zkoušené amplitudě 4,4 kN, což odpovídá napětí 216 MPa. Únavové zkoušky byly v tomto případě ukončeny při 42.000 cyklech. Díky rychlému šíření nestihlo dojít k výraznému obroušení hran v okolí trhliny, v důsledku jejího cyklického uzavírání a otevírání, a je tak možné pozorovat, jak se šířila napříč zkušebním tělesem.

Detail konce trhliny je zobrazen na *Obr. 47*, kde je mimo jiné pozorovatelná již vyřádkovaná mikrostruktura. Na základě dráhy, kterou se trhlina šíří (po hranicích zrn) je možné tvrdit, že se jejímu průběhu materiál, i navzdory ukončeným únavovým zkouškám, stále ještě bránil a její průběh byl stabilní.



Obr. 47 - S235JR, detail konce trhliny (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 1 viz. Tab. 7)

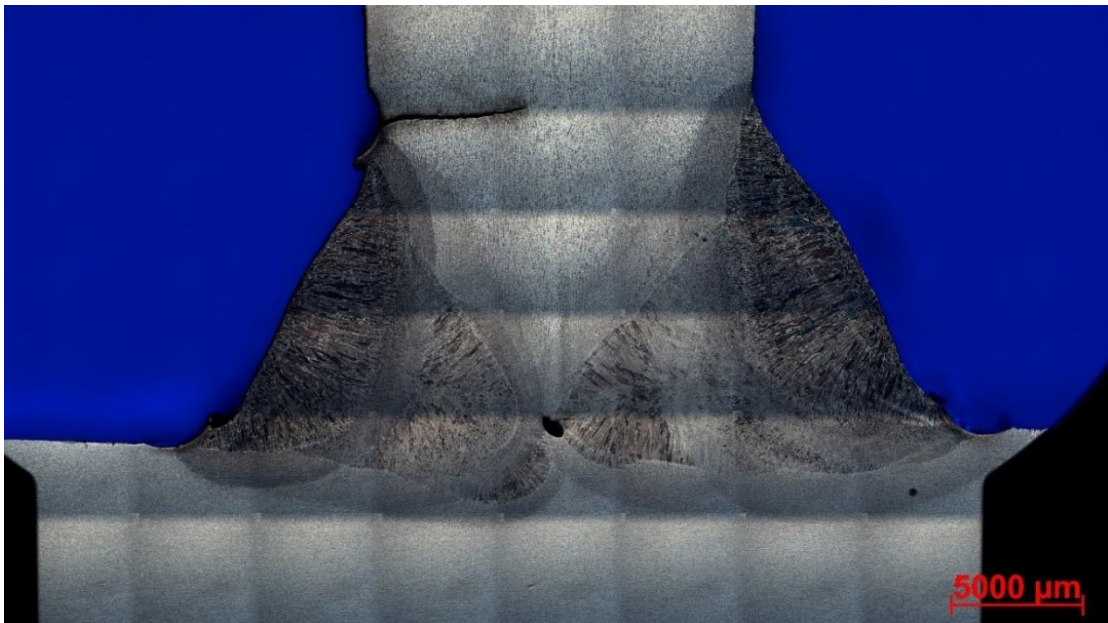
U druhého zkoušeného vzorku z oceli S235JR, který byl podroben stejným zatěžovacím podmínkám s rozdílem následného opracování technologií *HFMI*, se samotný svar ani mikrostruktura ve srovnání s předchozím případem příliš neliší. K rozdílům mezi vzorky dochází především ve vztahu k místu iniciace trhliny. Mikrostruktura zkoumaného vzorku v blízkosti povrchu je zobrazena na *Obr. 48*.



Obr. 48 - Detail deformované struktury v blízkosti povrchu u výbrusu S235JR s HFMI (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 1 viz. Tab. 7)

Aplikací *HFMI* v oblasti paty svaru zanikne místo přechodu svaru do *ZM* a zároveň se změní rozložení zbytkových napětí.

Makrosnímek vzorku z oceli S235JR s aplikací HFMI je zobrazený na Obr. 49.



Obr. 49 - Výbrus S235JR s aplikací HFMI (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 1 viz. Tab. 7)

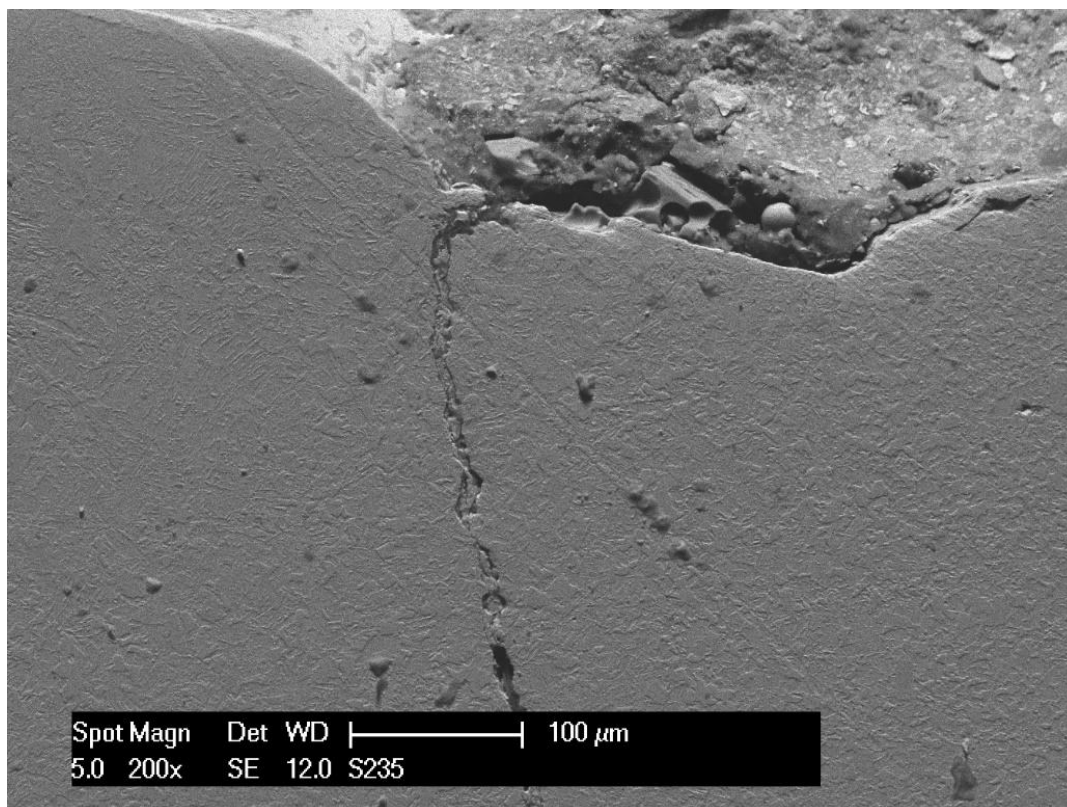
K iniciaci trhliny docházelo v průběhu zkoušek únavy u vzorků s aplikací HFMI ve středu kulové plochy vytvořené indentorem. Při pohledu na detail trhliny zobrazený na Obr. 50 je zřetelné, že se toto místo nenachází přesně na hranici přechodu svaru do ZM, nýbrž lehce nad ním. Střed kulové plochy je místem, kde indentor aplikační pistole pronikl do materiálu nejdále, a tudíž i místem, kde jsou plastické vlastnosti materiálu nejvíce vyčerpány. Navzdory příznivým tlakovým napětím se toto místo stává novým místem iniciace únavových trhlin.



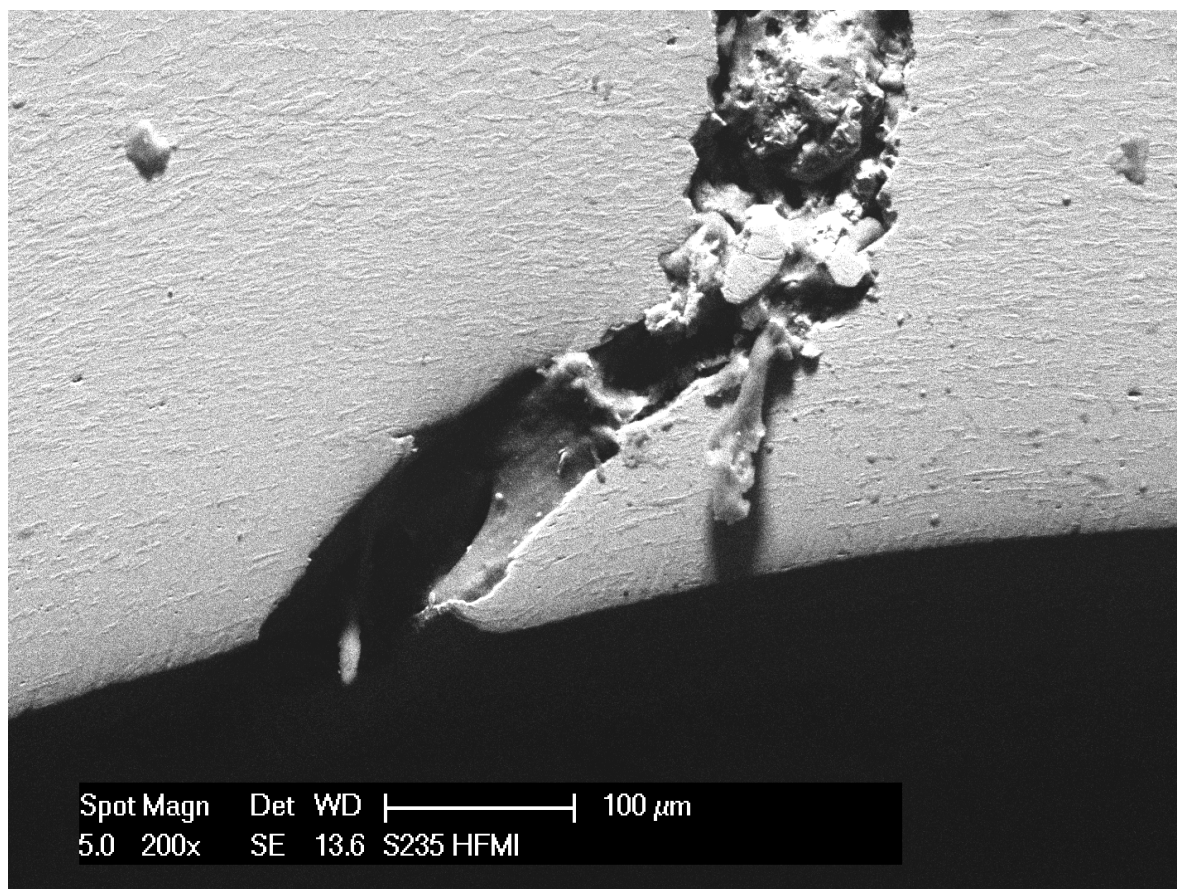
Obr. 50 - Výbrus S235JR s aplikací HFMI, trhlina (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 1 viz. Tab. 7)

Na zvětšeném detailu trhliny je viditelné, že prvotní směr jejího šíření vedl podél *PSP* pod úhlem 45° a až po dosažení určité velikosti (v tomto případě přibližně 1 mm), se trhlina šířila vůči směru hlavního namáhání kolmo. Zároveň je velmi dobře viditelné, zejména při porovnání s *Obr. 46*, jak došlo vlivem otevírání a uzavírání trhliny v důsledku většího počtu cyklů k obroušení jejích hran. Kudy se trhlina šíří ve vztahu ke struktuře je možné vidět pouze na jejím konci, kde se nachází plastická oblast.

Posledními zkoumanými oblastmi u zkušebních vzorků, byla místa iniciace trhlín. Pozorování oblastí takto malých rozměrů bylo dosaženo pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu. Zatímco u vzorku bez úpravy paty svaru metodou *HFMI* vzniká trhlina postupně (ačkoliv rychleji) a místo iniciace je výrazně plasticky deformované (viz *Obr. 51*), u vzorků, u nichž byla technologie *HFMI* aplikována, je porušení naopak štěpné (poškození křehkým lomem). Pro porušení vzorku s aplikací *HFMI* je zapotřebí mnohem více energie. Tato energie se následně uvolní z jednoho bodu a trhlina se začne šířit materiálem, dokud není nashromážděná energie v důsledku překonávání překážek spotřebována. Detailní pohled na místo iniciace trhliny u vzorku s aplikací *HFMI* je zobrazen na *Obr. 52*.



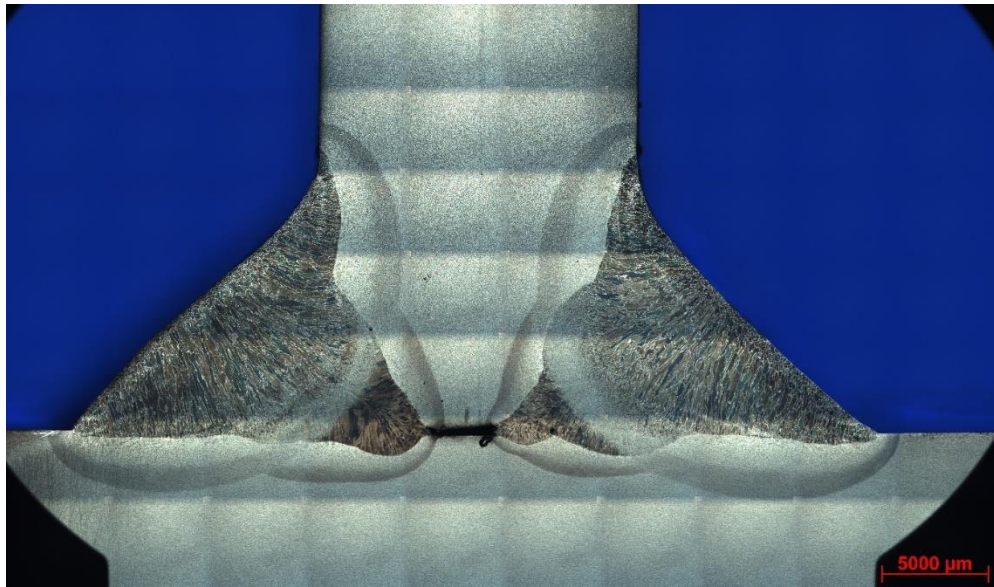
Obr. 51 - S235JR, místo iniciace trhliny (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 1 viz. Tab. 7)



Obr. 52 - S235JR HFMI, místo iniciace trhliny (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 1 viz. Tab. 7)

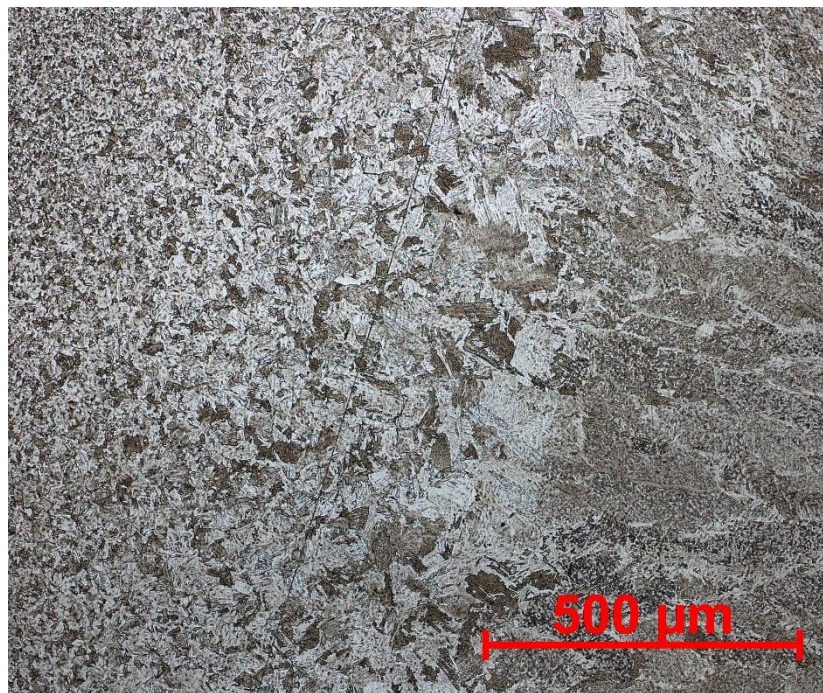
9.2.2. Hodnocení struktury a rozvoje trhlin u oceli S460MC

V oblastech, které jsou od svarového spoje vzdálené, je možné dobře zpozorovat neovlivněnou homogenní feriticko-perlitickou strukturu s jemnými karbidy. Struktura není, oproti předchozímu případu v důsledku výrobního postupu, popsáného v kapitole 4.1.2, vyřádkovaná. Dobře pozorovatelné je výrazné zhrubnutí mikrostruktury v *TOO*. Na *Obr. 53* je zobrazen vzorek, který nebyl upravený pomocí technologie *HFMI* a u kterého byly únavové zkoušky ukončeny po dosažení požadovaného počtu cyklů. Oblasti přechodu svaru do *ZM* budou blíže prozkoumány pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu s cílem zjistit, zdali již nedošlo k iniciaci mikrotrhliny, která by dále rostla a která ve světelném mikroskopu není vidět. Jedná se však pouze o jeden řez vzorkem a je nutné vzít v potaz, že k iniciaci již mohlo dojít na jiném místě.



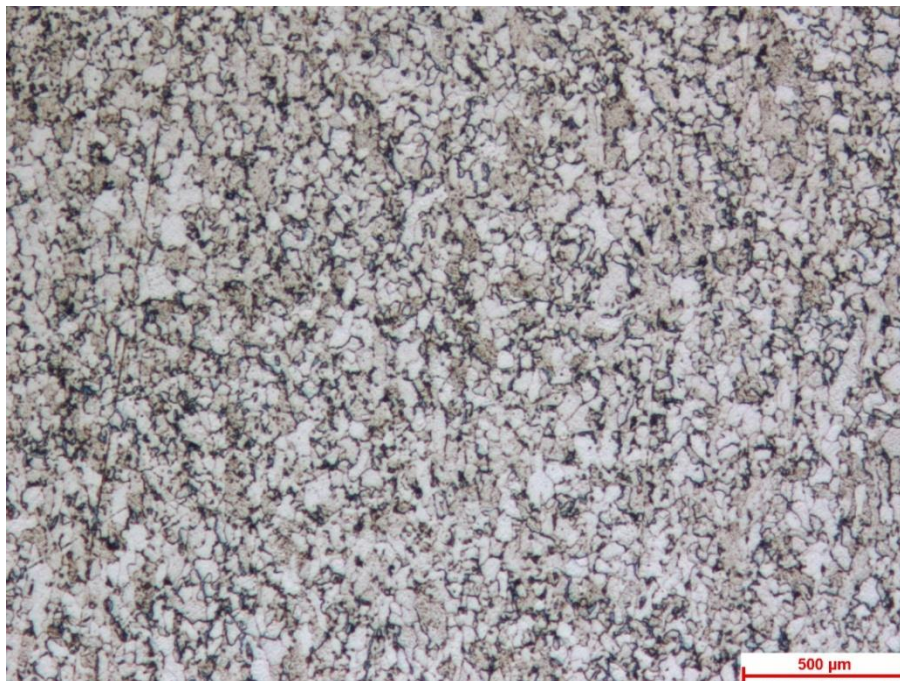
Obr. 53 - Výbrus S460MC bez HFMI (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 4 viz. Tab. 8)

Na Obr. 54 je zobrazena popsaná oblast přechodu svaru do ZM, v jejíž okolí je v důsledku vneseného tepla, ve srovnání s teplem neovlivněnými místy, velmi zhrublá mikrostruktura. Z důvodu větších zrn budou v této oblasti, stejně jako ve zbytku *TOO*, zhoršené mechanické vlastnosti.

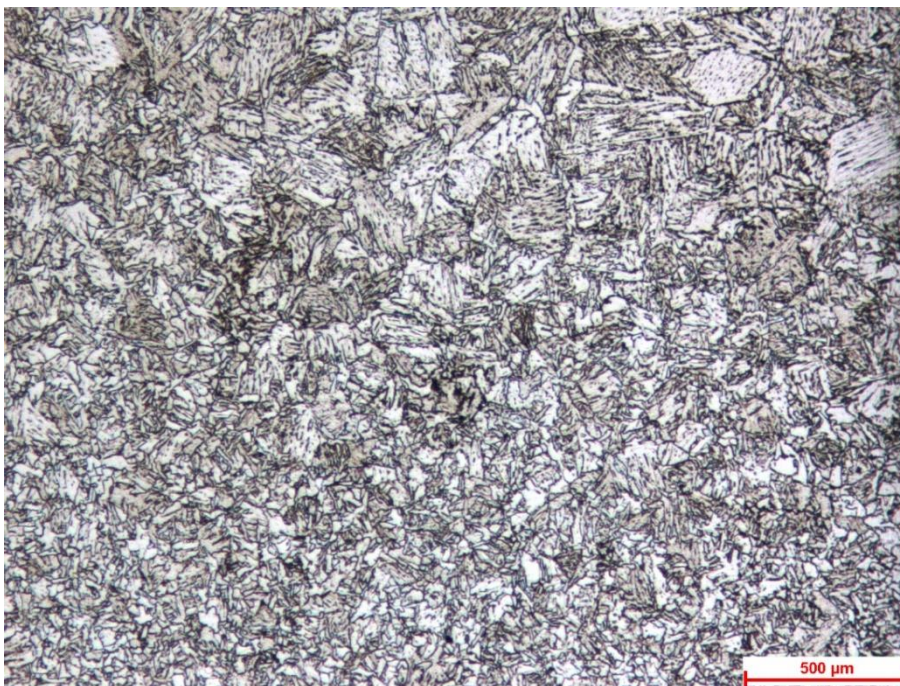


Obr. 54 - Detail oblasti přechodu svaru do ZM u oceli S460MC bez HFMI (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 4 viz. Tab. 8)

Pro lepší rozlišení jsou na *Obr. 55* a *Obr. 56* zobrazeny popsané mikrostruktury s větším zvětšením.

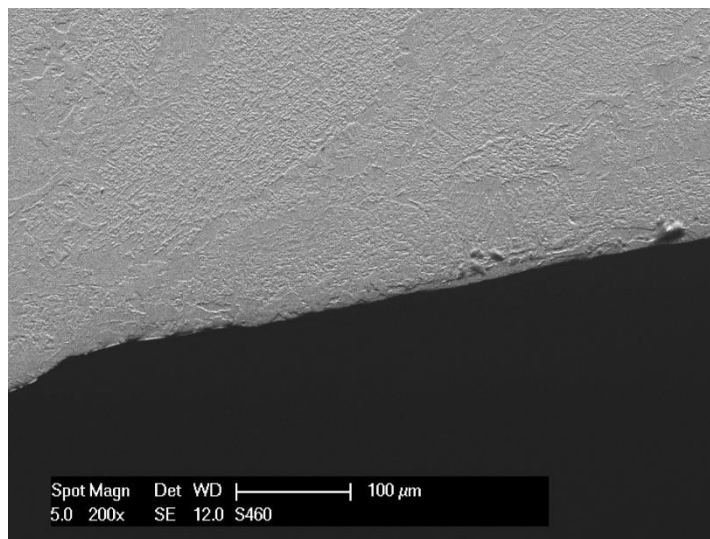


*Obr. 55 - S460MC, mikrostruktura neovlivněného materiálu
(střed zkušebního tělesa, zkouška č. 4 viz. Tab. 8)*



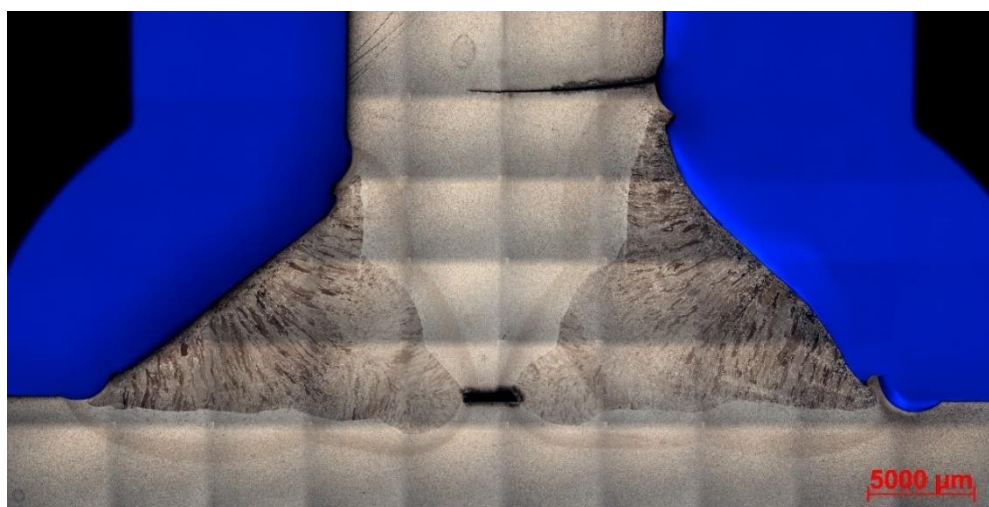
*Obr. 56 – S460MC, mikrostruktura TOO
(střed zkušebního tělesa, zkouška č. 4 viz. Tab. 8)*

Neporušený vzorek z oceli S460MC bez *HFMI* byl v kritické oblasti přechodu svaru do *ZM* důkladně prozkoumán pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu a žádný zárodek trhliny nebyl nalezen. Povrch v místě přechodu svaru do *ZM* ani jeho blízkém okolí nejevil žádné známky porušení, tak jako tomu je na *Obr. 57*.



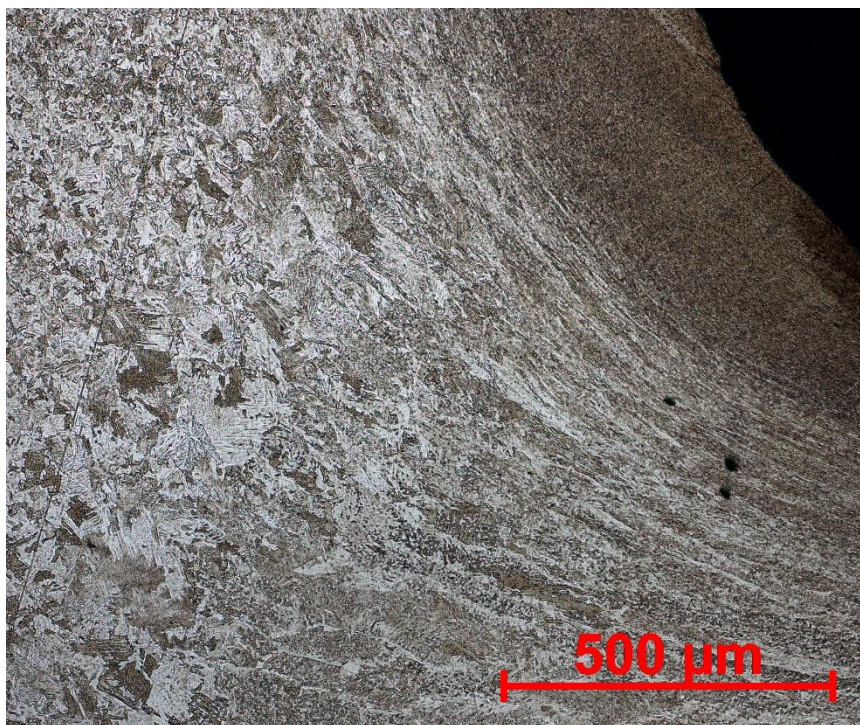
Obr. 57 - S460MC, místo přechodu svaru do ZM bez známek porušení (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 4 viz. Tab. 8)

Posledním vzorkem, u kterého byla zkoumána únavová trhлина, je zkušební těleso z oceli S460MC s úpravou pomocí *HFMI* zobrazené na *Obr. 58*. Na metalografickém výbrusu je opět velmi dobře viditelná hranice *TOO* a zejména deformace hranice ztavení na povrchu způsobená aplikací *HFMI*.



Obr. 58 - Výbrus S460MC s aplikací HFMI (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 5 viz. Tab. 8)

Detail deformované oblasti je zachycen na *Obr. 59*.



Obr. 59 - Detail deformované struktury v blízkosti povrchu u výbrusu S460 s HFMI (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 5 viz. Tab. 8)

K rozvoji trhliny došlo ze středu kulové plochy stejně, jako tomu bylo u vzorku z oceli S235JR a jak tomu má v případě vzorku bez významných defektů být.

Mezi vady, které jsou z řezu patrné na první pohled a byly zpozorovány i během VT, patří neprovařený kořen svaru a nesymetrie oboustranného koutového svaru, způsobena nedodržením rychlosti svařování.

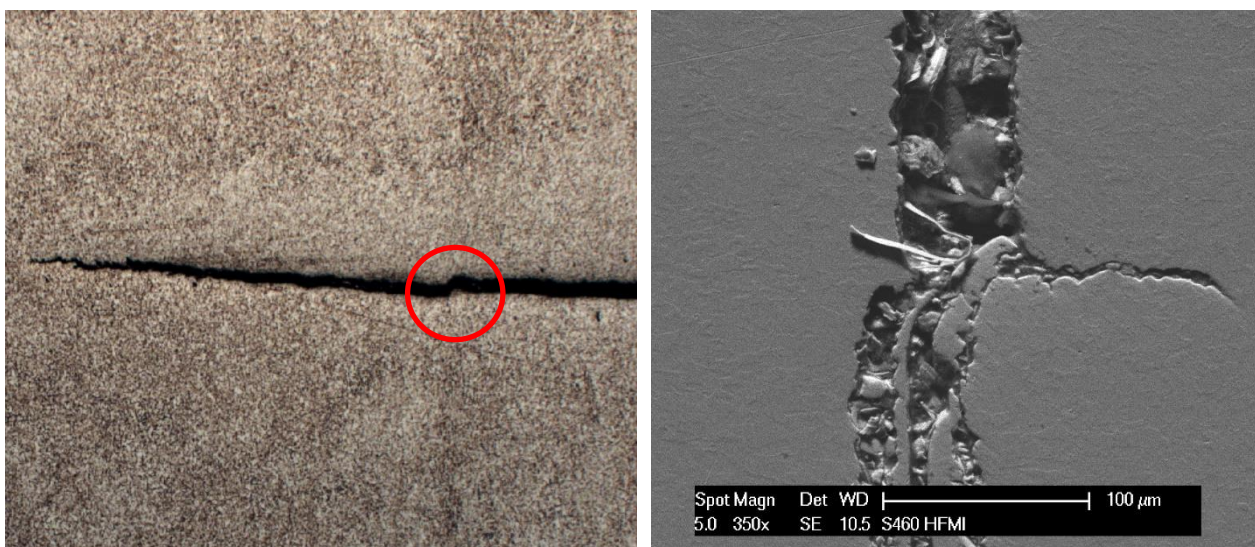
Na *Obr. 60* je možné zpozorovat detail trhliny vzniklé při amplitudě 4,1 kN, která odpovídá napětí 200 MPa v průběhu 1.270.000 cyklů. Při bližším zkoumání je možné jednoznačně vidět, že se trhlina dostala velmi hluboko do materiálu, než došlo k ukončení experimentu při porovnání s trhlinou ve vzorku z oceli S235JR s HFMI (viz *Obr. 50*) se tato jeví jako uzavřená a úzká. U horší z ocelí byla celá trhlina s výjimkou plastické zóny na jejím konci velmi rozevřená, zatímco v tomto případě dochází k viditelnému a postupnému zužování po překonání *TOO*, kde je její šířka největší. Na výrazném zužování směrem do materiálu se významně podílí právě jemnozrnná struktura zkoušené oceli, která se šíření trhliny brání. Dalším důkazem pomalého vývoje trhliny je dosažený počet cyklů do porušení.

Příznivý vliv *HFMI* roste s pevnostní ocelí, neboť vylepší životnost kritické oblasti přechodu svaru mechanickým odstraněním hlavního vrubu, při současném vnesení tlakových napětí do zhrublé struktury způsobené vneseným teplem. Dále se šíření trhliny brání již materiál svou vlastní mikrostrukturou a tento odpor přirozeně roste s rostoucí pevností.



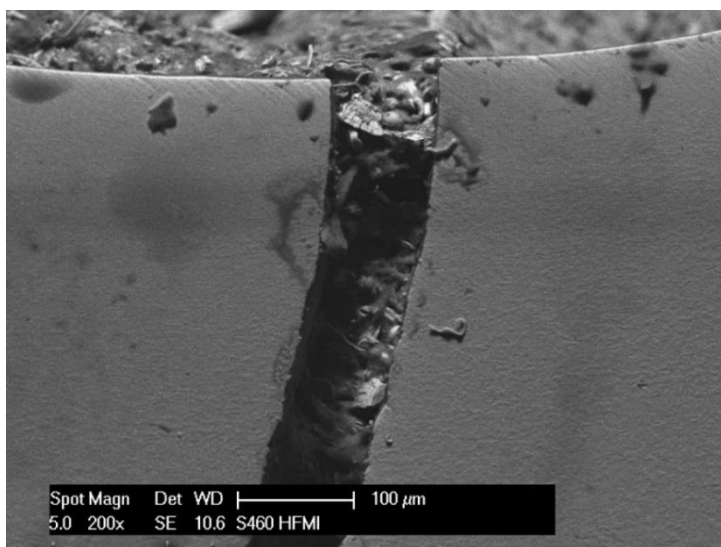
Obr. 60 - Výbrus S460MC s aplikací HFMI, trhlina; (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 5 viz. Tab. 8)

Z metalurgického hlediska je na trhlině dalším zajímavým bodem výrazný zlom, ke kterému došlo uprostřed plechu srážkou trhliny se segregáčním pásem karbidů zobrazeným na Obr. 61. Trhlina segregáční pás nemohla překonat jinak než skluzem a tento bod byl jedinou odchylkou od jejího jinak přímočarého šíření.



Obr. 61 - Změna směru šíření trhliny (vlevo), Detail zkoumaného místa (vpravo)
(střed zkušebního tělesa, zkouška č. 5 viz. Tab. 8)

K iniciaci trhliny došlo, jak je vidět na *Obr. 58*, ze středu kulové plochy. Detail tohoto místa byl zachycen řádkovacím elektronovým mikroskopem, viz *Obr. 62*. V místě iniciace nejsou vidět žádné důkazy toho, že se trhlina z počátku šířila podél *PSP* ani místa podél okrajů, která by indikovala změny v rychlosti jejího šíření.

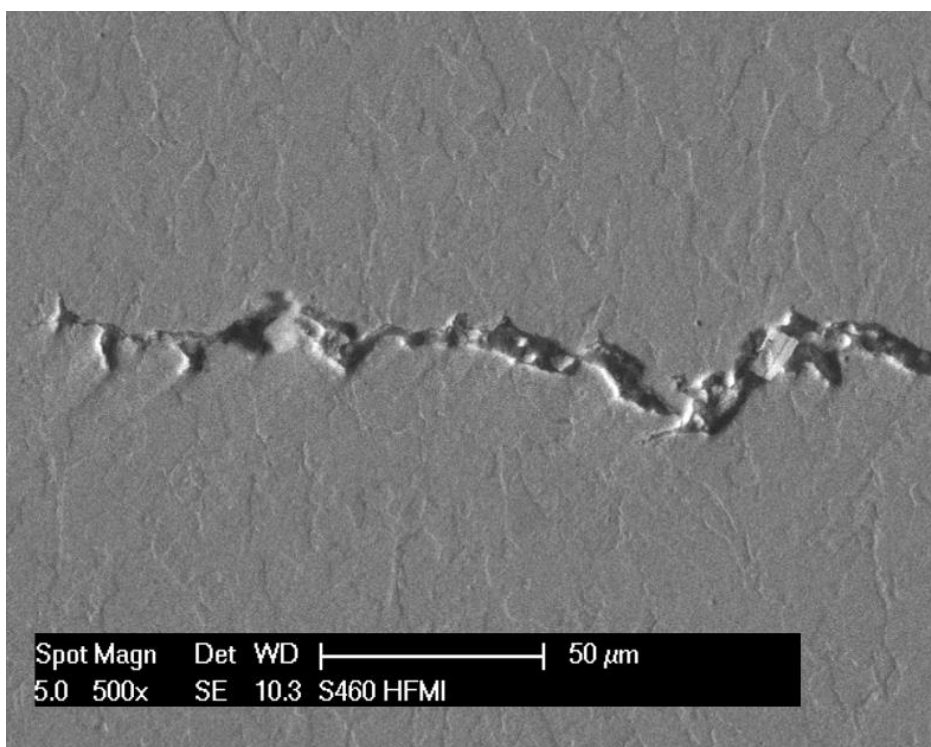


Obr. 62 - S460MC HFMI, místo iniciace trhliny (střed zkušebního tělesa, zkouška č. 5 viz. Tab. 8)

Plastická oblast na konci trhliny byla zachycena pomocí světelného i řádkovacího elektronového mikroskopu a je zobrazena na *Obr. 63* a *Obr. 64*. Na základě detailu šíření trhliny lze říci, že se stále ještě pohybujeme v oblasti stabilního růstu.



*Obr. 63 - S460MC HFMI, plastická oblast trhliny (světelný mikroskop)
(střed zkušebního tělesa, zkouška č. 5 viz. Tab. 8)*

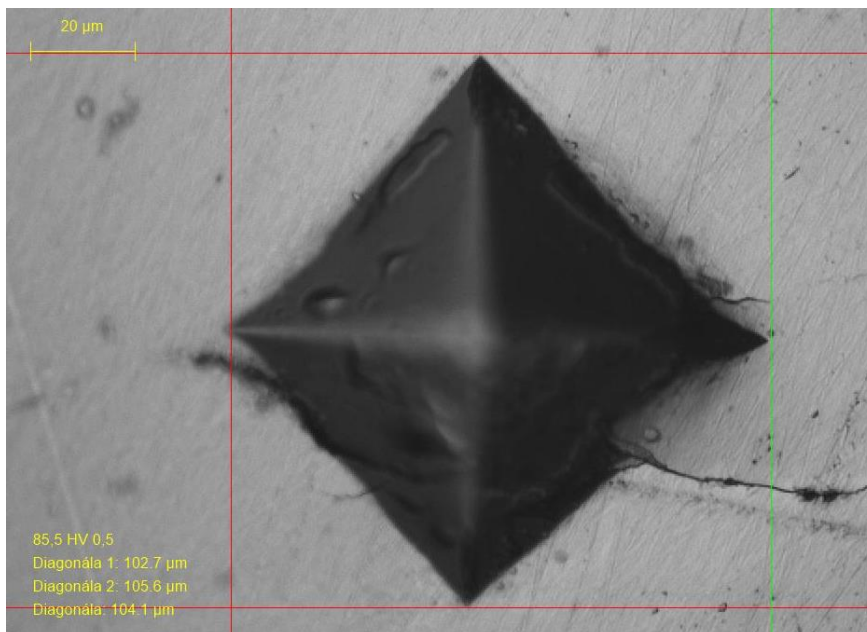


Obr. 64 - S460MC HFMI, plastická oblast trhliny (řádkovací elektronový mikroskop)
(střed zkušebního tělesa, zkouška č. 5 viz. Tab. 8)

10. Měření mikrotvrdomosti ve směru šíření trhliny

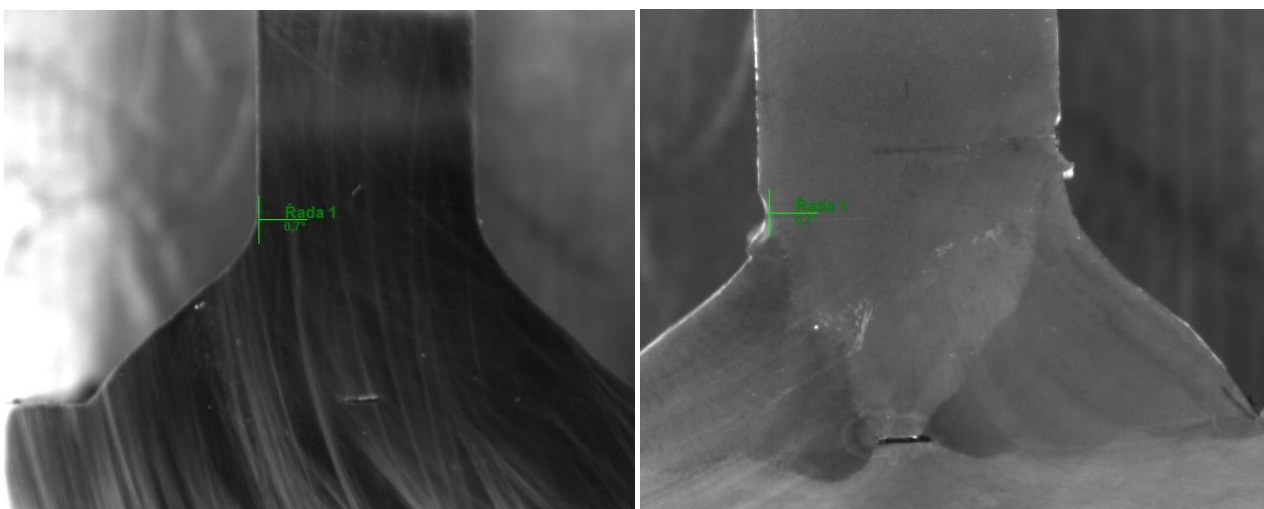
Metodou dle Vickerse (ČSN EN 65 07-1) byla u vzorků, na nichž byla provedena metalografie, měřena i mikrotvrdomost *HV01* podél trajektorie šíření trhliny. Cílem bylo zjistit vliv opracování *HFMI* na tvrdost materiálu, stejně tak jako určit hloubku, kam až zpevnění materiálu v důsledku mechanické deformace na povrchu sahá. Měření probíhalo při zatížení 0,98 N. Všechny vzorky byly před měřením vybroušeny, vyleštěny a zakonzervovány ethanolem.

U všech měřených bodů bylo zkontrolováno, zda výsledek není ovlivněn trhlinou vzniklou při měření. Na *Obr. 62* je možné pozorovat popsany případ vtisku se vzniklou trhlinou. V důsledku trhliny je naměřená hodnota tvrdosti v porovnání s tvrdostí okolí výrazně nižší a měřený bod proto nemá žádnou výpovědní hodnotu o skutečné tvrdosti materiálu.



Obr. 62 - Vtisk s trhlinou

Tvrдость byla u vzorků bez aplikace *HFMI* měřena od hranice ztavení a u vzorků s aplikací *HFMI* ze středu kulové plochy viz Obr. 63. V obou případech byl směr měření rovnoběžný se směrem šíření trhliny. U všech zkušebních těles byla mikrotvrдость *HV01* měřena do hloubky 6 mm. Vzdálenost prvních vtisků od okraje byla 80 μm. Rozteč mezi následujícími šesti vtisky byla 100 μm. Rozteč mezi zbylými vtisky byla 300 μm. Celkem bylo měřeno 26 bodů.

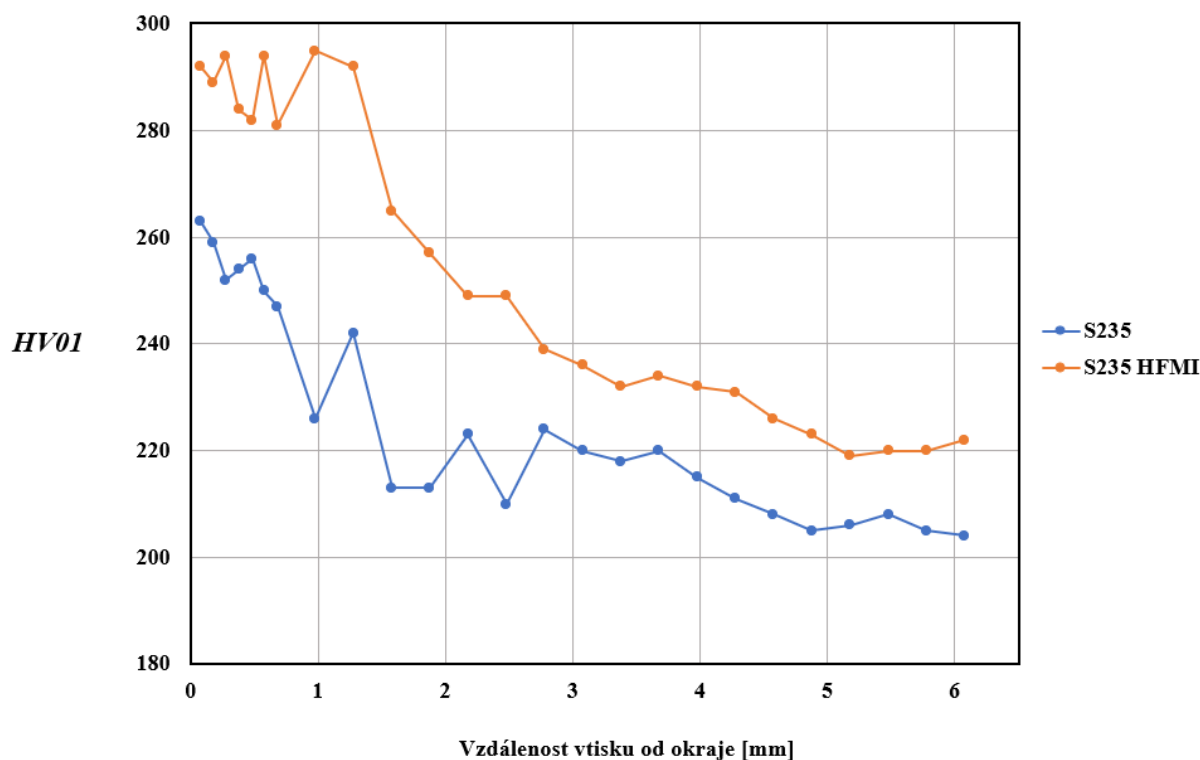


Obr. 63 – *HV01*, počátek a směr měření tvrdosti u vzorků s/bez aplikace *HFMI*

10.1. Mikrotvrdość *HV01* u vzorků z oceli S235JR

Nejdříve proběhlo měření na vzorku bez následné úpravy, poté na vzorku s úpravou *HFMI*. Výstupem měření bylo, že v důsledku *HFMI* byl zkoumaný materiál výrazně ovlivněn do hloubky přesahující 2,5 mm.

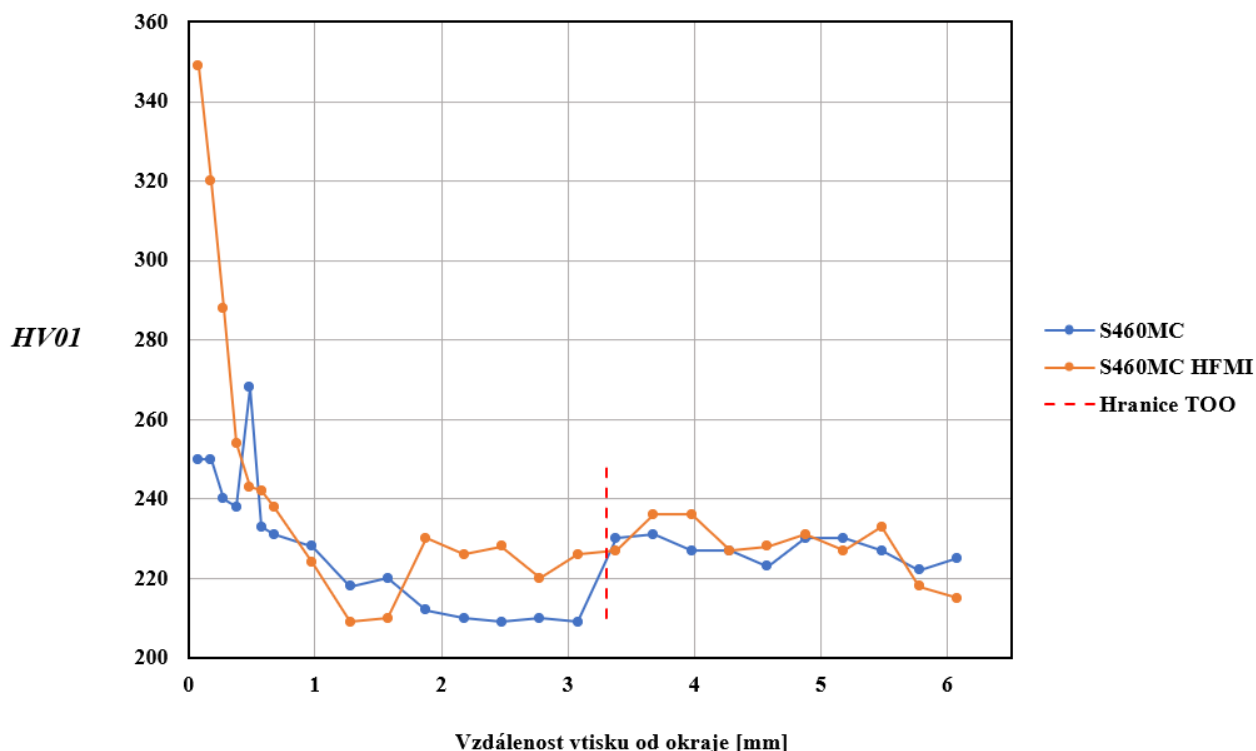
Ačkoliv jsou tlaková napětí zejména na povrchu žádoucí, zvýšená tvrdost celého průřezu plechu o menší tloušťce by mohla vést k náchylnosti na křehké a tím i hůře předvídatelné lomy. Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu pro ocel S235JR bez úpravy *HFMI* a s ní je zobrazen na *Obr. 64*. Ze získaných výsledků je patrné, že tvrdost u obou případů od povrchu směrem do materiálu klesá. Ačkoliv se v obou měřených případech hodnoty mikrotvrdości ve vzdálenosti přesahující 5 mm ustálily, vzorek s aplikací *HFMI* vykazuje vyšší tvrdost.



Obr. 64 - Graf závislosti průběhu mikrotvrdości *HV01* na vzdálenosti od povrchu pro ocel S235JR

10.2. Mikrotvrdost u vzorků z oceli S460MC

Výstupem měření mikrotvrdosti $HV01$ u vzorků z oceli S460MC bylo, že v důsledku $HFMI$ byl zkoumaný materiál ovlivněn do hloubky lehce přesahující 3 mm. Z grafu průběhů tvrdosti zobrazeného na Obr. 65 je zřetelné, že vzorek upravený $HFMI$ vykazuje vyšší tvrdost, tak, jak to je očekáváno. Zároveň je nutné vyzdvihnout společný trend, kdy nejdříve dochází k poklesu tvrdosti a následně k jejímu růstu až do bodu, kdy se měřené hodnoty ustálí. Aby bylo možné dát si tento trend do kontextu se vzorky, na kterých byla tvrdost měřena, byla pomocí světelného mikroskopu zjištěna vzdálenost od povrchu k hranici TOO a tato hranice byla následně zobrazena v řešeném grafu. Vliv $HFMI$ na tvrdost za hranicí TOO lze považovat za zanedbatelný. U vzorku bez aplikace $HFMI$ je průběh tvrdosti dán pouze vnitřní strukturou a stejně jako u oceli S235JR budou blízko hranice ztavení tvrdé struktury, zatímco uprostřed TOO bude nejhrubší struktura s nejmenší tvrdostí.



Obr. 65 - Graf závislosti průběhu mikrotvrdosti $HV01$ na vzdálenosti od povrchu pro ocel S460MC

11. Diskuse výsledků

Únavové zkoušky byly řízeny silově a probíhaly v rozmezí amplitud, které se postupně snižovaly od 4,4 kN až k 2,9 kN. Střední zatěžovací síla odpovídala napětí od 215 MPa do 142 MPa. Vzorky byly cyklicky zatěžovány v tahu s konstantní hodnotou minimální síly 0,2 kN (9,8 MPa). Jako kritérium ukončení zkoušek bylo bráno povolení materiálu o 5 mm ve směru namáhání. Pakliže k tomuto případu došlo, zkušební stand se automaticky zastavil. Následně byla provedena penetrační zkouška. Ve všech případech, kdy došlo k dosažení tohoto kritéria, byla odhalena trhlina v místě přechodu svaru do základního materiálu u vzorků bez aplikace HFMI, nebo v místě středu kulové plochy u vzorků s aplikací HFMI. Také je nutné zmínit, že u dvou vzorků z materiálu S460MC došlo k ukončení životnostních zkoušek po dosažení 10^7 cyklů, jakožto doporučené hranice neomezené životnosti. Únavové zkoušky jasně prokázaly pozitivní přínos technologie HFMI na životnost zkoušených vzorků z obou materiálů. Ze získaných výsledků plyne, že s rostoucí pevností oceli a s posunem k nižším namáháním, které jsou blíže oblasti neomezené životnosti, se zvyšuje příznivý efekt této technologie. Počet cyklů do dosažení kritéria ukončení únavových zkoušek se u oceli S235JR vlivem aplikace HFMI přibližně zdvojnásobil, zatímco u oceli S460MC došlo při největší amplitudě, a tudíž nejmenšímu stupni přínosu, k jeho zčtyřnásobení.

Únavové trhliny byly po zkouškách zkoumány pomocí světelného a řádkovacího elektronového mikroskopu. U všech vzorků bez úpravy HFMI docházelo k iniciaci trhlín v místě hranice ztavení, kde svar přechází do základního materiálu. U vzorků, které byly metodou HFMI upraveny, docházelo k iniciaci uprostřed kulové plochy, kde byly v důsledku úpravy indentorem nejvíce vyčerpány plastické vlastnosti materiálu. Zároveň bylo zpozorováno, že v případě vzorků bez aplikace HFMI se trhlina z počátku šířila ve směru skluzových rovin, zatímco u vzorků, u nichž byla technologie HFMI použita, je tato oblast buď nepatrná, nebo nevznikla a trhlina se šíří pouze kolmo na směr hlavního namáhání.

Aby bylo možné určit, do jaké hloubky materiálu technologie HFMI ovlivňuje vnitřní strukturu, bylo provedeno měření mikrotvrdosti HV01 ve směru šíření trhliny. Z průběhů naměřených tvrdostí plyne, že aplikace HFMI výrazně ovlivňuje tvrdost jak blízko povrchu, tak i v oblasti TOO, kde jejím vlivem dochází ke zpevňování hrubozrnné struktury. Za hranicí TOO, která byla naměřena ve vzdálenosti 3,3 mm, je již vliv technologie HFMI zanedbatelný.

12. Závěr

Cílem diplomové práce bylo posoudit vhodnost použití metody *HFMI* pro zlepšení únavových vlastností svarových spojů vysokopevných ocelí. Pro tuto zkoušku byla jako zástupce vysokopevných ocelí zvolena termomechanicky zpracovaná ocel S460MC o tloušťce plechu 15 mm. Společně s ocelí S460MC byly stejné zkoušky prováděny současně na běžně používané konstrukční oceli S235JR, u níž nebyl očekávaný velký přínos technologie *HFMI*, neboť je tato metoda doporučována výhradně pro oceli vyšších mezí pevnosti. Zkušební tělesa byla svařena pomocí oboustranného koutového svaru o velikosti a_8 metodou MAG v ochranné atmosféře Stargon C18.

Svařené vzorky byly před únavovými zkouškami podrobeny vizuální kontrole a prozařovací zkoušce *RT*, aby bylo zajištěno, že výsledky experimentu nebudou zásadně ovlivněny chybami vzniklými při přípravě zkušebních těles. Zkoušky únavy dokázaly výrazný přínos aplikace *HFMI* u oceli S460MC i u oceli S235JR. Diplomová práce úspěšně potvrzuje a vysvětluje mechanismy, jimiž technologie *HFMI* prokazatelně zlepšuje únavovou odolnost svařovaných konstrukcí z vysokopevnostních ocelí, jakožto možné náhrady konvenčně používaných materiálů. Cíl této práce tak byl splněn.

13. Bibliografie

- [1] **MARQUIS, G. B.; BARSOUM, Z.;** *IIW Recommendations for the HFMI Treatment*. Springer Singapore, 2016. 978-981-10-2503-7.
- [2] **BRTNÍK, T.; MIKA, I.;** *Zvyšování únavové životnosti svarů vysokopevnostních ocelí metodou HFMI*. [Online] 23. 6. 2016;
<http://old.konstrukce.cz/clanek/zvysovani-unavove-zivotnosti-svaru-vysokopevnostnich-oceli-metodou-hfmi/>
- [3] **Škoda Transportation.** *O nás*. [Online] 21. 10. 2021;
<https://www.skoda.cz/stranka/o-nas>
- [4] **Hospodářské noviny.** *Škoda Dopravní technika jde do Ruska*. [Online] 21. 10. 2021;
<https://archiv.hn.cz/c1-940493-skoda-dopravni-technika-jde-do-ruska>
- [5] **ČT24.** *Tramvaje pro Prahu jsou kompletní*. [Online] 21. 10. 2021;
<https://ct24.ceskatelevize.cz/regiony/2732423-tramvaje-pro-prahu-jsou-kompletni-nejdrazsi-nejporuchovejsi-nebo-jen-takove-jake-je>
- [6] **OLIVOVÁ, J.;** *Únava bez katastrof*. Věda a výzkum. 2019, 1.
- [7] **KROMPOLC, T.;** *Strhující příběh de Havilland Comet: letadlo, které změnilo svět*. [Online] 15. 8. 2021; [Citace: 4. 11. 2021] <https://smartmania.cz/strhujici-pribeh-de-havilland-comet-letadlo-ktere-zmenilo-svet/>
- [8] **PLUHAŘ, J.; KORITTA, J.;** *Strojírenské materiály*. SNTL, Praha, 1982.
- [9] **SKÁLOVÁ, J.;** *Základní zkoušky kovových materiálů*. ZČU v Plzni, 2005.
- [10] **KOVAŘÍK, R.; ČERNÝ, F.;** *Technologie svařování*. ZČU v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
- [11] **Total Materia.** *Fatigue of Metals: Part One*. [Online] 12. 2004; [Citace: 6. 11. 2021] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=142>
- [12] **BENEŠ, P.;** *Únava materiálu*. KMM/ZDM, 2021.

- [13] **VĚCHET, S.; KOHOUT, J.; BORŮVKA, O.;** *Únavové vlastnosti tvárné litiny.* Žilina : EDIS, 2002. ISBN 80-7100-973-3.
- [14] **ŠIDLOF, P.;** *Únavové poškození konstrukce při časově proměnlivém zatížení.* [Online] [Citace: 5. 2. 2022]
[https://astra.nti.tul.cz/~petr.sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20\(cesky\)/9_lekce_Unava_071104_AnP.pdf](https://astra.nti.tul.cz/~petr.sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20(cesky)/9_lekce_Unava_071104_AnP.pdf)
- [15] **ZAPLETAL, J.;** *Doktorská práce: Nízkocyklové a vysokocyklové únavové vlastnosti ADI.* [Online] 2011; [Citace: 5. 2. 2022] <https://adoc.pub/nizkocyklove-a-vysokocyklove-unavove-vlastnosti-adi-low-cycl.html>
- [16] **OTŘÍŠAL, J.;** *Diplomová práce - Stanovení vlivu cyklického namáhání na sekundární vznik trhliny.* [Online] 2018; [Citace: 6. 2. 2022]
https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/152188/DP_Jan_Otrisal.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [17] **TERENT'EV, V.F.;** *On the Problem of the Fatigue Limit of Metallic Materials.* [Online] 5. 2004; [Citace: 15. 11. 2021]
<https://link.springer.com/article/10.1023/B:MSAT.0000043111.07884.3b#/page-1>
- [18] **HELLER, P.; DOSTÁL, J.;** *Kolejová vozidla II.* ZČU v Plzni, 2009.
- [19] **ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K.; KRISTOFER, S. J.;** *Micro-Electrostatic Vibration-to-Electricity Converters.* Conference: ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2002.
- [20] **PITEC GmbH.** *Pneumatic Impact Treatment.* [Online] [Citace: 11. 5. 2022]
https://www.pieper-qi.nl/articles/PIT_onderhoud_UK.pdf
- [21] **Scandinavia, HiFIT.** *The technology.* [Online] [Citace: 14. 10. 2021] <https://hifit.se>
- [22] **Gamalux.** *Penetrační zkouška (PT).* [Online] [Citace: 2. 11. 2021]
<https://www.gamalux.cz/pouzivane-metody/penetracni-zkouska/>
- [23] **MUSIL, M.;** *Nová norma ČSN EN ISO 5817.* [Online] 5. 9. 2014; [Citace: 22. 12. 2021] <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=464>

- [24] **International Institute of Welding.** [Online] [Citace: 22. 12. 2021]
<https://www.efatigue.com/welds/background/iiw.html>.
- [25] **LEITNER, M.; GERSTBREIN, S.; OTTERSBOECK, M.J.; STOSCHKA, M.;**
Fatigue strength of HFMI-treated high-strength steel joints under constant and variable amplitude block loading. [Online] 2015; [Citace: 23. 12. 2021.]
<https://cyberleninka.org/article/n/197292>
- [26] **ASM.** *Vysoce pevné mikrolegované oceli.* [Online] [Citace: 16. 11. 2021]
<https://www.opi.zcu.cz/hsla.pdf>
- [27] **LOUDA, P.;** *Materiály II.* [Online] [Citace: 18. 11. 2021]
<http://www.kmt.tul.cz/kestaz/Oceli.pdf>
- [28] **GORNI, A.; MEI, P. R.;** *Effect of controlled-rolling parameters on the ageing response of HSLA-80 steel.* [Online] 8. 2006; [Citace: 18. 11. 2021]
https://www.researchgate.net/publication/222560047_Effect_of_controlled-rolling_parameters_on_the_ageing_response_of_HSLA-80_steel
- [29] **KOTAS, M.;** *Řízené válcování vybraných značek oceli v podmínkách kontijemné válcovny Třineckých železáren, a.s.* [Online] 2010; [Citace: 22. 11. 2021]
<http://dspace.vsb.cz/handle/10084/83495>
- [30] **JARÝ, M.;** *Výpočtové modelování procesu svařování a tepelného zpracování ocelí s využitím elasto-viskoplastického modelu materiálu.* [Online] 2013; [Citace: 3. 10. 2021] https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69879
- [31] **PILIPENKO, A.;** *Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding.* [Online] 7. 2001; [Citace: 28. 11. 2021] https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/231322/126204_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [32] **BBolzano.** *Přehled vlastností oceli S235JRJ2G3.* [Online] [Citace: 13. 2. 2022]
<https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-S235JRjdrive-S235JRjrg2>

- [33] **ČVUT.** *Ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena.* [Online] [Citace: 13. 2. 2022]
<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84823/F2-BP-2019-Spernak-Michal-priloha-Priloha%202.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [34] **Dillinger.** *Weldable fine grained structural steel, thermomechanically rolled.* [Online] [Citace: 13. 2. 2022] <https://www.dillinger.de/d/downloads/download/7259>
- [35] **ESAB.** *Weld G3Si1.* [Online] [Citace: 11. 5. 2022]
<https://www.esab.co.uk/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/weld-g3si1.cfm>
- [36] **ESAB.** *Výběr nejpoužívanějších typů svařovacích materiálů.* [Online] [Citace: 11. 5. 2022] https://www.vnt-svarovani.eu/PDF/Vyber_2017%20Czech_small.pdf
- [37] **KEPKA, M.;** *Zkušební stend pro zkoušky konstrukčních uzlů s koutovými svary.* [Online] 2020; [Citace: 20. 2. 2022]
http://www.rti.zcu.cz/export/sites/rti/spoluprace/Aplikovane_vystupy/2020/FV0026.pdf
- [38] **LEE, J.-M.; SEO, J.-K.;** *Comparison of hot spot stress evaluation methods for welded structures.* [Online] 16. 3. 2016; [Citace: 28. 4. 2022]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2092678216302497>
- [39] **Progress Rail Services Corporation.** *Ultrasonic impact technology.* [Online] [Citace: 14. 10. 2021]
<https://www.progressrail.com/en/Segments/RailTechnology/UIT.html#>
- [40] **Inmotion Technology Distribution.** *The HiFIT device.* [Online] [Citace: 14. 10. 2021]
https://www.inmotion.global/wp-content/uploads/2018/06/HiFIT_Broschuere_01_18_en.pdf
- [41] **Sintes.** *Technology and Equipment for Ultrasonic Impact Treatment (UIT/UP).* [Online] 14. 10. 2021; <http://www.sintes.ca/Ultrasonic-Impact-Treatment.php>
- [42] **Totalmateria.** *Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM): Part Two.* [Online] 12. 2010. [Citace: 10. 11. 2021]
<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=299>

- [43] **MIČKA, J.;** *Únavová životnost ocelových vzorků při axiálním, torzním a kombinovaném axiálně-torzním namáhání.* [Online] 2016; [Citace: 11. 11. 2021] https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127255
- [44] **Bombardier.** *Bombardier Presents the First Carbody of the Regio 2N 16 Months after the SNCF Placed an Order on Behalf of the French Regions.* [Online] 28. 6. 2011; [Citace: 15. 11. 2021] <https://bombardier.com/en/media/news/bombardier-presents-first-carbody-regio-2n-16-months-after-sncf-placed-order-behalf>
- [45] **Bart.** *Behind the scenes, BART's new train cars undergo extensive testing for safety, reliability.* [Online] 17. 6. 2015; [Citace: 15. 11. 2021] <https://www.bart.gov/news/articles/2015/news20150617-1>
- [46] **PODANÝ, P.;** *Disertační práce - Vývoj technologie kování a tepelného zpracování mikrolegované oceli.* Plzeň, 2010

14. Seznam obrázků

Obr. 1 - Logo Škoda Transportation a.s. [3].....	14
Obr. 2 - Letoun "de Havilland Comet 1" (vlevo) s únavovou trhlinou (vpravo) [7].....	15
Obr. 3 - Hysterézní křivky závislosti napětí σ na deformaci ε [12]	18
Obr. 4 - Mikrorelief zachycující prokluz [12]	19
Obr. 5 a) - Šíření únavové trhliny materiálem [12]	20
Obr. 5 b) - Detailní pohled na konec trhliny [12]	20
Obr. 6 - Lomová plocha únavově porušení součásti [42].....	22
Obr. 7 - Wöhlerova křivka únavové životnosti [14].....	23
Obr. 8 - Rozdělení různých způsobů zlepšení životnosti svarového spoje [1].....	26
Obr. 9 a) - Magnetostrikční aplikační pistole od výrobce Progress Rail [39].....	28
Obr. 9 b) - Aplikační pistole od výrobce HiFIT Scandinavia [21].....	28
Obr. 9 c) - Popis jednotlivých částí pistole z Obr. 9 b) [40].....	28
Obr. 10 - Různé typy a konfigurace indentorů [41]	29

Obr. 11 - Riziko vzniku trhliny [1].....	30
Obr. 12 - Pozice indentoru vůči svaru v průběhu opracování [1]	31
Obr. 13 - Porovnání správně (vlevo) a špatně (vpravo) opracované oblasti [1].....	32
Obr. 14 - Významné parametry stopy vytvořené aplikací HFMI na patu svaru [1].....	33
Obr. 15 - Svary, u nichž aplikací HFMI nedojde ke zvýšení životnosti.....	34
Obr. 16 - S-N křivky svarových spojů s HFMI pro oceli s mezí kluzu do 355 MPa [1]	35
Obr. 17 - Skříň vozidla Bombardier Regio 2N (vlevo) a BART (vpravo) [44; 45]	37
Obr. 18 - Závislost rozpustnosti precipitátů NbC, TiC a Vn na obsahu uhlíku v oceli. [46] ...	39
Obr. 19 - Schéma teplotního průběhu termomechanického zpracování.....	40
Obr. 20 - Průběhy teplotní a transformační napjatosti [30].....	43
Obr. 21 - Schématické znázornění vývoje zbytkových napětí v průběhu svařování [30].....	44
Obr. 22 – Upnutí před svařováním a bodové svařování	48
Obr. 23 – Kořenová vrstva svaru.....	48
Obr. 24 - Konečný tvar svařence před rozřezáním na zkušební tělesa.....	49
Obr. 25 – Řezání svařence na jednotlivá zkušební tělesa.....	49
Obr. 26 - Tvar a rozměry zkušebních těles.....	50
Obr. 27 - Měření teploty interpassu.....	52
Obr. 28 - Měření teploty krycí housenky po dokončení svaru	52
Obr. 29 - Poloha vzorků během RT.....	53
Obr. 30 - Zkušební těleso č. 1.....	54
Obr. 31 - Zkušební těleso č. 1*	55
Obr. 32 - Zkušební těleso č. 2.....	55
Obr. 33 - Zkušební těleso č. 2*	56
Obr. 34 - Zkušební těleso č. 3.....	57
Obr. 35 - Zkušební těleso č. 3*	57

Obr. 36 - Zkušební těleso č. 4.....	58
Obr. 37 - Zkušební těleso č. 4*.....	58
Obr. 38 - Detailní pohled na okraj stopy u zkušebního tělesa č. 4*	59
Obr. 39 – Uchycení zkušebního tělesa na standu [37]	60
Obr. 40 - Hot-spot napětí u koutového svaru	62
Obr. 41 - Wöhlerovy křivky pro ocel S235JR.....	63
Obr. 42 - Wöhlerovy křivky pro ocel S460MC.....	65
Obr. 43 - Geometrie tělesa pro mikroskopii	66
Obr. 44 - Výbrus S235JR bez HFMI.....	67
Obr. 45 - Detail TOO u výbrusu S235JR bez HFMI.....	68
Obr. 46 - Výbrus S235JR bez HFMI, trhlina	68
Obr. 47 - S235JR, detail konce trhliny	69
Obr. 48 - Detail deformované struktury v blízkosti povrchu u výbrusu S235JR s HFMI	70
Obr. 49 - Výbrus S235JR s aplikací HFMI	71
Obr. 50 - Výbrus S235JR s aplikací HFMI, trhlina.....	71
Obr. 51 - S235JR, místo iniciace trhliny	72
Obr. 52 - S235JR HFMI, místo iniciace trhliny	73
Obr. 53 - Výbrus S460MC bez HFMI.....	74
Obr. 54 - Detail oblasti přechodu svaru do ZM u oceli S460MC bez HFMI.....	74
Obr. 55 - S460MC, mikrostruktura neovlivněného materiálu.....	75
Obr. 56 – S460MC, mikrostruktura TOO	75
Obr. 57 - S460MC, místo přechodu svaru do ZM bez známek porušení	76
Obr. 58 - Výbrus S460MC s aplikací HFMI	76
Obr. 59 - Detail deformované struktury v blízkosti povrchu u výbrusu S460 s HFMI.....	77
Obr. 60 - Výbrus S460MC s aplikací HFMI, trhlina.....	78

Obr. 61 - Změna směru šíření trhliny (vlevo), Detail zkoumaného místa (vpravo).....	78
Obr. 62 - S460MC HFMI, místo iniciace trhliny	79
Obr. 63 - S460MC HFMI, plastická oblast trhliny (světelný mikroskop).....	79
Obr. 64 - S460MC HFMI, plastická oblast trhliny (elektronový mikroskop).....	80
Obr. 62 - Vtisk s trhlinou.....	81
Obr. 63 – HV01, počátek a směr měření tvrdosti u vzorků s/bez aplikace HFMI	81
Obr. 64 – Průběh HV01 pro ocel S235JR	82
Obr. 65 – Průběh HV01 S460MC	83

15. Seznam tabulek

Tab. 1 - Parametry procesu aplikace HFMI v závislosti na použitém nástroji [1].....	31
Tab. 2 – Chemické složení oceli S235JR v % [32]	47
Tab. 3 – Chemické složení oceli S460MC v % [33]	47
Tab. 4 – Chemické složení přídavného materiálu G3Si1 v % [35]	50
Tab. 5 – Chemické složení přídavného materiálu G46 4 M21 4Si1 v % [36].....	50
Tab. 6 - Parametry svařování vzorků z oceli S460MC.....	51
Tab. 7 - Parametry únavových zkoušek pro ocel S235JR	63
Tab. 8 - Parametry únavových zkoušek pro ocel S460MC	64