



Vliv geometrie svařovaného tělesa a intenzity odvodu tepla na velikost zbytkových napětí

Diplomová práce

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Autor práce:

Bc. Daniel Vojtíšek

Vedoucí práce:

Ing. Bc. Martin Švec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Šárka Bukovská
Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Vliv geometrie svařovaného tělesa a intenzity odvodu tepla na velikost zbytkových napětí

Jméno a příjmení: **Bc. Daniel Vojtíšek**
Osobní číslo: S20000214
Studijní program: N0715A270015 Materiály a technologie
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou tvorby návarů na vybraný druh základního materiálu (ocel) metodou MAG a na základě dostupné literatury vypracujte rešerši současného stavu poznání.
2. Seznamte se s problematikou vzniku zbytkových napětí po svařování nebo navařování a s metodami měření zbytkových napětí nedestruktivní metodou. Na základě dostupné literatury vypracujte rešerši současného stavu poznání.
3. Navrhněte průběh experimentu navařování k vyhodnocení vlivu geometrie svařovaného tělesa a intenzity odvodu tepla na velikost zbytkových napětí.
4. Na vzorcích zhotovených na základě experimentu navařování provedte měření zbytkových napětí.
5. Vyhodnoťte dosažené výsledky a provedte diskuzi.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

obrázky, tabulky, grafy
cca 50 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] KRAUS, I. a N. GANEV. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Skripta ČVUT, 2004.
[2] ČAPEK, J. *Difrakční analýza mřížkových deformací polykrystalických materiálů s přednostní orientací*. Disertační práce ČVUT; FJFI, 2018.
[3] BUKOVSKÁ, Š. *Možnosti měření zbytkových napětí u duplexních ocelí*. Diplomová práce TUL; FS, 2021.
[4] NEUMANN, H. *Teorie svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN: 978-80-7494-171-9.
[5] MUSIL, M., MORAVEC, J. a kol. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. Skripta IWE (International Welding Engineer). 2017.
[6] KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*. Skripta IWE (International Welding Engineer). 2016.

Vedoucí práce: Ing. Bc. Martin Švec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Šárka Bukovská
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 30. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání: 30. května 2023

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

19. května 2022

Bc. Daniel Vojtíšek

Anotace

Diplomová práce se zabývá analýzou zbytkových napětí vzniklých při navařování metodou MAG na ocel S355J2 s ohledem na geometrii svařovaného tělesa a intenzitu odvodu tepla. V teoretické části je popsán vznik zbytkových napětí během svařování a navařování, jejich rozdělení a jejich metody měření, a to zejména měření rentgenovou difrakční metodou. V experimentální části jsou uvedeny základní vlastnosti konstrukční oceli S355J2 a postup navařovacího experimentu k vyhodnocení vlivu geometrie svařovacího tělesa a intenzity odvodu tepla. Dále je v experimentální části popsán způsob stanovení zbytkových napětí po navařování, včetně analýzy strukturních změn doplněné zkouškou tvrdosti podle Vickerse. V závěru práce jsou zpracované výsledky měření vyhodnoceny a diskutovány.

Klíčová slova

Zbytková napětí, rentgenová difrakční analýza, ocel S355J2, navařování

Annotation

The diploma thesis deals with the analysis of residual stresses arising during MAG cladding on S355J2 steel with regard to the geometry of the welded body and the analysis of heat dissipation. The theoretical part describes the formation of residual stresses during welding and cladding, their distribution and their measurement methods, especially X-ray diffraction measurements. The experimental part presents the basic properties of structural steel S355J2 and the procedure of the cladding experiment to evaluate the influence of the geometry of the welding body and the intensity of heat dissipation. Furthermore, the experimental part describes the method of determining the residual stresses after cladding, including the analysis of structural changes supplemented by the Vickers hardness test. At the end of the work, the processed measurement results are evaluated and discussed.

Key Words

Residual stresses, X-ray diffraction analysis, steel S355J2, cladding

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Martinovi Šveci, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, věcné připomínky a pomoc při měření v laboratořích. Dále bych mu chtěl poděkovat za jeho volný čas věnovaný měření a konzultacím ohledně této diplomové práce.

Obsah

Seznam zkratk	9
1 Úvod	11
2 Teoretická část	12
2.1 Technologie svařování a navařování	12
2.1.1 Obloukové svařování a navařování v ochranné atmosféře	12
2.1.2 Princip metody MAG	13
2.2 Vnitřní napětí při tavném svařování	15
2.2.1 Rozdělení vnitřních napětí	15
2.2.2 Podstata vzniku vnitřních napětí	17
2.2.3 Vliv zbytkových napětí	19
2.2.4 Způsob snižování zbytkových napětí	21
2.3 Měření zbytkových napětí	24
2.3.1 Nedestruktivní metody měření zbytkových napětí	25
2.3.2 Rentgenová difrakční analýza	26
3 Experimentální část	31
3.1 Charakteristika materiálu	31
3.1.1 Konstrukční ocel S355J2	32
3.2 Příprava vzorků	33
3.3 Průběh navařování	34
3.4 Způsob měření zbytkových napětí	37
3.4.1 Stanovení referenčních hodnot napětí	37
3.5 Vyhodnocení zbytkových napětí po navařování	38
3.6 Příprava metalografických vzorků	40
3.7 Strukturní změny v oblasti návaru	40
3.7.1 Mikrostruktura	41
3.8 Měření tvrdosti	43
3.9 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti	44
4 Diskuse výsledků	47
5 Závěr	54
Seznam použité literatury	55

Seznam zkratek

$A_{40\text{mm}}$	Celková tažnost	[%]
A	Tažnost	[%]
A_g	Homogenní tažnost	[%]
α	Součinitel lineární teplotní roztažnosti materiálu	[K ⁻¹]
ČSN	Česká státní norma	[-]
d_0	Vzdálenost sousedních rovin v nenapjatém stavu	[mm]
d	Vzdálenost sousedních rovin v napjatém stavu	[mm]
d_{hkl}	Vzdálenost sousedních mřížkových rovin	[mm]
δ	Úhlová deformace	[°]
Δl	Změna délky	[mm]
ΔT	Rozdíl teplot	[°C]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
EN	Evropská norma	[-]
ε	Mřížková deformace	[-]
$\varepsilon_{\varphi\psi}$	Mřížková deformace ve směru φ , ψ	[-]
HV	Tvrdost podle Vickerse	[-]
I	Elektrický proud	[A]
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	[-]
λ	Vlnová délka daného zařízení	[mm]
n	Celé číslo	[-]
ν	Poissonovo číslo	[-]
Q	Vnesené teplo	[kJ·cm ⁻¹]
R_e	Mez kluzu	[MPa]

R_{eH}	Horní mez kluzu	[MPa]
R_{eL}	Dolní mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
σ	Napětí	[MPa]
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$	Napětí ve směru hlavních os	[MPa]
T	Teplota	[K]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]
θ	Braggův úhel	[-]
θ_0	Braggův úhel nenapjatého krystalu	[-]
$\theta - \theta_0$	Úhlový posun interferenčního maxima	[-]
U	Elektrické napětí	[V]
v	Rychlost posuvu	[cm·min ⁻¹]

1 Úvod

V dnešní době je možné pomocí moderních analytických a výpočetních metod odhadnout napětí, kterému budou součásti během provozu vystaveny. Pro spolehlivou predikci to ovšem není dostačující. Kombinací napětí vzniklých během provozu a zbytkových napětí, které jsou do materiálu vneseny např. během svařování, může dojít k poškození i ke zkrácení životnosti součástí. [1]

Zbytková napětí se v kovových polykrystalických materiálech vyskytují, i když na ně nepůsobí žádné vnější síly ani momenty a neexistují v nich žádné teplotní gradienty. Zbytková napětí mohou být užitečná, ale i škodlivá. Příznivé účinky zbytkových napětí představují např. tlaková napětí, která zvyšují mez únavy. Nepříznivá zbytková napětí bývají zpravidla tahová napětí, která způsobují trhliny v materiálu, napěťovou korozi, snížení meze únavy a mohou vést k destrukci konstrukce. Vzhledem k tomu, že je možné zbytková napětí měřit a stanovit jejich charakter, je možné využívat jejich prospěšné vlastnosti, a v případě jejich škodlivosti je alespoň částečně eliminovat. [2]

Pro měření zbytkových napětí v materiálu existuje mnoho metod, které se dělí na destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní. Vhodné jsou zejména ty, během kterých nedochází při měření k poškození součástí a ty mohou být následně použity v provozu. Mezi tyto metody měření se řadí i metoda rentgenové difrakční analýzy, které se tato diplomová práce bude věnovat. [3]

K nejrozšířenějším způsobům měření zbytkových napětí v současné době patří difrakční tenzometrické, fázové a texturní analýzy. Rentgenová difraktometrie prošla značným vývojem měřicí a výpočetní techniky a její možnosti se v poslední době kvalitativně změnily. K tomuto faktu přispělo jak systematické zpřesňování teorie jejich interakce difrakce, tak intenzivní rozvoj experimentální techniky. [2]

2 Teoretická část

V teoretické části je s ohledem na téma práce popsána technologie svařování a navařování a blíže specifikována metoda MAG, která byla použita v experimentu. Dále je teoretická část zaměřena především na zbytková napětí vznikající při svařování a navařování, jejich rozdělení a způsob měření, a to zejména pomocí rentgenové difrakční analýzy.

2.1 Technologie svařování a navařování

Svařování je metalurgický proces, během kterého vznikají nerozebíratelné spoje prostřednictvím meziatomových vazeb, vzniklých mezi spojovanými materiály během ohřevu nebo při plastické deformaci, případně při společném působení těchto jevů. Podle normy ČSN EN 14610 jsou metody svařování rozděleny na základě fyzikálních vlastností podle způsobu přenosu energie na tavné a tlakové svařování. Při tavném svařování nepůsobí na materiál vnější síly a spojení vzniká pouze místním natavením materiálu. U některých metod tavného svařování bývá během procesu používán přídavný materiál stejného nebo podobného chemického složení. Svar vzniká v natavené oblasti krystalizací svarového kovu. Při tavném svařování může dojít ke zředění přídavného materiálu základním materiálem, což může vést k znehodnocení svarového kovu. Zředění svarového kovu je významné zejména u navařování. Podíl základního materiálu a přídavného materiálu je udáván v procentech a je závislý na použité metodě. [2] [4] [5]

Navařováním dochází pouze k nanášení vrstvy svarového kovu na povrch součásti za účelem doplnění nebo zvětšení objemu. Během procesu nastávají obdobné metalurgické děje jako u tavného svařování, včetně vzniku vnitřních napětí v základním materiálu. Vzniku těchto napětí se nedá zabránit. Cílem navařování může být také dosažení ochrany proti korozi, zvýšení odolnosti vůči opotřebení nebo jiné důvody. Navařování je rovněž používáno na renovace součástí, opravování forem a nástrojů. Technologie navařování se rozděluje podle použitého zdroje tepla. Vzhledem k použité technologii v experimentální části jsou v následující kapitole popsány obloukové metody navařování v ochranném plynu. [4] [6]

2.1.1 Obloukové svařování a navařování v ochranné atmosféře

Obloukové svařování kovů v ochranné atmosféře se řadí mezi metody tavného svařování, při kterém je hořící elektrický oblouk obklopen ochranným plynem. Ochranná atmosféra

chrání elektrodu, oblouk, odtavující se kapky přídavného materiálu a tavnou lázeň proti účinkům vzdušných plynů. Jednotlivé metody obloukového svařování se rozlišují podle druhu použité elektrody a ochranného plynu. Metody obloukového svařování jsou i běžně používány pro navařování, avšak přiváděná energie bývá často příliš vysoká, a dochází tak ke značnému zahřátí návaru a jeho okolí, což se projevuje zápaly, změnou struktury a metalurgických vlastností původního materiálu. Problém u obloukových metod navařování také bývá v omezeném počtu navařovaných vrstev, v přístupnosti opravovaného místa a v kvalitním provaření a spojení navařovaného a základního materiálu. [4] [6]

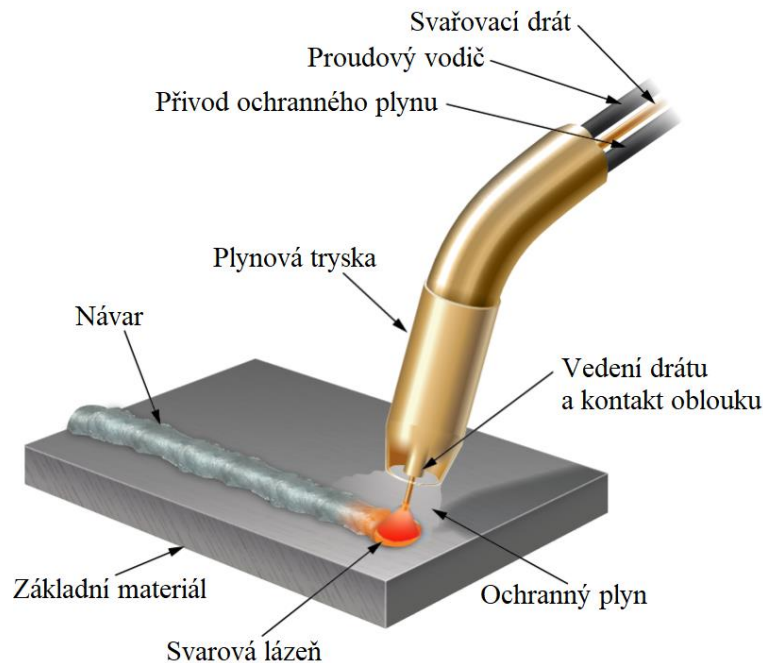
Mezi obloukové metody svařování v ochranném plynu patří metoda MAG (*Metal Activ Gas*), která je podle normy ISO 4063 číselně označena 135. U této metody je při svařování použita tavící se elektroda, která je obklopena ochranným aktivním plynem. V celosvětovém měřítku se jedná vedle svařování obalenou elektrodou o nejrozšířenější metodu pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Hlavním důvodem, proč je tato metoda tak rozšířená, je široký výběr přídavných materiálů, ochranných plynů, možnost mechanizace, robotizace a velký výběr svařovacích zařízení. [4] [7]

2.1.2 Princip metody MAG

Metoda MAG používá ve většině případů zdroj se stejnosměrným výstupem proudu, ale lze nastavit i střídavý proud, který se používá při svařování hliníku a jeho slitin. Kladný pól proudového zdroje je na drátové elektrodě a záporný pól je na základním materiálu. Zdroje pro svařování MAG mají plochou statickou charakteristiku s konstantním napětím a se samoregulační schopností udržování konstantní délky oblouku. Samoregulační schopnost je založena na výrazné změně proudu během malé změny délky oblouku a je možná jen při konstantní rychlosti podávání drátu. [4] [8]

Oblouk hoří mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře aktivního plynu viz obr. 2.1. K napájení drátu elektrickým proudem dochází třecím kontaktem v ústí hořáku, aby byla elektricky zatížená délka drátu co nejkratší. Posuv drátu je zajištěn pomocí kladek umístěných v podavači, vlastním hořáku, nebo kombinací obou systémů. Proudová hustota je nejvyšší ze všech obloukových metod a dosahuje až $600 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$. Svařovací proud se pohybuje v hodnotách od 30 A při svařování tenkých plechů drátem o průměru 0,6 až 0,8 mm, až do 800 A u vysokovýkonných mechanizovaných metod. Způsob přenosu kovu obloukem závisí na svařovacích parametrech a ochranném plynu.

Nejběžnější přenos kovu v oblouku pro tenké plechy je zkratový a u větších tloušťek sprchový. Při vysokém svařovacím proudu dochází ke změně charakteristiky přenosu kovu obloukem a vlivem elektromagnetických sil je vyvolán rotující oblouk. Teplota kapek přídatného kovu se pohybuje v rozmezí 1700 °C až 2500 °C a teplota tavné lázně mezi 1600 °C až 2100 °C v závislosti na technologii svařování, svařovacích parametrech, chemickém složení a vlastnostech materiálu. Vlivem vysokých proudů se svařovací rychlost přibližuje k hranici 150 cm·min⁻¹ a rychlost přenášených kapek obloukem přesahuje 130 m·s⁻¹. [4]



Obr. 2.1 Schéma navařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (metodou MAG) [9]

Ochranný plyn bývá volen na základě svařovaného materiálu a ovlivňuje zejména přenos kapek v elektrickém oblouku, rozstřík, rozsah chemických reakcí a teplotní poměry v oblouku. Mezi používané ochranné plyny patří oxid uhličitý a v současnosti ještě častěji používané směsi plynů se základem, který tvoří argon, např. Ar + CO₂, Ar + O₂, Ar + CO₂ + O₂ nebo Ar + He + CO₂ + O₂. Univerzálním plynem používaným při svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí je směsný plyn Ar + 18 % CO₂. Tato plynná směs se vyznačuje velmi dobrými svařovacími vlastnostmi, stabilním elektrickým obloukem a hlubokým závarem. Dále umožňuje svařování se zkratovým i sprchovým přenosem kovu a malým rozstříkem. Zajišťuje také hladký povrch svaru s dobrým přechodem do základního materiálu a je použitelná pro všechny tloušťky. [4]

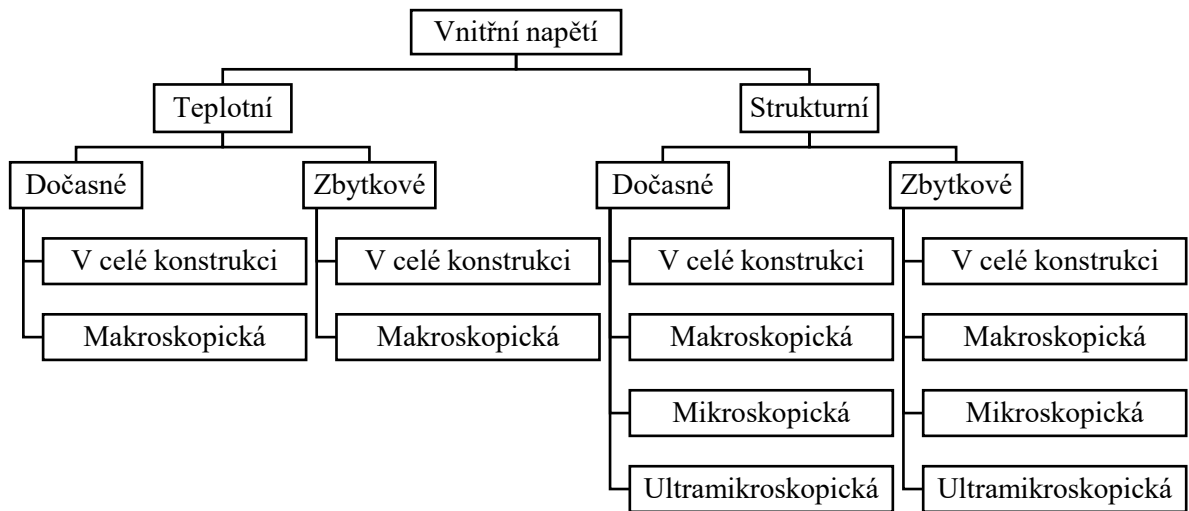
2.2 Vnitřní napětí při tavném svařování

Napětí ve svařovaných dílech a jejich deformace jsou při tavném svařování zapříčiněny přívodem tepelné energie z koncentrovaného zdroje tepla do místa svaru a odvodem tepla do základního materiálu. Napětí a deformace vznikají v materiálu vlivem teplotních změn při ohřevu a chladnutí, jako důsledek dilatačních změn a metalurgických procesů. Napětí a deformace vznikají vždy a jejich výskytu se nedá zabránit, pouze je možné je částečně omezit nebo přesunout do málo exponovaných částí pomocí vhodného technologického procesu nebo konstrukčního řešení. Mezi napětím a deformací existuje příčinná souvislost, např. když je zabráněno vzniku deformací tuhým upnutím svařence, tak dochází ke zvýšení napětí ve svarech. [2]

Vzniklá napětí při svařování jsou označována jako vnitřní napětí a působí uvnitř materiálu bez působení vnějších sil. Tato napětí vznikají i při jiných technologických procesech jako např. kalení, obrábění, odlévání, tváření za tepla a za studena. Na charakter a velikost svarových napětí a deformací má zásadní vliv způsob konstrukce a technologie výroby svařovaných dílů. Stav napjatosti a deformace ovlivňují užité vlastnosti svařenců, a to zejména u materiálů s vyšší pevností a nižší plastičností. Charakter a velikost napětí ve svařovaných dílech se během svařování mění, napětí může dosáhnout kritických hodnot překračujících pevnostní vlastnosti materiálu. [2] [10]

2.2.1 Rozdělení vnitřních napětí

Vnitřní napětí ve svařovaných dílech a konstrukcích jsou dělena podle různých hledisek. Napětí, která vznikají v oblasti návaru a jeho blízkém okolí, se označují jako napětí aktivní. Je-li během procesu svařence pevně upnut, dochází k přenosu napětí i do dalších částí svařovaného dílu nebo konstrukce. Napětí vzniklá během přenosu se označují jako reaktivní, jelikož vznikají reakcí na aktivní napětí. Vnitřní napětí se dále rozdělují podle příčiny jejich vzniku na napětí teplotní a strukturní. Teplotní napětí vznikají vlivem nerovnoměrného ohřevu a ochlazování materiálu. Strukturní napětí vznikají objemovými změnami, které jsou doprovázeny fázovými transformacemi. Celkové schéma rozdělení vnitřních napětí podle příčiny jejich vzniku je zobrazeno na obr. 2.2. [2]



Obr. 2.2 Rozdělení vnitřních napětí [2]

Výše uvedená napětí se v materiálu vyskytují buď jako dočasná napětí, nebo zbytková napětí. Dočasná napětí působí v materiálu pouze po dobu, dokud trvá příčina jejich vzniku, kdežto zbytková napětí působí v materiálu i po ukončení svařovacího procesu a celkovém vychladnutí. Ve svařovaných dílech se vždy vyskytují zbytková napětí, která byla vyvolaná plastickými deformacemi v určité části svařence ve fázi ohřevu nebo strukturními změnami uvnitř materiálu. [2]

Napětí mohou působit v celé konstrukci nebo pouze v určitém objemu o různé velikosti. Napětí v celé konstrukci vznikají změnou rozměrů dílčích elementů tělesa. Podle velikosti objemu, ve kterém působí, se rozdělují na napětí makroskopická, mikroskopická a submikroskopická. Makroskopická napětí (I. druhu) vznikají a vyrovnávají se v makroskopických objemech materiálu. Tato napětí mají určitý směr a velikost ve vztahu ke geometrii tělesa podobně jako napětí od vnějších sil. Mikroskopická napětí (II. druhu) vznikají a vyrovnávají se v mikroskopických objemech materiálu a nemají žádný vztah ke geometrii tělesa ani určitý smysl a směr. V submikroskopických oblastech tělesa vznikají a vyrovnávají se napětí submikroskopická (III. druhu) a z hlediska vnějších sil nemají praktický význam. [2]

Dále jsou vzniklá napětí při svařování rozdělena podle směru působení vzhledem k ose svaru na napětí podélná, příčná a ve směru tloušťky. Podélná napětí působí ve směru osy svaru, a tedy i ve směru svařování. Příčná napětí působí ve směru kolmém na osu svaru, a tedy i na směr svařování. Napětí ve směru tloušťky se projevují zejména při svařování tlustostěnných součástí a při navařování na tlusté desky. [2]

2.2.2 Podstata vzniku vnitřních napětí

Během svařovacího procesu vznikají v základním materiálu napětí a deformace vlivem nerovnoměrného zahřívání a ochlazování, eventuálně při tuhém upnutí svařence nebo vlivem teplotní roztažnosti materiálu. Napětí a deformace mohou být také vyvolány strukturními změnami, ale jejich podstata je založena na teplotních účincích. Během svařování vznikají nestacionární teplotní pole, která mají největší vliv na vznik a rozložení napětí. Charakter teplotního pole a parametr procesu sdílení tepla je závislý na tepelně fyzikálních vlastnostech materiálu a na tepelném toku ze zdroje tepla. Tepelně fyzikální vlastnosti svařovaného materiálu jsou závislé na teplotě, na které závisí také mechanické vlastnosti materiálu. Z fyzikální a metalurgické podstaty je pro vznik, charakter a velikost napětí a deformací rozhodující:

- nestacionární teplotní pole v základním materiálu,
- množství vnášeného tepla na jednotku délky návaru,
- velikost a tvar svarové lázně, tvar a umístění,
- fyzikální vlastnosti základního materiálu (teplotní závislost, roztažnost a vodivost), které ovlivňují proces sdílení tepla,
- mechanické vlastnosti základního materiálu (mez kluzu a modul pružnosti v tahu) a jejich závislosti na teplotě,
- objemové změny v důsledku strukturních změn základního a svarového materiálu,
- tuhost svařence. [2]

Z výše uvedených informací vyplývá, že na velikost vznikajících napětí a deformací v materiálu během svařování má největší vliv jeho hodnota meze kluzu a lineárního součinitele teplotní roztažnosti. Za předpokladu, že je v daný čas v celém vzorku stejná teplota, je možné teplotní dilataci volně položeného dílu vyjádřit vztahem (2.1). [11]

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

Kde:

Δl – změna délky [mm],

l_0 – počáteční délka [mm],

α – součinitel lineární roztažnosti materiálu [K⁻¹],

T_1, T_2 – teplota [K].

Jestliže je během svařování díl pevně upnut a je zamezeno volné dilataci, dochází ke vzniku napětí v elastické oblasti. Vzorec pro výpočet napětí vychází z Hookova zákona. Tento vzorec, který je vyjádřen rovnicí (2.2) je možné aplikovat pouze do meze kluzu. Záporné znaménko v rovnici vyjadřuje, že při kladné změně teploty dochází ke vzniku tlakových, záporných napětí. [2] [11]

$$\sigma = -\alpha \cdot \varepsilon = -\alpha \cdot E \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

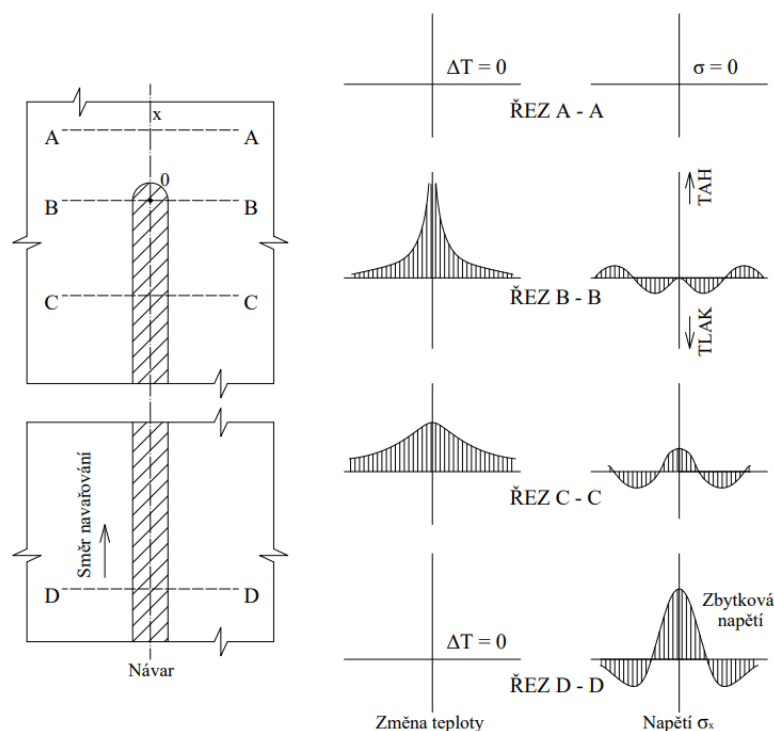
Kde:

σ – napětí [MPa],

ε – poměrné prodloužení [-],

E – modul pružnosti v tahu [MPa].

Během navařování se napětí v materiálu v průběhu procesu mění. Na obr. 2.3 je zobrazen průběh vznikajících podélných napětí v oblasti návaru na rovné desce. Během procesu se pohybuje zdroj tepla ve směru navařování a v určitém okamžiku se poloha zdroje nalézá v bodě 0. V rovině řezu A-A, která je dostatečně vzdálena od zdroje tepla je změna teploty na povrchu desky $\Delta T = 0$, jelikož v dostatečně velké vzdálenosti od návaru nepůsobí teplotní napětí. V místě okamžité polohy zdroje tepla, řez B-B, vznikají v rovině povrchu desky teplotní pole. Teplota v ose návaru je vysoká, teplotní gradienty jsou výrazné a tomu odpovídá v řezu B-B i teplotní napětí. V místě tepelného zdroje jsou teplotní napětí téměř nulová, protože roztavený kov nepřenáší žádné napětí. V okolí návaru vznikají tlaková napětí, jejichž vznik je zapříčiněn rozpínavostí zahřátého materiálu, která je omezena chladnějším materiálem. Ve větší vzdálenosti od návaru dochází ke kompenzaci tlakových napětí tahovými napětím. V místě, kde dochází k chladnutí návaru a desky, řez C-C, nejsou teplotní gradienty již tak výrazné a charakter teplotních napětí se začíná měnit. V ose návaru a přilehlé oblasti dochází ke smršťování a začínají se vytvářet tahová napětí a se zvětšující se vzdáleností od svaru tlaková napětí, která dále přecházejí do tahových napětí. V místech, kde již došlo k vyrovnání teploty, řez D-D, je opět změna teploty $\Delta T = 0$ a teplotní napětí již mají koncový charakter. V oblasti osy návaru se nacházejí napětí tahová a dále od návaru napětí tlaková. Jedná se již o zbytková napětí, jelikož teplota desky odpovídá původní teplotě. [12] [13]



Obr. 2.3 Průběh napětí během teplotních změn při navařování na rovinou desku [12]

S rostoucí šířkou desek se zároveň zvyšuje i tuhost desek a mění se i podmínky odvodu tepla. Oblast, kde se vyskytují zbytková tahová napětí, je u širokých desek menší nežli u úzkých desek, ale hodnoty zbytkových napětí jsou u širokých desek větší. Na průběh zbytkových napětí má také vliv i volba navařovacího režimu. Během navařování s vyšším výkonem a menší svařovací rychlostí je výsledek srovnatelný s charakterem napětí pro úzkou desku. Podélná zbytková napětí se mění i ve směru tloušťky. Maximální hodnoty podélných napětí jsou obvykle v rovině povrchu desek. [2]

2.2.3 Vliv zbytkových napětí

Zbytková tahová napětí mohou ve svarech nabývat vysokých hodnot, které mohou být analogické s mezí kluzu svařovaného materiálu. Podélná zbytková napětí v blízkosti svaru způsobují vnitřní plastické deformace, které odčerpávají materiálu zásobu plasticity. Během svařování ocelí se základnou strukturou nebo vysokopevnostních ocelí, které mají nízké plastické vlastnosti, mohou zbytková napětí dosahovat hodnot až meze pevnosti, přičemž mohou vnitřní deformace zcela odčerpat veškerou zásobu plasticity. [2]

U staticky namáhaných svařovaných konstrukcí dochází vlivem zbytkových napětí k poklesu zásoby plasticity, čímž dochází k snížení provozní bezpečnosti konstrukce. Při svařování konstrukcí, které jsou pouze v jednoosém stavu napjatosti, např. při svařování malých tlouštěk materiálu nebo spojů s plynulými tvarovými změnami bez vrubových účinků, nedochází k snížení pevnosti konstrukce vlivem zbytkových napětí, jestliže dojde zatížením konstrukce k odbourání vnitřního napětí trvalou deformací. Během svařování materiálu větších tlouštěk vzniká ve svarových spojích prostorová napjatost a statickým namáháním u těchto spojů nedochází ke snížení pevnosti. [2]

U dynamicky namáhaných svarových spojů z houževnatých materiálů např. nelegovaných houževnatých nízkouhlíkových ocelí se zbytková napětí během cyklického namáhání mohou částečně odbourat a vliv na únavové vlastnosti spoje je nevýrazný. Vliv zbytkových napětí se výrazně projevuje zejména u materiálů s nízkou zásobou plasticity, a hlavně u konstrukcí s vruby, které působí jako koncentrátoři napětí. Vlivem charakteru vnitřních napětí a napětím od zatížení může dojít ke snížení meze únavy, ale i ke zvýšení. Pokud mají napětí stejný smysl, mez únavy klesá, v případě, že jsou jejich znaménka opačná, mez únavy se zvyšuje. Tento efekt může být používán k záměrnému vnesení napětí např. lokálním ohřevem, povrchovým zpevněním nebo vhodným technologickým postupem svařování. [2]

Vznikající napětí během svařování způsobují také deformace svařovaných dílů, které mohou mít zásadní vliv na jejich funkčnost i estetiku. Rovnání svařenců je složitý proces, který vyžaduje zkušenosti, jelikož se mohou do svařence během rovnání vnést další napětí. Deformace se dělí podle způsobu projevu na vnější a vnitřní. Vnější deformace se projevují změnou tvaru a vnějších rozměrů svařovaného dílu. Vnitřní deformace působí v jednotlivých objemových elementech tělesa uvnitř materiálu. Vnější deformace se mohou dále rozdělovat podle oblasti, ve které se projevují, na elementární, lokální a celkové deformace. Elementární deformace se projevují deformací ve svarovém kovu a lokální se projevují pouze v určité části svařence. Celkové deformace se projevují změnou rozměru a geometrie celé svařované konstrukce. [2]

Deformace se mohou rozdělovat podle velikosti oblasti působení. Makroskopické deformace souvisejí s makroskopickým napětím a projevují se změnou rozměrů a geometrie. Mikroskopické deformace vznikají v mikroskopických objemech tělesa a nemají přímý vliv na změnu tvarů a rozměrů. Submikroskopické deformace vznikají v submikroskopických

objemech tělesa důsledkem působení ultramikroskopických napětí. Deformace se také dělí podle doby působení na dočasné a zbytkové. Dočasné deformace se projevují pouze po určitou dobu za existence jejich příčiny vzniku. Zbytkové deformace se projevují i po ukončení svařovacího procesu a vychladnutí vzorku. Podle stálosti se deformace rozdělují na elastické, plastické a elasticko-plastické. Výrazné plastické deformace vznikají až po překročení meze kluzu. Elastické deformace zmizí, pokud přestane působit napětí, které je vyvolalo. [2]

2.2.4 Způsob snižování zbytkových napětí

Zbytková napětí a deformace jsou podmíněny vlastní tuhostí materiálu, která je charakterizována mechanickými vlastnostmi základního materiálu, a tuhostí podmíněnou celkovým řešením a provedením konstrukce. Výsledné stavy a úroveň zbytkových napětí i deformací jsou stanoveny stejnými faktory, které určují svařitelnost. [2]

Svařitelnost je jednou z podstatných technologických vlastností kovových materiálů a jedná se o schopnost vytvoření kvalitního svarového spoje. Z metalurgického pohledu je svařitelnost závislá zejména na způsobu výroby, chemickém složení, struktuře a z toho vyplývajících pnutí ve svařovaném materiálu. Z technologického hlediska je svařitelnost závislá na technologii svařování a použitých parametrech a z konstrukčního hlediska je závislá na tvarovém a rozměrovém provedení spoje a jeho tuhosti. Z uvedených hledisek je možné kovové materiály dělit na svařitelné, svařitelné za určitých podmínek a běžně nesvařitelné. Konkrétní svarový spoj je ovšem zapotřebí posuzovat ze všech hledisek. [14]

Vzniklá napětí a deformace spolu jednoznačně souvisejí a každý zásah, který ovlivňuje napětí, současně ovlivňuje i deformace, a to platí i naopak. Oceli, které jsou určené ke svařování, mají zpravidla dostatečnou rezervu plasticity a opatření při svařování jsou tak zaměřena zejména na zmenšení deformací. Kompletní řešení svařované konstrukce musí respektovat specifická hlediska svařovacího procesu i základní požadavky technologičnosti. Charakter a velikost napětí závisí na celé řadě technologických a konstrukčních okolností, např.:

- použitých parametrech svařování,
- metodě a postupu svařování,
- teplotním režimu během a po svařování,

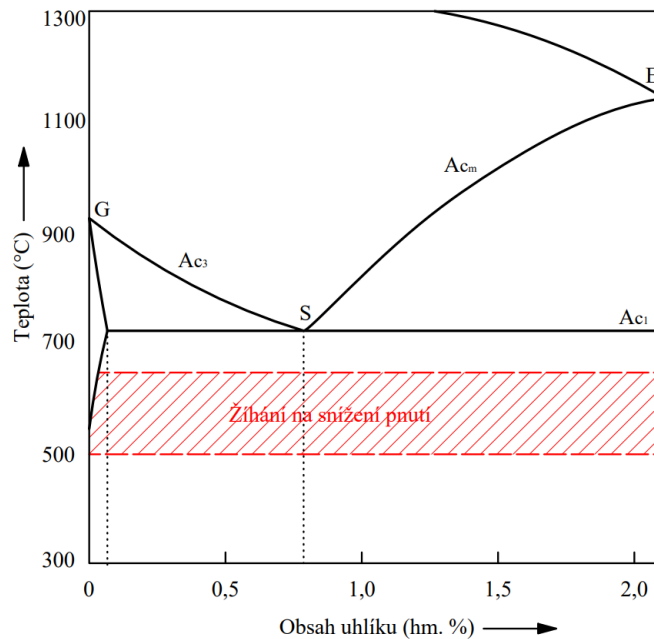
- druhu základního materiálu a jeho stavu,
- tloušťce materiálu,
- druhu, velikosti, umístění a počtu svarů,
- konstrukčním řešením s ohledem na tuhost. [2]

Ke snížení napětí existuje celá škála praktických metod, kterými je možné snížit vnitřní napětí již během procesu svařování. Mezi tyto praktické metody patří:

- svařování neupnutých dílů, kdy dochází ke snížení příčných napětí, ovšem za cenu vzniku deformací,
- svařování s vyšším přívodem energie na jednotku délky svaru, při kterém dochází k poklesu podélných napětí, ale zároveň k zvýšení příčných napětí,
- svařování s předběžnou pružnou deformací v opačném smyslu, než je deformace vzniklá svařováním,
- svařování s předehřevem, kterým se snižují teplotní gradienty, čímž dochází k snížení makroskopických napětí i zbytkových deformací a mohou se snížit i strukturní napětí
- vhodný postup vytváření svarového spoje jako je pořadí a postup kladení svarových housenek a vrstev,
- místní předpětí nebo ohřev. [2]

Výše uvedené metody mohou sice zbytkové napětí snížit, ale zabránit jim ve vzniku nemohou. Pokud je nutné vnitřní napětí vyvolané svařováním snížit, mohou být použity procesy, mezi které patří žíhání na snížení vnitřního pnutí nebo mechanické způsoby. Žíhání může probíhat buď celkovým ohřevem konstrukce, nebo pouze lokálním ohřevem svařence. Při žíhání ocelových svařenců s celkovým ohřevem se provádí pomalý ohřev v peci v rozmezí teplot 500 °C až 650 °C viz obr. 2.4. Při této teplotě je hodnota meze kluzu a meze tečení natolik snížena, že během výdrže dochází k odbourání vnitřních napětí místní plastickou deformací. Doba výdrže a teplota žíhání závisí na druhu materiálu, velikosti, tvaru a složitosti svařence. Při nižší teplotě žíhání se doba výdrže prodlužuje. Doba výdrže se také často volí 4 min na 1 mm největší tloušťky v místě svaru a nejmenší doba výdrže se volí 20 min. Po výdrži na dané žíhací teplotě dochází k pomalému ochlazení v peci. Žíhání s lokálním ohřevem se provádí na jednotlivých svarech pomocí elektrického odporového, nebo indukčního ohřevu. Šířka ohřivaného pásma závisí na šířce svaru, ale většinou se volí

3,5krát širší. Během lokální ohřevu vznikají nepříznivá přídavná napětí, dále od svaru, kde už ale nejsou tak nebezpečná. [2]

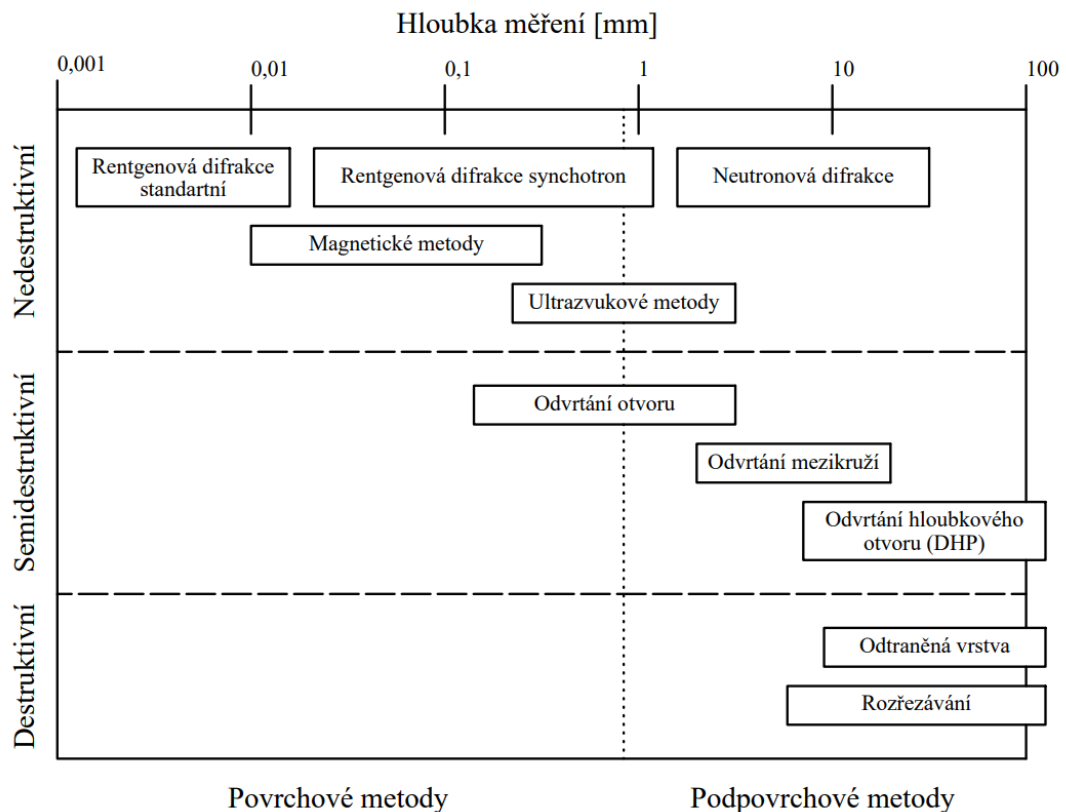


Obr. 2.4 Oblast teplot žhání na odstranění vnitřního pnutí v rovnovážném diagramu metastabilních fází Fe-Fe₃C [15]

Snížení vnitřních napětí se dá také docílit mechanickým prokováním jednotlivých vrstev svaru v počáteční fázi ochlazování po vytvoření svarové housenky. Prokováním svarové housenky jsou do svaru vneseny v důsledku povrchových a podpovrchových deformací tlaková napětí, která v těchto objemech snižují zbytková tahová napětí a zbytková tahová napětí v oblasti svaru. Prokování se provádí většinou ručním kladivem. Ke snižování vnitřních napětí může také docházet pomocí vibrací. Vibrace se provádějí na několika rezonančních frekvencích a působením uvádí svařenec do jednoho nebo více rezonančních či subrezonančních stavů. Ve svařenci dochází k relaxaci napětí, což vede ke snížení vnitřních napětí v mikroskopických objemech materiálu, které jsou tvořeny i napětím makroskopickým. Relaxace probíhá vzájemným působením dislokací a elementárních skluzů v zrnech, přičemž vznikají mikroskopické deformace v tahu a tlaku. V porovnání se žháním dochází ke snížení vnitřních napětí v kratším čase a je dosaženo i snížení energie, což se projevuje na celkových výrobních nákladech. [2] [16]

2.3 Měření zbytkových napětí

Vzhledem k tomu, že zbytková napětí mají vliv na životnost součásti, je důležité stanovit a zhodnotit jejich velikost a původ. Ke stanovení zbytkových napětí je možné použít metody měření, které jsou obecně rozděleny na destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní viz obr. 2.5. [15]



Obr. 2.5 Metody měření zbytkových napětí [15]

Princip destruktivních metod určování zbytkových napětí je založen na změně napět'ového stavu při odstranění části materiálu nebo rozřezání součásti a měření deformací, které odpovídají této změně. Při měření dochází k poškození součásti, která již není dále schopna provozu. [15]

Mezi nejpoužívanější metody v praxi pro měření povrchových napětí se řadí semidestruktivní metody. Tyto metody spočívají v měření relaxace napětí po odvrtání otvoru nebo mezikruží. Uvolněným napětím vznikají v okolí vyvrtaného otvoru povrchové deformace, které jsou měřeny pomocí odporových tenzometrů, nalepených na součást. Naměřené hodnoty jsou dále převedeny pomocí kalibračních koeficientů zpětně na zbytková

napětí v materiálu. Otvor bývá proveden v několika krocích, přičemž jsou uvolněné deformace měřeny po každém kroku. Speciálním případem je metoda „deep hole drilling“, kdy je do součásti nejprve vyvrtán otvor a poté mezikruží. U této speciální metody je měřena změna kruhovitosti otvoru po jeho celé délce. Po měření je dále možné součást po případných úpravách používat v provozu. [11] [15]

2.3.1 Nedestruktivní metody měření zbytkových napětí

Během měření nedestruktivními metodami nedochází k poškození materiálu, a součásti tak mohou být dále používány v provozu. Mezi nedestruktivní metody měření napětí patří difrakční, magnetické a ultrazvukové metody. Podstata ultrazvukových metod měření zbytkových napětí je založena na vztahu mezi rychlostí šíření vlny a elastickými konstantami materiálu. K měření se využívají podélné nebo příčné polarizované vlny. Měření napětí je možné realizovat přes celý průřez vzorku nebo pouze na povrchové napětí povrchovými vlnami. [15]

Magnetické metody využívají k měření vnitřních napětí odezvu materiálu na působící střídavé magnetické pole. Magnetickou metodou je detekován vznikající Barkhausenův šum, jehož úroveň je funkcí napětí v materiálu a také mikrostruktury a tvrdosti. Komerčně vyráběná zařízení se používají nejen ke stanovení zbytkových napětí, ale také ke kontrole povrchových vad. Metoda využívá magneto-elastickou interakci mezi magnetickým posunutím a elastickým napětím ve feromagnetických materiálech. V oblastech, kde působí tahová napětí, se vlivem pohybu Blochových stěn tyto oblasti ve směru, v němž je magnetizace rovnoběžná se směrem zatěžování, zvětšují. V oblastech kolmých na směr magnetizace se dané oblasti zmenšují, až úplně zanikají. Působí-li v materiálu napětí tlaková, efekt je opačný. [11] [15]

Mezi difrakční metody měření zbytkových napětí patří rentgenová difrakce, které je věnována následující kapitola 2.3.2, a neutronová difrakce. Tyto metody jsou z hlediska technické praxe nejvýznamnější. Rozdílem mezi těmito metodami je zejména hloubka, do jaké mohou měřit. Rentgenovou difrakcí je možné měřit napětí do hloubky 1 μm až 10 μm . Pro měření napětí ve větších hloubkách je možné použít neutronovou difrakční metodu, kterou lze měřit až do 50 mm pod povrchem materiálu. Při měření napětí rentgenovou difrakcí ve větších hloubkách je nutné provést postupné odleptávání povrchu do určité hloubky. K odleptávání povrchu je možné použít pouze chemické nebo elektrochemické odleptávání,

jelikož těmito procesy nevznikají zbytková napětí a nejsou ovlivněna zbytková napětí vyskytující se ve vzorku. Veškeré difrakční metody jsou založeny na měření vnitřních deformací a následném převodu na napětí pomocí vztahů z teorie elasticity. Při měření je vzorek ozařován paprskem částic, který se po odrazu rozptyluje do různých směrů na základě různých deformací krystalových mřížek. [11] [15] [17] [18]

2.3.2 Rentgenová difrakční analýza

Princip rentgenové difrakční analýzy je založen na rozptylu (difrakci) rentgenových paprsků po dopadu na krystalovou mřížku. Měřením jsou zaznamenány změny vzdáleností atomových mřížkových rovin, ke kterým došlo změnou napětí. Určené deformace jsou následně převedeny pomocí vztahů z teorie elasticity na napětí. Během rozptylu paprsků na sousední mřížkové roviny dochází ke vzniku interferenčního maxima ve směru úhlu θ , pokud platí Braggova podmínka, kterou vyjadřuje rovnice (2.3). [17]

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta \quad (2.3)$$

Kde:

- n – celé číslo [-],
- λ – vlnová délka daného záření [mm],
- d_{hkl} – vzdálenost sousedních mřížkových rovin [mm],
- θ – Braggův úhel [-].

Působením mechanického napětí dochází ke změně vzdálenosti sousedních rovin a úhlové polohy θ . Dosazením hodnot vzdáleností sousedních rovin v napjatém a nenapjatém stavu do rovnice pro mřížkovou deformaci je získán vztah (2.4). [17]

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -\cot g \theta_0 (\theta - \theta_0) \quad (2.4)$$

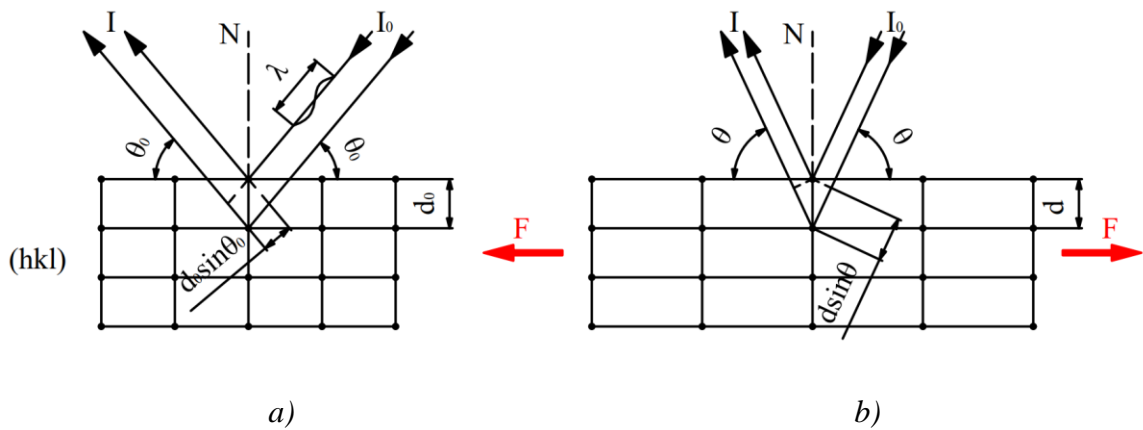
Kde:

- ε – mřížková deformace [-],
- d – vzdálenost sousedních rovin v napjatém stavu [mm],
- d_0 – vzdálenost sousedních rovin v nenapjatém stavu [mm],

θ_0 – Braggův úhel nenapjatého krystalu [-],

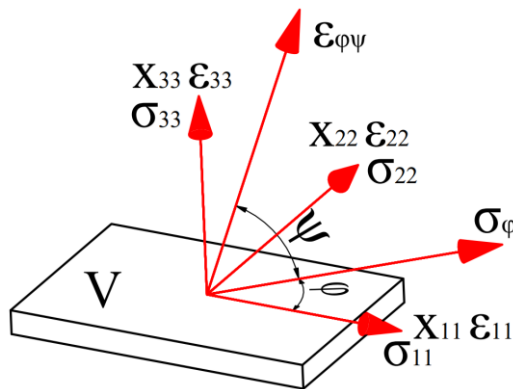
$(\theta - \theta_0)$ – úhlový posun interferenčního maxima [-].

Změny vzdáleností mřížkových rovin způsobené deformací a následná změna úhlové polohy interferenčního maxima je zobrazena na obr. 2.6, kde I_0 a I jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření. [17]

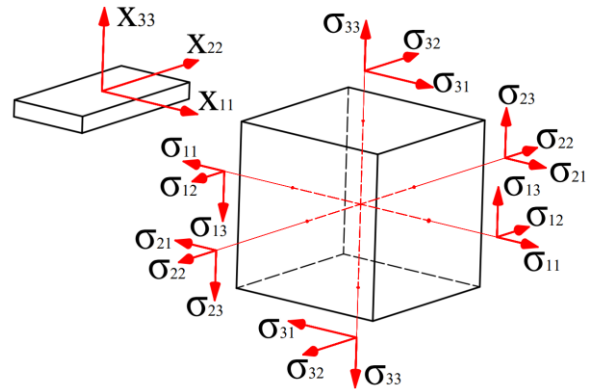


Obr. 2.6 Deformace vzdálenosti mřížkových rovin (hkl) a změny úhlové polohy interferenčního maxima; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou F [17]

Při uvažování souřadnicové soustavy spojené se vzorkem viz obr. 2.7 a označené σ_{ij} složkami tenzoru napětí působícího na objemový element vzorku, který splňuje podmínky lineární teorie elasticity viz obr. 2.8,



Obr. 2.7 Systém souřadnic spojený se vzorkem V [17]



Obr. 2.8 Napětí působící na objemový element vzorku [17]

je možné mřížkovou deformaci $\varepsilon_{\varphi\psi}$ v libovolném směru vyjádřit vztahem (2.5), který je charakterizován úhly φ a ψ . [17]

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{\nu + 1}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi + \frac{\nu + 1}{E} (\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi) \sin 2\psi + \frac{1}{E} \sigma_{33} + \frac{-\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (2.5)$$

Kde:

ν – Poissonovo číslo [-],

E – Youngův modul pružnosti [MPa],

$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ – napětí ve směru hlavních os [MPa],

$\varepsilon_{\varphi\psi}$ – mřížková deformace ve směru φ, ψ [-].

Úhel φ určuje směr měření napětí σ_{φ} vzhledem k ose x_{11} , úhel ψ se nachází mezi osou x_{33} , která je normálou k povrchu a určuje směr deformace $\varepsilon_{\varphi\psi}$. [17]

V případě dvojosého stavu napjatosti, kdy je napětí $\sigma_{i3} = 0$, je vztah pro působící napětí σ_{φ} dán podle rovnice (2.6). [17]

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi \quad (2.6)$$

Substitucí rovnice (2.6) vznikne lineární závislost mezi mřížkovou deformací $\varepsilon_{\varphi\psi}$ a $\sin^2 \psi$, kterou vyjadřuje vztah (2.7). [17]

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{\nu + 1}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi + \frac{-\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (2.7)$$

Následnou derivací vztahu (2.7) podle $\sin^2 \psi$ se získá směrnice přímky $\varepsilon_{\varphi\psi}(\sin^2 \psi)$, vyjádřená rovnicí (2.8), která je dána Youngovým modulem pružnosti E , Poissonovým číslem ν a působícím napětím σ_{φ} . [17]

$$\frac{\partial \varepsilon_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = \frac{\nu + 1}{E} \sigma_{\varphi} \quad (2.8)$$

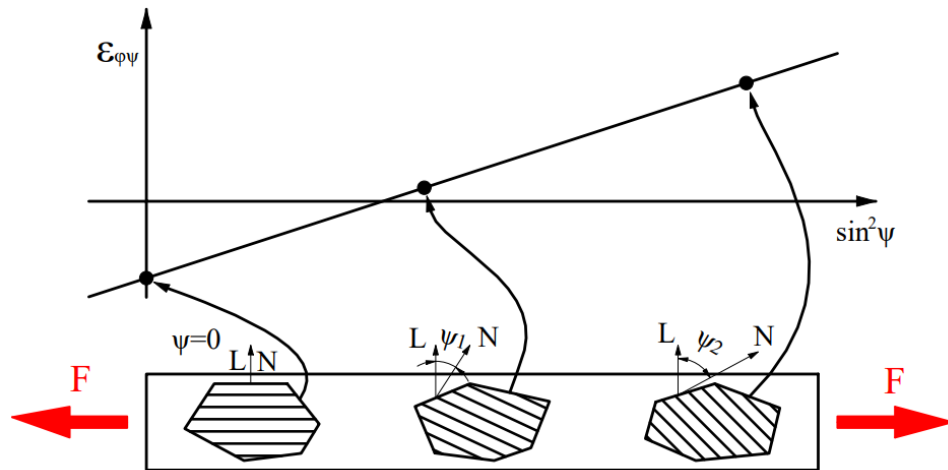
Ztotožněním mřížkové deformace ε a deformace $\varepsilon_{\varphi\psi}$ se získá vztah (2.9). Tento vztah vyjadřuje základní rovnici rentgenografického měření napětí podle tzv. metody $\sin^2 \psi$. [17]

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = -\cot g\theta_0(\theta - \theta_0) = \frac{\nu + 1}{E}\sigma_{\varphi}\sin^2\psi + \frac{-\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (2.9)$$

Ze vztahu (2.3) a (2.8) je získán výsledný vztah pro výpočet složky napětí σ_{φ} , který je dán rovnicí (2.10).

$$\sigma_{\varphi} = -\frac{E}{\nu + 1}\cot g\theta_0\frac{\partial\theta_{\varphi\psi}}{\partial\sin^2\psi} \quad (2.10)$$

K rentgenografickému stanovení složky působícího napětí σ_{φ} metodou $\sin^2\psi$ je potřeba dostatečně přesně určit úhlové polohy $\theta_{\varphi\psi}$ interferenčních linií, získaných difrakcí na vhodných systémech atomových mřížkových rovin $\{hkl\}$ v azimutální rovině $\varphi = konst.$ při různých hodnotách úhlu ψ . Princip této metody $\sin^2\psi$ je schematicky zobrazen na obr. 2.9. [17]



Obr. 2.9 Princip měření napětí metodou $\sin^2\psi$ [17]

Měření napětí prostřednictvím rentgenové difrakční metody má některé specifické rysy, kterými se odlišuje od ostatních metod měření napětí. Mezi tyto specifické rysy patří:

- Schopnost měřit deformace mezirovinných vzdáleností v různých směrech vzhledem k normále na povrch zkoumaného materiálu, a lze tak v mnoha případech stanovit napětí bez znalosti struktury nenapjatého materiálu.
- Získání difrakčních informací pomocí vlnových délek rentgenového záření z poměrně tenké povrchové vrstvy (10^{-2} mm až 10^{-3} mm).

- Měření i velmi nehomogenních napět'ových polí pomocí úzkého svazku paprsků, které dopadají na zkoumaný povrch materiálu. Ozářená plocha materiálu může být menší než 1 mm².
- Možnost stanovení napětí v jednotlivých složkách vícefázových soustav vzhledem k vybrané povaze difrakčního záření.
- Vzájemná separace napětí I. a II. druhu, jelikož makroskopická napětí se projevují změnou polohy difrakčních linií, ale vznik mikroskopických napětí je doprovázen rozšířením linií. [17]

Jelikož se mění vzdálenost rovin v krystalové mřížce pouze elastickou deformací, a ne deformací skluzem, je možné detekovat pomocí rentgenové difrakční metody pouze změny mezivinných vzdáleností odpovídající mechanickým napětím. Rentgenová difrakční analýza je tak omezena pouze na krystalické a polykrystalické materiály. Přesnost a spolehlivost této metody měření napětí klesá s rostoucí velikostí krystalů a jejich preferenční orientací v materiálu. [17]

3 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce byla zaměřena na analýzu zbytkových napětí vzniklých během navařování metodou MAG s ohledem na rozměr vzorku a intenzitu odvodu tepla. Použitým materiálem pro aplikaci návaru byla konstrukční ocel S355J2.

Cílem experimentu bylo navrhnout průběh navařování s následnou analýzou vzniklých zbytkových napětí. Experiment byl navržen tak, aby mohla být zbytková napětí hodnocena s ohledem na rozdílnou geometrii vzorků, zejména na jejich šířku a tloušťku a s tím souvisejícím odvodem tepla. Parametry navařování byly zvoleny tak, aby během procesu byla hodnota vneseného tepla 8 kJ a 14 kJ. Ke stanovení velikosti zbytkových napětí byla zvolena analýza pomocí rentgenové difrakce. Na vzorcích byla následně hodnocena mikrostruktura, doplněná měřeními tvrdosti.

3.1 Charakteristika materiálu

Jak již bylo výše zmíněno, pro experiment byla zvolena konstrukční ocel S355J2. Materiál byl dodán v podobě válcované pásoviny. Kontrola chemického složení dodaného materiálu byla provedena pomocí ručního rentgen-fluorescenčního spektrometru (ED-XRF) Delta viz obr. 3.1.



Obr. 3.1 Ruční rentgen-fluorescenční spektrometr [19]

Naměřené hodnoty chemického složení jsou uvedeny v tab. 3.1 a pro porovnání jsou v tab. 3.2 uvedeny hodnoty chemického složení podle materiálového listu.

Tab. 3.1 Naměřené chemické složení oceli S355J2 v hm. [%]

Měření	Si	S	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	0,280	0,007	0,037	0,034	1,150	98,250	0,060	0,180	0,010
2	0,230	0,006	0,043	0,027	1,170	98,300	0,070	0,140	0,012

Tab. 3.2 Chemické složení oceli S355J2 v hm. [%] podle materiálového listu [20]

C	Si	Mn	P	S	Cu
≤ 0,20	≤ 0,55	≤ 1,60	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,55

Následně byly ověřeny mechanické vlastnosti materiálu pomocí statické zkoušky tahem, která probíhala při pokojové teplotě v souladu s normou EN ISO 6892-1 na zařízení TIRA test 2300 s rychlostí posuvu 15 mm·min⁻¹. Průměrné naměřené hodnoty mechanických vlastností jsou uvedeny v tab. 3.3 a pro kontrolu jsou v tab. 3.4 uvedeny katalogové hodnoty.

Tab. 3.3 Naměřené průměrné hodnoty mechanických vlastností zkouškou tahem

Horní mez kluzu R _{eH} [MPa]	Dolní mez kluzu R _{eL} [Mpa]	Mez pevnosti R _m [Mpa]	Homogenní tažnost A _g [%]	Celková tažnost A _{40mm} [%]
419,8 ± 42,6	379,7 ± 2,3	521,6 ± 4,3	15,18 ± 0,25	31,20 ± 0,82

Tab. 3.4 Mechanické vlastnosti podle materiálového listu [20]

Horní mez kluzu R _{eH} [MPa]	Mez pevnosti R _m [Mpa]	Tažnost A [%]
min 355	470 - 630	min 22

3.1.1 Konstrukční ocel S355J2

Ocel S355J2 se řadí mezi konstrukční nelegované jakostní oceli a je vhodná ke svařování všemi používanými způsoby svařování. Nelegované oceli jsou vhodné ke svařování pouze v případě, pokud jsou dodány v jakostním stupni JR, J0, J2 a K2, s tím, že jejich svařitelnost vzrůstá od jakostního stupně JR po stupeň K2. Svařitelnost je také zejména ovlivněna jejich chemickým složením, přičemž výrobci běžně garantují pouze obsah C, Mn, Si, P a S. [7] [21]

S rostoucí tloušťkou a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se u této oceli zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti svaru. Tato ocel se vyznačuje vysokou pevností a tažností, dobrým opracováním, jemným zrnem a zaručenou svařitelností při zvýšené mezi kluzu. Používá se pro výrobu strojních součástí, motorů i celých strojů. Z této oceli jsou také vytvářeny tlakové trubky, mosty, nádrže a konstrukční prvky strojů. [22] [23]

3.2 Příprava vzorků

Pro experiment byly z výchozích profilů nařezány na pásové pile a obroušeny 4 vzorky na rozměr 100 x 100 x 12 mm, 6 vzorků na rozměr 150 x 100 x 12 mm a 4 vzorky s rozměry 150 x 100 x 8 mm. Vzhledem k zamýšlenému měření zbytkových napětí rentgenovou difrakcí bylo důležité dbát na přípravu vzorků. Měření zbytkových napětí použitou metodou se omezuje na oblast do hloubky několika mikrometrů, a tak mohou být výsledky měření značně ovlivněny zpevněním povrchové vrstvy po předcházejícím technologickém zpracování nebo napětím vzniklým během přípravy vzorků. K eliminaci těchto jevů bylo na vzorky aplikováno žíhání ke snížení zbytkových napětí. Žíhání probíhalo ve vakuové peci Reetz viz obr. 3.2 při zvolené teplotě ohřevu 550 °C s časem výdrže na teplotě po dobu 2 hod. Parametry žíhání byly zvoleny na základě předchozích experimentů s materiály podobného typu.



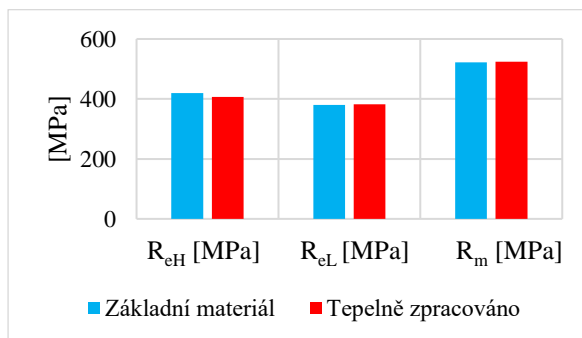
Obr. 3.2 Vakuová pec Reetz

Dále byly z vyžíhaného materiálu připraveny vzorky pro statickou zkoušku tahem, kterou bylo ověřeno, zda při žíhání nedošlo i k podstatné změně mechanických vlastností. Průměrné hodnoty naměřených mechanických vlastností tepelně zpracovaného materiálu jsou uvedeny v tab. 3.5.

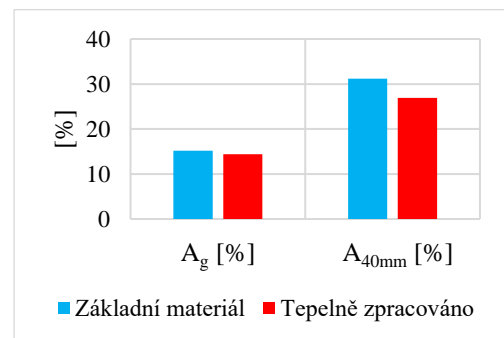
Tab. 3.5 Naměřené průměrné hodnoty mechanických vlastností oceli S355J2 po žíhání

Horní mez kluzu R_{eH} [MPa]	Dolní mez kluzu R_{eL} [Mpa]	Mez pevnosti R_m [Mpa]	Homogenní tažnost A_g [%]	Celková tažnost A_{40mm} [%]
407,0 ± 16,3	381,7 ± 5,1	523,9 ± 0,9	14,40 ± 0,45	26,90 ± 1,80

V grafu na obr. 3.3 a obr. 3.4 jsou porovnány průměrné naměřené hodnoty s průměrnými hodnotami naměřenými tahovou zkouškou u materiálu ve výchozím stavu.



Obr. 3.3 Závislost R_{eH} , R_{eL} a R_m na tepelném zpracování (průměrné hodnoty)

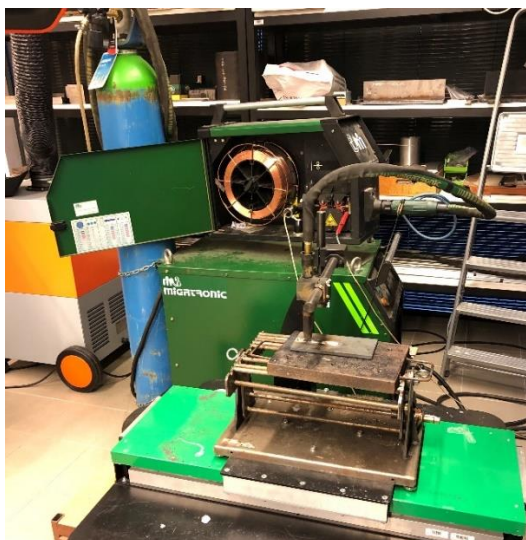


Obr. 3.4 Závislost A_g a A_{40mm} na tepelném zpracování (průměrné hodnoty)

Z výše uvedených grafů je patrné, že během žíhání na odstranění zbytkových napětí nedošlo u materiálu k výrazné změně mechanických vlastností.

3.3 Průběh navařování

Pro navařování na vyžíhané vzorky byla zvolena metoda MAG s ohledem na její široké pásmo využití. Navařování bylo realizováno pomocí sestavy viz obr. 3.5 skládající se ze svařovacího zdroje Migatronik BDH 550 Plus Sync, jehož hořák byl propojen se zařízením s nastavitelnou konstantní rychlostí posuvu pracovního stolu od 30 do 255 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$. Jako svarový kov byl použit plný drát OK Autrod 12.51 o průměru 1,2 mm. Během navařování tvořila ochranou atmosféru svarové lázně směs plynu M21 (Ar 82 %, CO₂ 18 %) podle normy EN ISO 14175.



Obr. 3.5 Svařovací zařízení Migatronik BHD 550 Plus Sync

Navarování probíhalo v PA poloze dle normy ISO 6947, kdy osa hořáku svírá úhel 90° vzhledem k povrchu základního materiálu. Vzdálenost svařovací trysky od povrchu základního materiálu byla nastavena na 14 mm. Svařovací proud zařízení byl nastaven na 300 A, přičemž konstantní rychlost posuvu byla zvolena 39 a 69 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ s cílem dosáhnout hodnoty vneseného tepla 8 kJ a 14 kJ podle vztahu (3.1).

$$Q = \frac{U \cdot I}{v} \quad (3.1)$$

Kde:

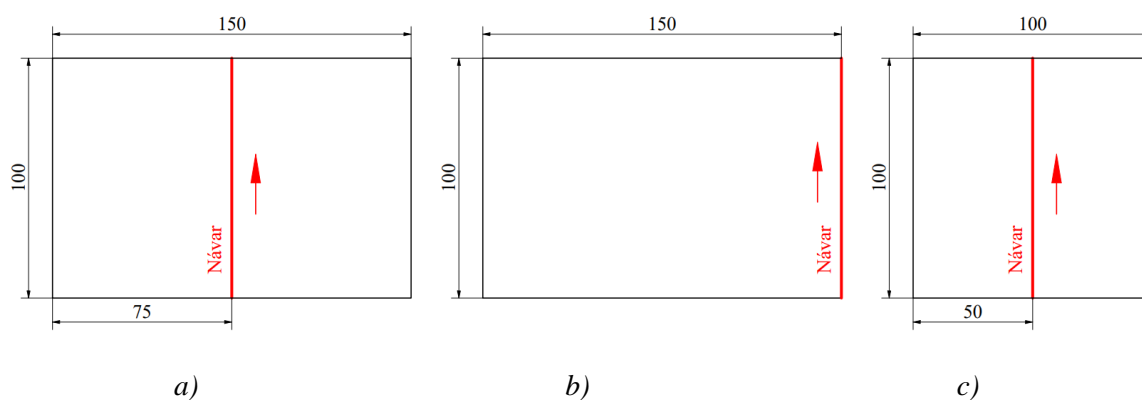
- Q – vnesené teplo [$\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$],
 U – napětí [V],
 I – proud [A],
 v – rychlost posuvu [$\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$].

Během navařování byly pro kontrolu zaznamenány skutečné hodnoty proudu a napětí při rozdílných rychlostech posuvu. Průměrné naměřené hodnoty skutečných parametrů během navařování jsou uvedeny v tab. 3.6.

Tab. 3.6 Nastavené a skutečné hodnoty navařování

Nastavený proud I [A]	Skutečný proud I [A]	Napětí U [V]	Rychlost posuvu v [cm·min ⁻¹]	Vnesené teplo Q [kJ·cm ⁻¹]
300	323,8 ± 1,9	27,9 ± 0,2	69	7,8 ± 0,1
300	317,3 ± 1,8	28,1 ± 0,1	39	13,7 ± 0,1

Navařování na vzorky probíhalo vždy kolmo k delší straně viz obr. 3.6. Návar byl u 4 destiček s rozměry 150 x 100 x 12 mm aplikován jak v upnutém stavu, tak neupnutém stavu na střed vzorku, přičemž byly použity obě hodnoty vneseného tepla (8 kJ i 14 kJ). Dále byl na dva neupnuté vzorky s rozměry 150 x 100 x 12 mm umístěn návar na okraj vzorku, při vneseném teple během navařování 8 kJ a 14kJ. Následně proběhlo navařování na 4 vzorky s rozměry 100 x 100 x 12 mm, s návarem umístěným na středu vzorku. Navařování probíhalo s vneseným teplem 8 kJ na upnutý a neupnutý vzorek a stejně tak s vneseným teplem 14 kJ. Nakonec proběhlo navařování na 4 vzorky s rozměry 150 x 100 x 8 mm. Navařování probíhalo na střed vzorku s vneseným teplem 8 kJ a 14 kJ na upnutý a neupnutý vzorek. K ochlazování vzorků docházelo vždy na vzduchu o pokojové teplotě.



Obr. 3.6 Pozice umístění návvaru na jednotlivé vzorky a) 150 x 100 x 12 mm a 150 x 100 x 8 mm, b) 150 x 100 x 12 mm, c) 100 x 100 x 12 mm

3.4 Způsob měření zbytkových napětí

K měření zbytkových napětí byla použita metoda rentgenové difrakce. Měření bylo realizováno na zařízení PROTO iXRD COMBO, viz obr. 3.7 Použité parametry měření jsou uvedeny v tab. 3.7. Analýza zbytkových napětí byla provedena pomocí softwaru XRD Win 2000.



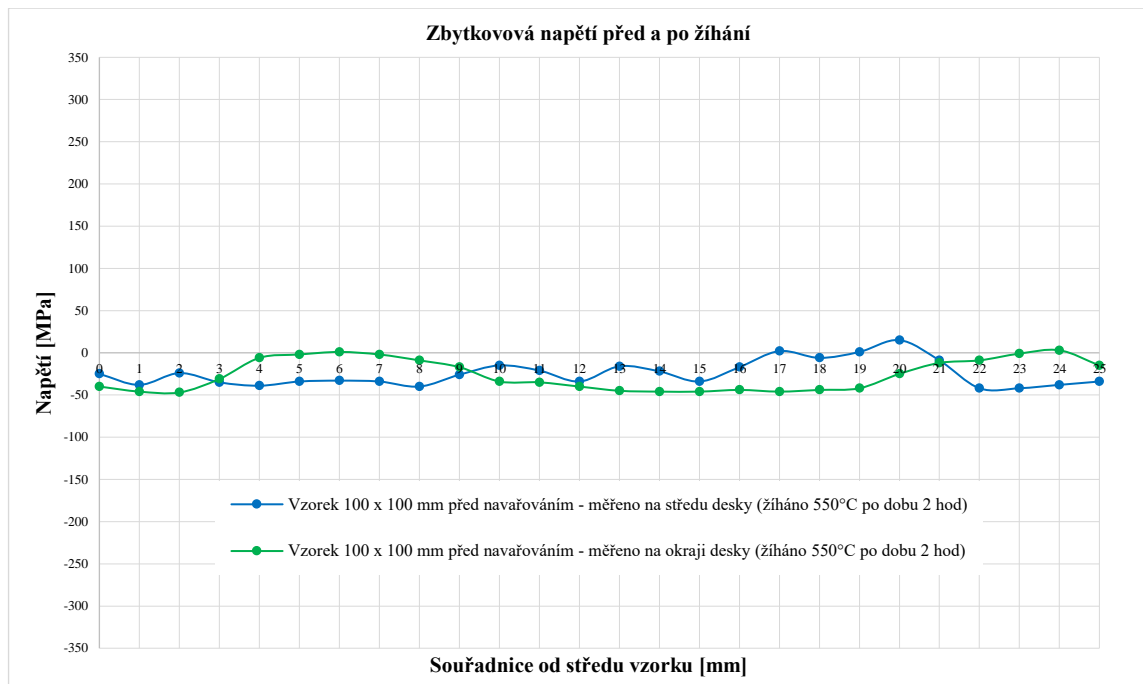
Obr. 3.7 Zařízení PROTO iXRD COMBO

Tab. 3.7 Parametry difrakčního měření

Rentgenka	Cr anoda
Doba expozice	1 s
Kolimátor	ø 1 mm
Oscilace rentgenky β	$\pm 5^\circ$
Lineární oscilace	± 1 mm
Počet náklonů úhlu β	13
Difrakční maxima	26

3.4.1 Stanovení referenčních hodnot napětí

Nejprve bylo provedeno měření zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakce na dvou vyžehnaných vzorkách. Tímto měřením bylo možné ověřit, zda byly parametry žíhání na odstranění zbytkových napětí dostačující. Poloha měření zbytkových napětí u žíháných vzorků byla zvolena na středu a na okraji vzorku. Naměřené hodnoty zbytkových napětí byly graficky zpracovány a jsou zobrazeny na obr. 3.8.

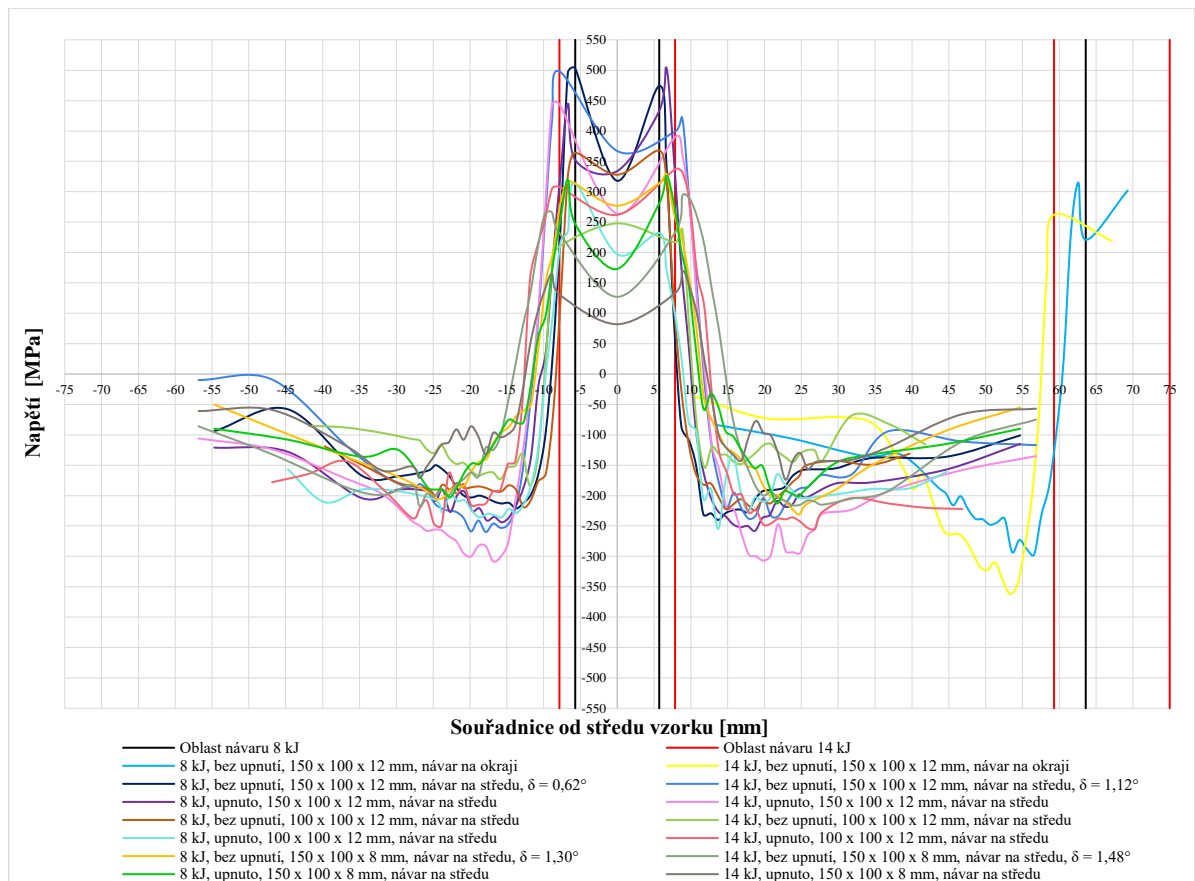


Obr. 3.8 Zbytková napětí v materiálu před svařováním

Modrá a zelená křivka představují průběh vnitřních napětí po žihání při teplotě 550 °C s dobou výdrže na teplotě 2 hod. Žiháním došlo k poklesu zbytkových napětí na hodnoty pohybující se kolem nulového napětí, a ukázalo se tak, že parametry žihání ke snížení zbytkových napětí byly dostačující. Tyto hodnoty zbytkových napětí po žihání bylo možné použít jako referenční hodnoty pro analýzu velikosti a průběhu zbytkových napětí, vzniklých během navařování.

3.5 Vyhodnocení zbytkových napětí po navařování

Po vytvoření návarů bylo možné přejít k měření vnitřních zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakční metody. Pro měření byla zvolena linie bodů od středu svaru do vzdálenosti 50 mm. V okolí svaru byla vzdálenost mezi body 1 mm, dále od svaru, kde nebyly předpokládány tak výrazné změny, bylo měřeno po 5 resp. 10 mm. Měření zbytkových napětí probíhalo ve směru kolmém na osu návaru. Na vzorkách, na kterých byl návar umístěn na střed, probíhalo měření na obě strany od svaru a byl předpokládán symetrický průběh naměřených napětí. U návaru, který byl umístěn na okraji desky, probíhalo měření pouze na jednu stranu. Naměřené hodnoty zbytkových napětí byly graficky zpracovány a jejich průběh je zobrazen na obr. 3.9.



Obr. 3.9 Průběh naměřených podélných zbytkových napětí

Ve výše uvedeném grafu jsou vidět změny v průběhu zbytkových tahových a tlakových napětí vzniklých v materiálu během teplotních procesů při navařování s rozdílnou hodnotou vneseného tepla, geometrií zkušebního tělesa a pozicí umístění návaru. Z průběhu hodnot zbytkových napětí je také vidět změna v průběhu napětí, kdy byl návar aplikován na upnutý a neupnutý vzorek. U návaru na okraji vzorku dosahovala tahová napětí nižších hodnot nežli na středu a zejména tlaková napětí zde dosahovala větších hodnot, zřejmě vlivem rychlejšího odvodu tepla. Pokles tahových napětí a zvýšení tlakových napětí zřejmě také souvisí s jedním volným koncem vzorku, kdy mohl materiál volně dilatovat. Průběhy zbytkových napětí u návaru na středu desky byly podle očekávání symetrické a z jejich průběhů je vidět, že k největšímu nárůstu zbytkových tahových i tlakových napětí po navařování došlo u vzorků s rozměry 150 x 100 x 12 mm, kdy byl návar umístěn na středu desky. Během navařování s hodnotou vneseného tepla 8 kJ v těchto deskách vznikla zbytková napětí s téměř identickým průběhem jako při navařování s vneseným teplem 14 kJ. U neupnutého vzorku vznikla menší úhlová deformace po navařování s menší hodnotou vneseného tepla. U vzorků s rozměry 100 x 100 x 12 mm a 150 x 100 x 8 mm, které mají v porovnání se

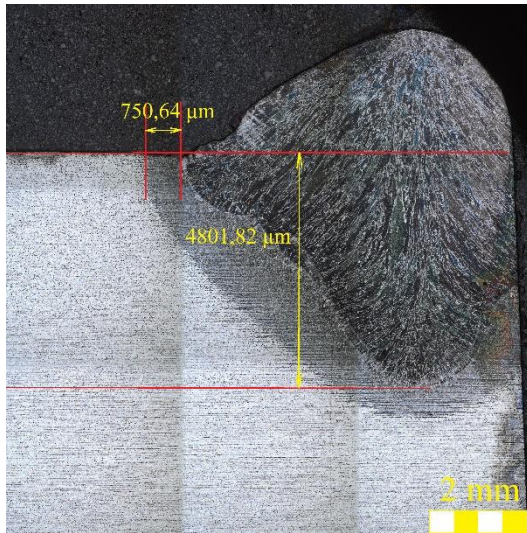
vzorky s rozměry 150 x 100 x 12 mm poměr objemů 2/3, došlo k výraznému poklesu zbytkových napětí. Nejnižší hodnoty zbytkových tahových i tlakových napětí byly naměřeny u vzorku s tloušťkou 8 mm, který byl během navařování s hodnotou vneseného tepla 14 kJ upnut. V neupnutém vzorku s tloušťkou 8 mm při stejné hodnotě vneseného tepla vznikla největší oblast tahových napětí. U neupnutých vzorků s tloušťkou 8 mm vznikla větší úhlová deformace na vzorku po navařování s hodnotou vneseného tepla 14 kJ.

3.6 Příprava metalografických vzorků

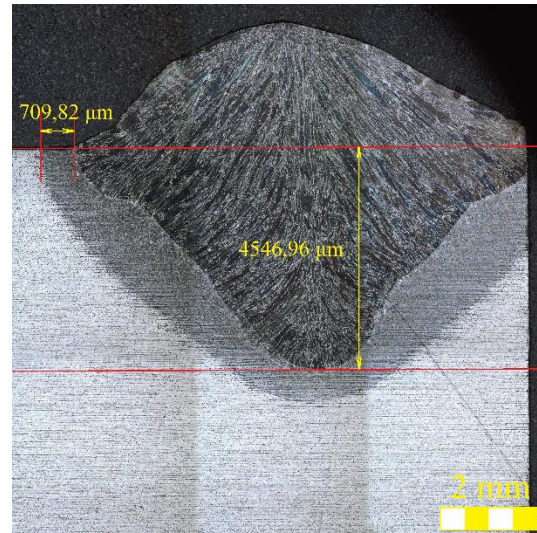
Odběr vzorků probíhal v místě návaru kolmo na směr navařování pomocí metalografické kotoučové pily s přívodem chladicí tekutiny, která zabraňovala tepelnému ovlivnění materiálu. Následně byly vzorky preparovány do vytvrditelné pryskyřice obsahující přídavek uhlíku pomocí modulárního metalografického lisu. Povrchy vzorků byly broušeny a leštěny na automatické metalografické brusce. Pro broušení byly použity SiC brusné papíry se zrnitostí 220, 500, 800, 1200, 2000, 4000 a pro leštění leštící plátno se suspenzí o zrnitosti 3 μm a 1 μm . Konečnou fází přípravy metalografického výbrusu bylo chemické leptání 3 % roztokem kyseliny dusičné v ethanolu tzv. nitalem, během kterého došlo k zvýraznění strukturních fází.

3.7 Strukturní změny v oblasti návaru

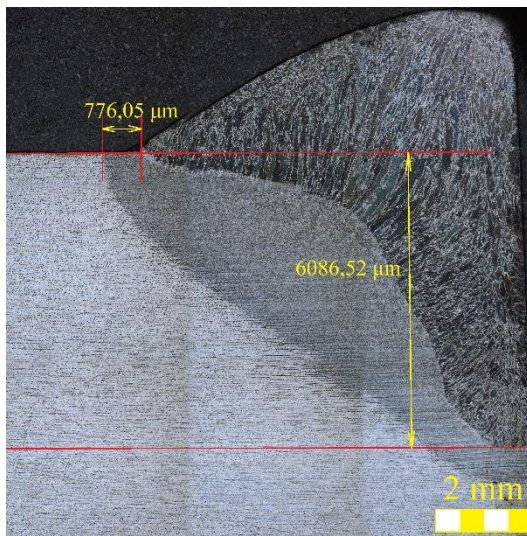
Při navařování došlo vlivem teplot k fázovým přeměnám. Struktura návaru byla nejprve na metalografických výbrusech pozorována pomocí optického digitálního mikroskopu Olympus DSX 500. Na obr. 3.10 jsou zobrazeny snímky oblasti návaru z optického mikroskopu. Během navařování s rozdílnou hodnotou vneseného tepla došlo ke vzniku návaru s rozdílnou hloubkou průvaru a s rozdílnou velikostí TOO. Při hodnotě vneseného tepla 8 kJ došlo během navařování ke vzniku menší tepelně ovlivněné oblasti s menší hloubkou průvaru, nežli při hodnotě vneseného tepla 14 kJ, ale na povrchu, kde docházelo k měření zbytkových napětí byla šířka TOO přibližně stejná.



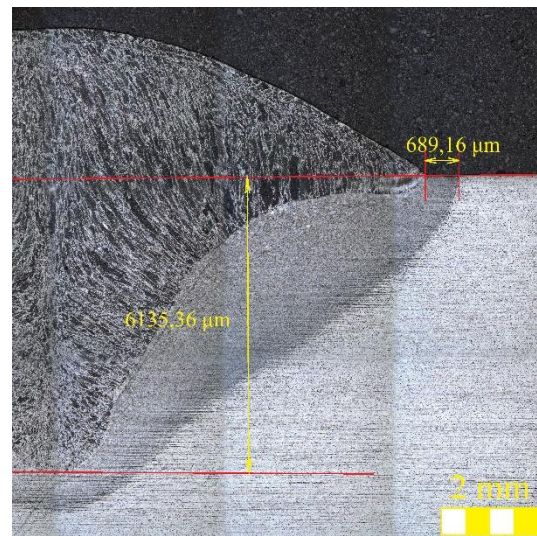
150x100x12mm, 8kJ, střed, upnut



150x100x12mm, 8kJ, na okraji, neupnut



150x100x12mm, 14kJ, střed, upnut



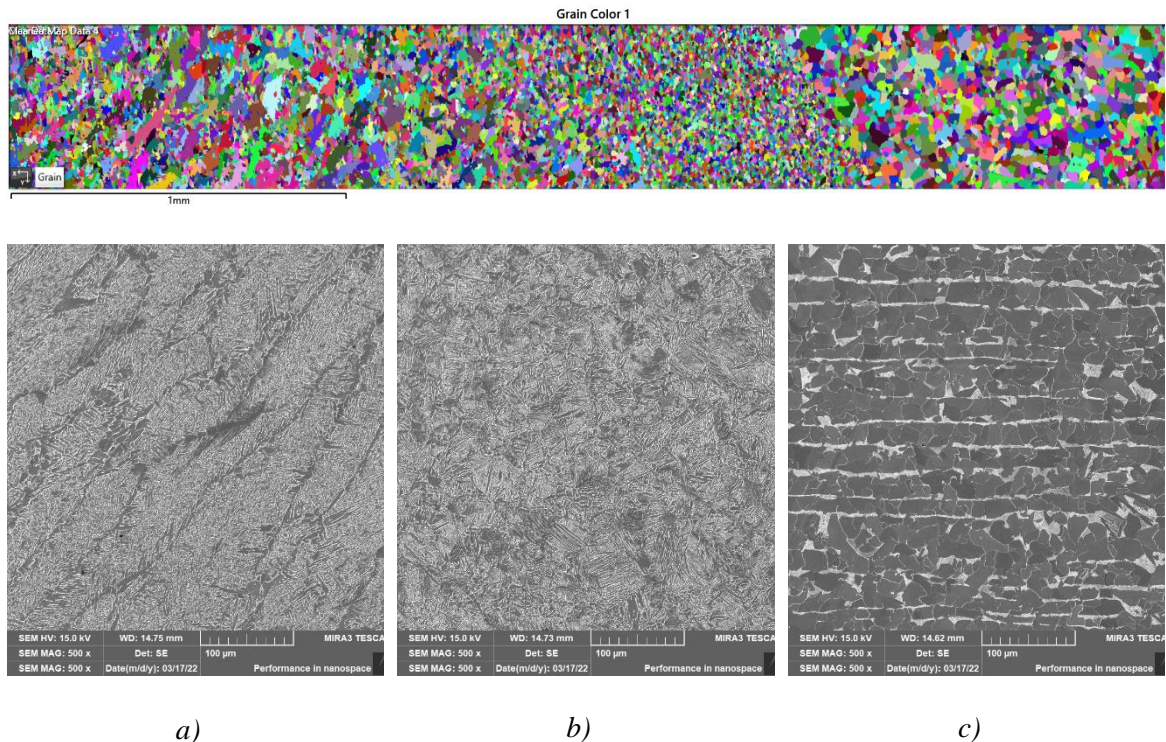
150x100x12mm, 14kJ, na okraji, neupnut

Obr.3.10 Fázové změny v oblasti návaru

3.7.1 Mikrostruktura

Mikrostruktura povrchu metalografických vzorků byla pozorována pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu TESCAN MIRA 3. Snímání povrchu probíhalo detektorem sekundárních elektronů při použitím urychlovacím napětím 15 kV. Elektronovým mikroskopem byla sledována mikrostruktura základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. Na obr. 3.11 jsou zobrazeny snímky těchto mikrostruktur. Na metalografických výbrusech byla také provedena EBSD analýza. Snímání probíhalo

s krokem snímání 1,5 μm a velikostí snímané plochy 3500 x 500 μm . Snímek z EBSD analýzy je zobrazen na obr. 3.11, pod kterým jsou zobrazeny snímky mikrostruktury příslušné oblasti.



Obr.3.11 Snímek z EBSD analýzy s příslušnými snímky mikrostruktury po navařování a) Svarový kov, b) TOO, c) Základní materiál

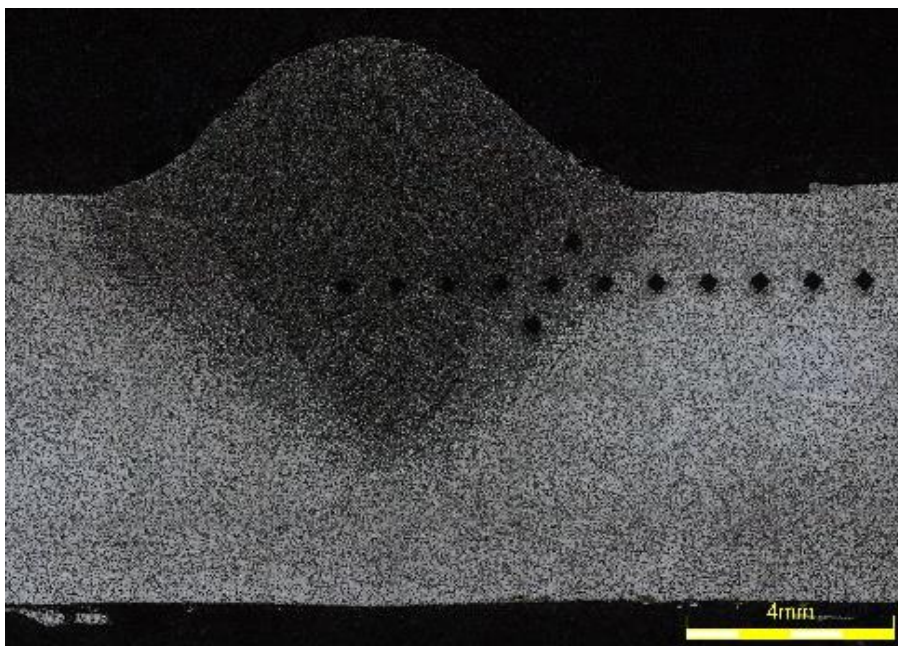
Ze snímku pořízeného EBSD analýzou je vidět změna velikosti zrn po navařování, a to zejména zjemnění zrn v tepelně ovlivněné oblasti. Ke zjemnění zrna došlo obdobně jako při termomechanickém zpracování. Ohřátá TOO dilatovala, ale okolní chladný materiál ji bránil v rozpínání a vzniklé vnitřní napětí tak mělo efekt na zjemnění zrna. Mikrostruktura svarového kovu je tvořena bainitickou strukturou, kdy je vidět růst bainitu ve směru gradientu teploty. Na snímku mikrostruktury tepelně ovlivněné oblasti je vidět změna struktury při procesu navařování, kdy došlo během fázových změn ke vzniku jehlicovité bainitické mikrostruktury. Mikrostruktura základního materiálu je tvořena poměrně hrubými zrny feritu a perlitu s viditelnou řádkovitostí, která vznikla vlivem plastické deformace při předchozím technologickém zpracování.

3.8 Měření tvrdosti

Na metalografických výbrusech byla následně měřena tvrdost zkouškou tvrdosti podle Vickerse. Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-1 a k měření tvrdosti byl použit tvrdoměr Qness Q30A s vyhodnocovacím softwarem Opix control. Indentorem byl diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° a pro měření tvrdosti byla zvolena varianta HV10. Místa vpichu byla zvolena tak, aby 3 vpichy byly v místě návaru, 1 vpich na hranici svaru a TOO, 3 vpichy v místě TOO, 1 vpich na hranici TOO a základního materiálu a 5 vpichů v základním materiálu viz obr. 3.12 a obr 3.13.



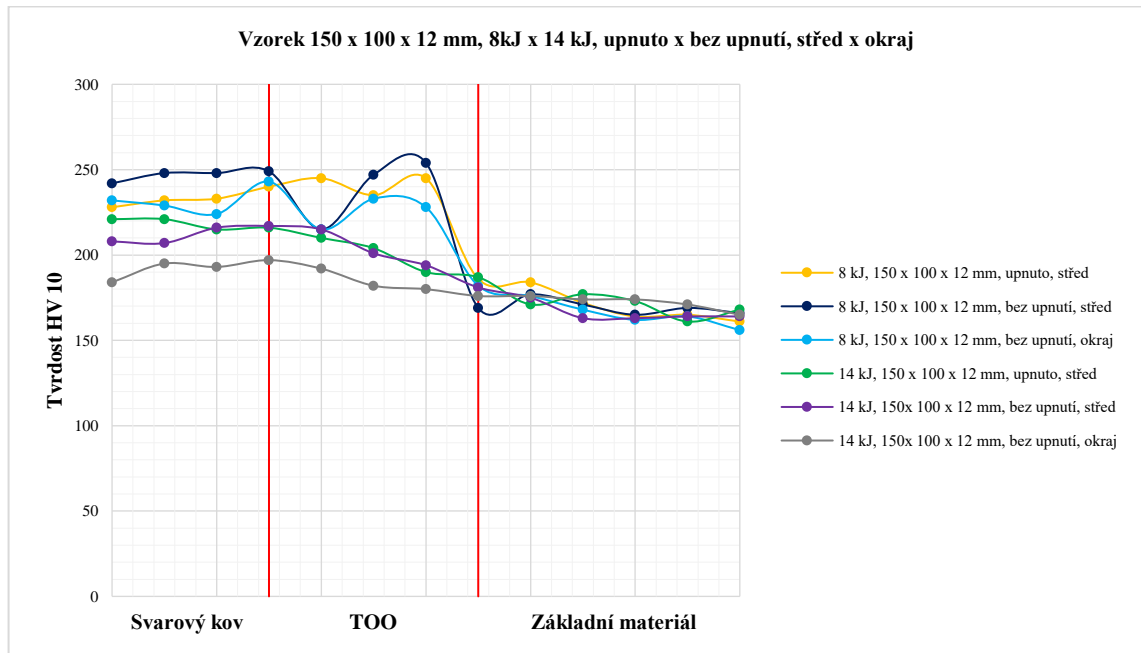
Obr.3.12 Místa vpichu na vzorku s hodnotou vneseného tepla při navařování 14 kJ



Obr.3.13 Místa vpichu na vzorku s hodnotou vneseného tepla při navařování 8 kJ

3.9 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti

Nejprve byla sledována tvrdost na vzorcích s rozměry 150 x 100 x 12 mm, kdy byly během navařování použity obě hodnoty vneseného tepla (8 kJ i 14 kJ) na upnuté a neupnuté vzorky. Pozice návaru byla na středu a na okraji desky. Naměřené hodnoty tvrdosti byly graficky zpracovány a jejich průběh je zobrazen v grafu na obr. 3.14.

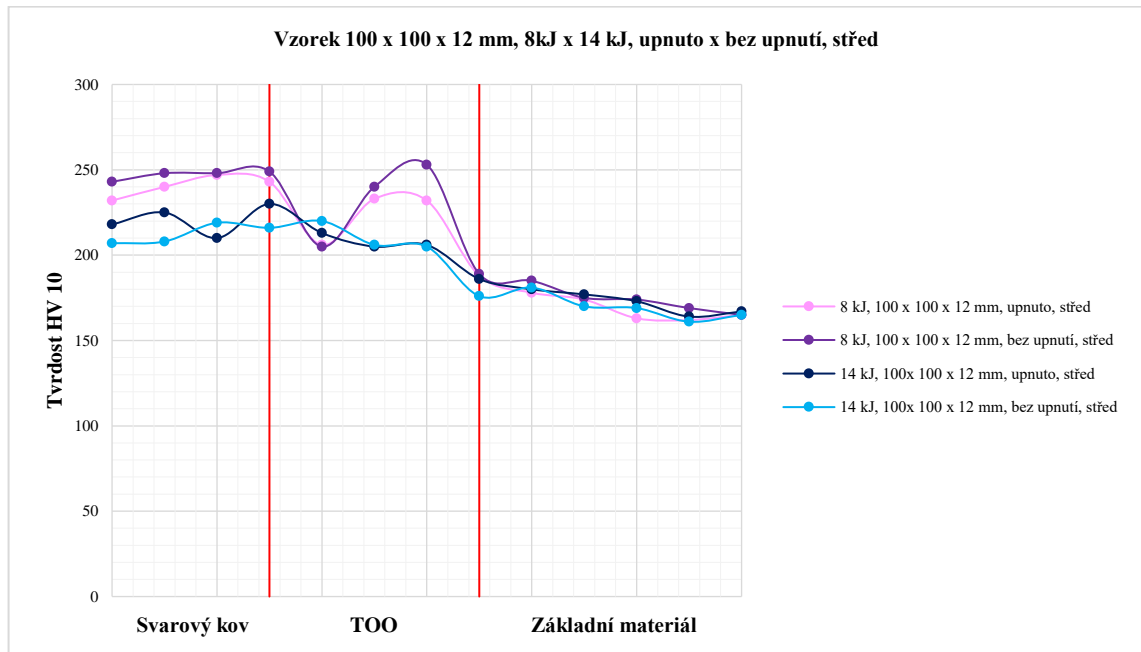


Obr.3.14 Průběh tvrdosti oblastí návaru ve vzorcích s rozměry 150 x 100 x 12 mm

Z grafu je vidět klesající průběh tvrdostí jednotlivými oblastmi. Nejmenší hodnoty tvrdosti byly naměřeny v oblasti základního materiálu. V oblasti návaru a TOO dosahovala tvrdost u jednotlivých měření přibližně stejných hodnot. S klesající velikostí zrn roste tvrdost i pevnost a v oblasti základního materiálu se nacházejí největší zrna, zatímco tvrdost a pevnost v oblasti návaru je dána legurami přídavného materiálu a v TOO zjemněním zrna při normalizaci. Nejvyšší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u vzorků, u kterých byla během navařování hodnota vneseného tepla 8 kJ, jelikož po navařování s menší hodnotou vneseného tepla dochází k rychlejšímu ochlazování a ke vzniku více bainitu ve struktuře. S ohledem na pozici návaru byly nejmenší hodnoty tvrdosti naměřeny na deskách s návarem na okraji. U těchto vzorků docházelo oproti vzorkům s návarem na středu desky k odvodu tepla jen jedním směrem.

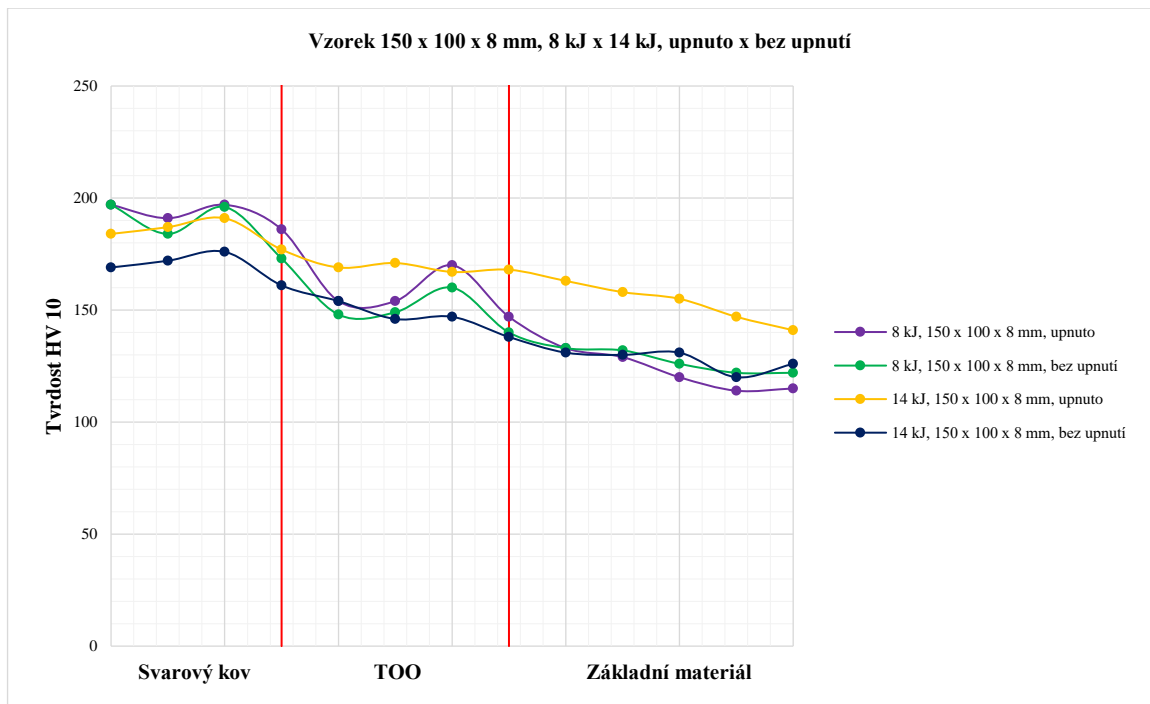
Dále byla hodnocena tvrdost vzorků s rozměry 100 x 100 x 12 mm, kdy probíhalo navařování s rozdílnou hodnotou vneseného tepla 8 kJ i 14 kJ na upnuté a neupnuté vzorky.

Pozice návaru byla na středu vzorku. Naměřené hodnoty tvrdosti byly opět graficky zpracovány a jejich průběh je zobrazen v grafu na obr. 3.15.



Obr.3.15 Průběh tvrdosti oblastí návaru ve vzorkách s rozměry 100 x 100 x 12 mm

Z grafu je vidět průběh tvrdosti jednotlivými oblastmi, kdy jsou opět nejmenší hodnoty tvrdosti naměřeny v základním materiálu a největší v oblasti svarového kovu a TOO. Největší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u vzorků, u kterých byla hodnota vneseného tepla během navařování 8 kJ. Po navařování s menší hodnotou vneseného tepla docházelo k rychlejšímu ochlazení, při kterém vzniklo ve struktuře více bainitu. Tvrdost u těchto vzorků dosahovala podobných hodnot jako tvrdost u vzorků s rozměry 150 x 100 x 12 mm. Nakonec proběhlo měření tvrdosti vzorků s rozměry 150 x 100 x 8 mm, kdy probíhalo navařování s rozdílnou hodnotou vneseného tepla 8 kJ i 14 kJ na upnuté a neupnuté vzorky. Pozice návaru byla na středu desky. Naměřené hodnoty tvrdosti byly opět graficky zpracovány a jejich průběh je zobrazen v grafu na obr. 3.16.



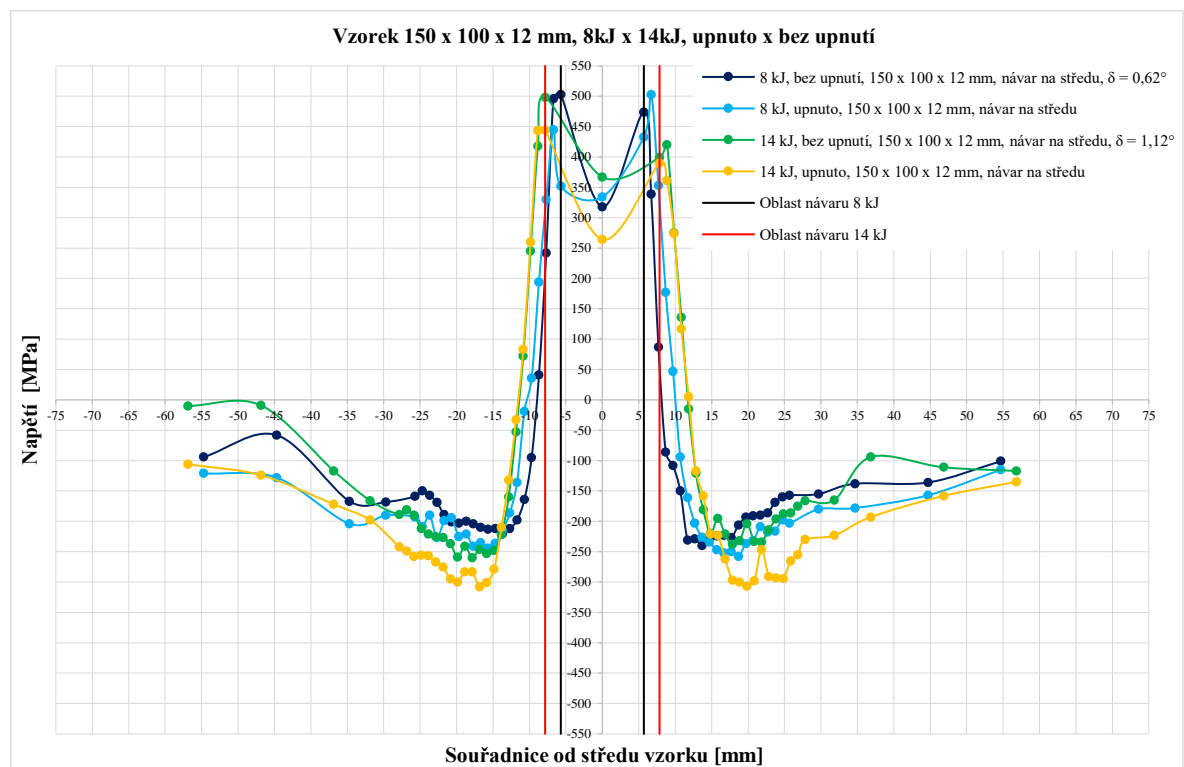
Obr.3.16 Průběh tvrdosti oblastí návaru ve vzorkách s rozměry 150 x 100 x 8 mm

Z průběhu křivek jednotlivými oblastmi je vidět, že největší hodnoty tvrdosti byly naměřeny v oblasti svaru a TOO a nejmenší hodnoty v oblasti základního materiálu. U vzorků s rozměry 150 x 100 x 8 mm byly naměřeny menší hodnoty tvrdosti, nežli u vzorků s rozměry 150 x 100 x 12 mm a 100 x 100 x 12 mm, jelikož u desek s tloušťkou 8 mm došlo k rychlejšímu prohrátí a během pomalejšího ochlazování vzniklo ve struktuře méně bainitu.

4 Diskuse výsledků

Cílem experimentální části této diplomové práce bylo navržení průběhu navařování na vzorky s rozdílnou geometrií a při rozdílné hodnotě vneseného tepla, aby mohla být následně stanovena zbytková napětí s ohledem na intenzitu odvodu tepla. Analýza zbytkových napětí probíhala pomocí difrakční metody.

Nejprve byl sledován průběh zbytkových napětí vzniklých během navařování s hodnotou vneseného tepla 8 kJ a 14 kJ na vzorky s rozměry 150 x 100 x 12 mm, jak v upnutém, tak neupnutém stavu. V upnutých deskách byl očekáván nárůst zbytkových napětí, jelikož bylo upnutím zamezeno vzniku deformací, do kterých by se mohlo napětí uvolnit. Graficky zpracovaný průběh naměřených hodnot zbytkových napětí je zobrazen na obr. 3.17.

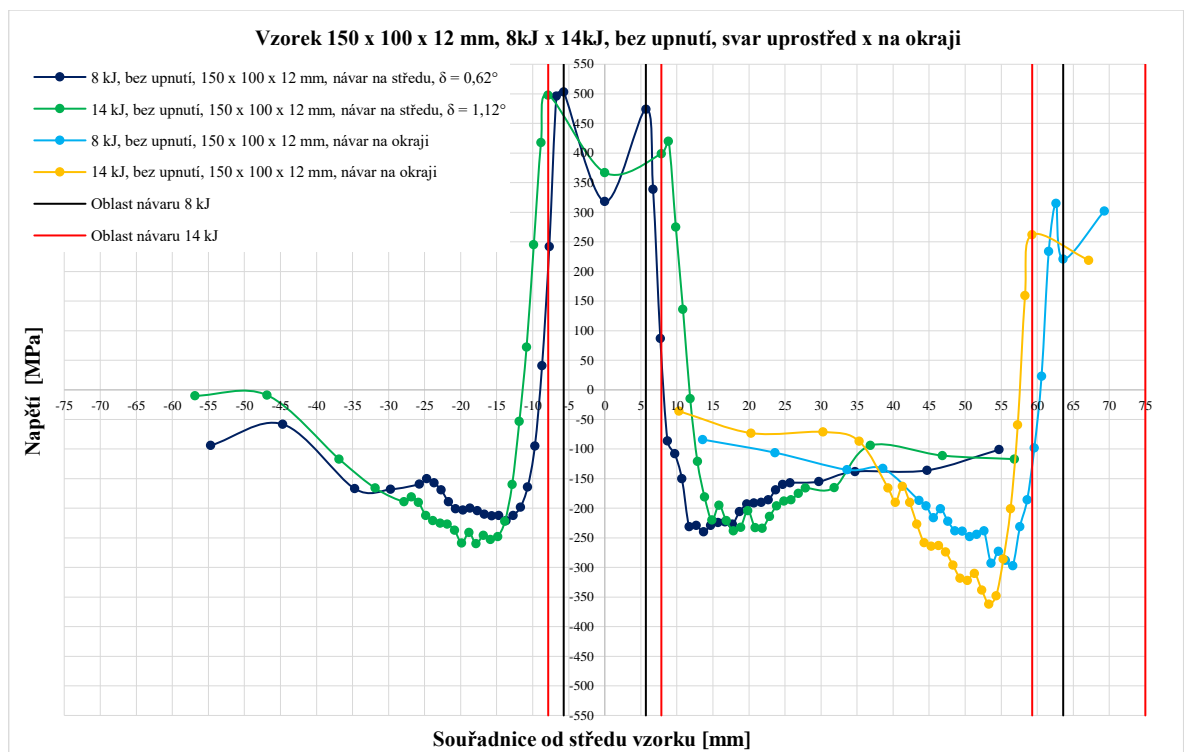


Obr.3.17 Průběh zbytkových napětí po navařování na vzorky s rozměry 150 x 100 x 12 mm

Z grafu je vidět, že při navařování s vneseným teplem 8 kJ a 14 kJ vznikla zbytková napětí s téměř identickým průběhem napětí. Při 14 kJ dosahovala zbytková tlaková napětí větších hodnot, což může být způsobeno pomalejším odvodem tepla. Nárůst zbytkových napětí v upnutých deskách se nepotvrdil, jelikož zbytková tahová napětí dosahovala maximálních hodnot cca 500 MPa, a tedy i meze kluzu vzniklé bainitické struktury v okolí návaru.

U neupnutých desek se projevila pouze vzniklá deformace, která byla větší při navařování s větší hodnotou vneseného tepla.

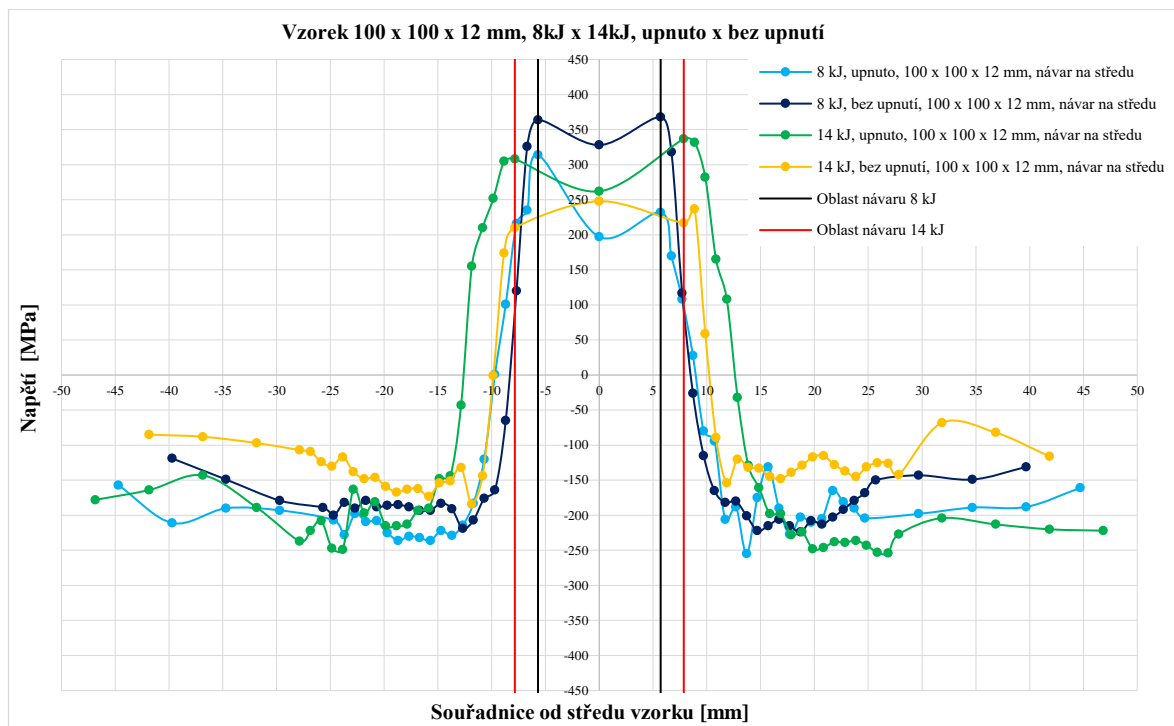
Dále byl sledován vliv intenzity odvodu tepla na velikost zbytkových napětí na deskách s rozměry 150 x 100 x 12 mm, na kterých byl návar umístěn na okraji vzorku. U návaru na okraji desky byl očekáván pokles zbytkových napětí, způsobený efektivnějším odvodem tepla sáláním nežli na středu desky, a také volným koncem materiálu, který mohl dilatovat. Průběh naměřených hodnot zbytkových napětí je zobrazen na obr. 3.18, kde jsou pro porovnání zobrazeny i průběhy zbytkových napětí neupnutých vzorků se stejnou geometrií, ale s návarem na středu.



Obr.3.18 Průběh zbytkových napětí po navařování na středu a okraji vzorku

Z křivek, které představují průběh zbytkových napětí vzniklých po navařování na okraji vzorků, je při porovnání s průběhem zbytkových napětí na středu desky vidět pokles tahových napětí v okolí návaru. Zbytková tahová napětí dosahovala v blízkosti návaru na okraji vzorku maximálních hodnot 300 MPa. V TOO došlo k nárůstu tlakových napětí, a to přibližně o 100 MPa. Pokles tahových napětí v okolí návaru a nárůst tlakových napětí v TOO byl způsoben jak volnou deformací materiálu do prostoru, tak i rychlejším odvodem tepla sáláním.

Dále byla pozorována vzniklá zbytková napětí po navařování s rozdílnou hodnotou vneseného tepla na upnuté a neupnuté vzorky s rozměry 100 x 100 x 12 mm. Na těchto vzorkách byl očekáván pokles zbytkových napětí, vlivem menšího objemu v poměru 2/3 a menší šířky, v porovnání se vzorkem s rozměry 150 x 100 x 12 mm. Poměr objemů byl přibližně stejný jako poměr šířek TOO. Naměřené hodnoty zbytkových napětí v deskách s rozměry 100 x 100 x 12 mm a jejich průběh je zobrazen na obr. 3.19.



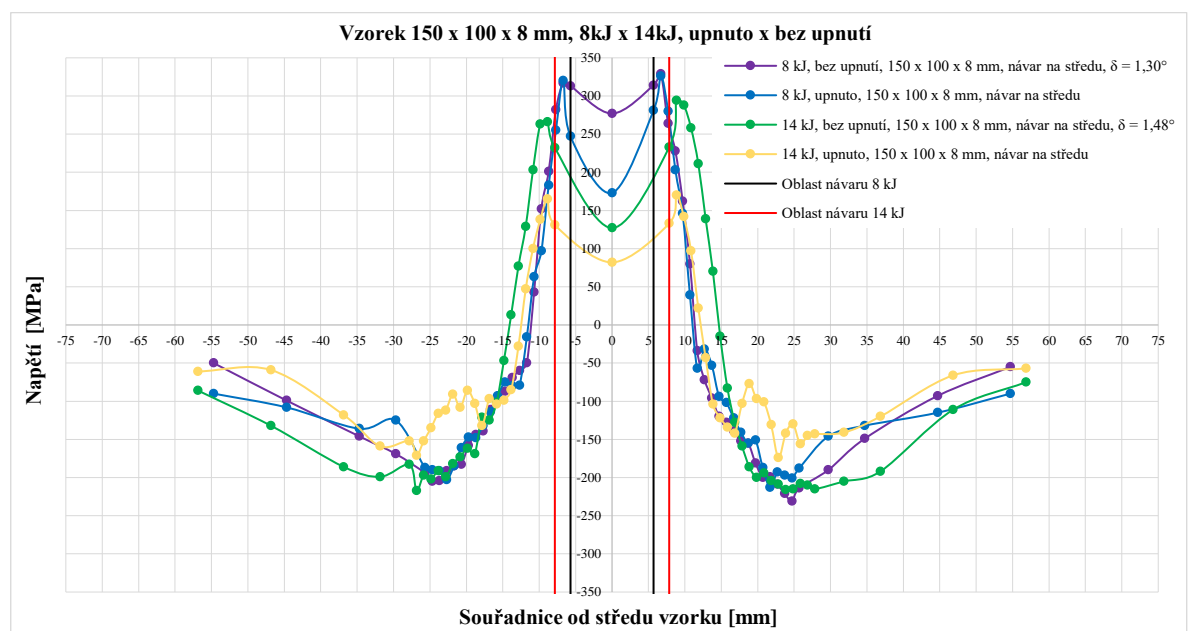
Obr.3.19 Průběh zbytkových napětí po navařování vzorků s rozměry 100 x 100 x 12 mm

Ve výše uvedeném grafu jsou zobrazeny průběhy napětí ve vzorcích s rozměry 100 x 100 x 12 mm a při porovnání s průběhy zbytkových napětí u vzorků s rozměry 150 x 100 x 12 mm je vidět značný pokles tahových napětí. Zbytková tahová napětí dosahovala maximálních hodnot 350 MPa. U těchto vzorků s rozměry 100 x 100 x 12 mm došlo také k rozšíření oblasti zbytkových tahových napětí. Z naměřených dat vyplývá, že rozměr desek ovlivňuje podmínky odvodu tepla, kdy s větší šířkou desek vznikají větší napětí, ale zmenšuje se oblast tahových napětí. V užších deskách došlo k poklesu zbytkových napětí, jelikož bylo více vneseného tepla na jednotku objemu a užší desky se tak více prohřály a při výrazně menší mezi kluzu došlo k uvolnění napětí do deformací.

Z grafu je dále možné vidět nárůst tahových i tlakových napětí v upnuté desce, a to zejména při hodnotě vneseného tepla během navařování 14 kJ, kdy bylo upnutím zabráněno uvolnění

napětí do deformací. Při porovnání průběhu napětí s rozdílnou hodnotou vneseného tepla, je vidět že při hodnotě vneseného tepla 8 kJ jsou rozdíly tlakových napětí minimální, zatímco u hodnot vneseného tepla 14 kJ jsou rozdíly tlakových napětí znatelné. Během navařování s hodnotou vneseného tepla 8 kJ vznikla větší tahová napětí v neupnutém vzorku, ale tlaková napětí byla větší v upnutém vzorku. Upnutím bylo zabráněno dilataci materiálu, kdy vznikla větší plastická deformace, do které se napětí uvolnilo. Průběh zbytkových napětí, vzniklých během navařování upnutých vzorků s hodnotou vneseného tepla 8 kJ a 14 kJ je srovnatelný, ale u neupnutých vzorků vznikla při hodnotě vneseného tepla 8 kJ tahové napětí v blízkosti návaru větší cca o 100 MPa a tlakové napětí dále od návaru cca o 50 MPa.

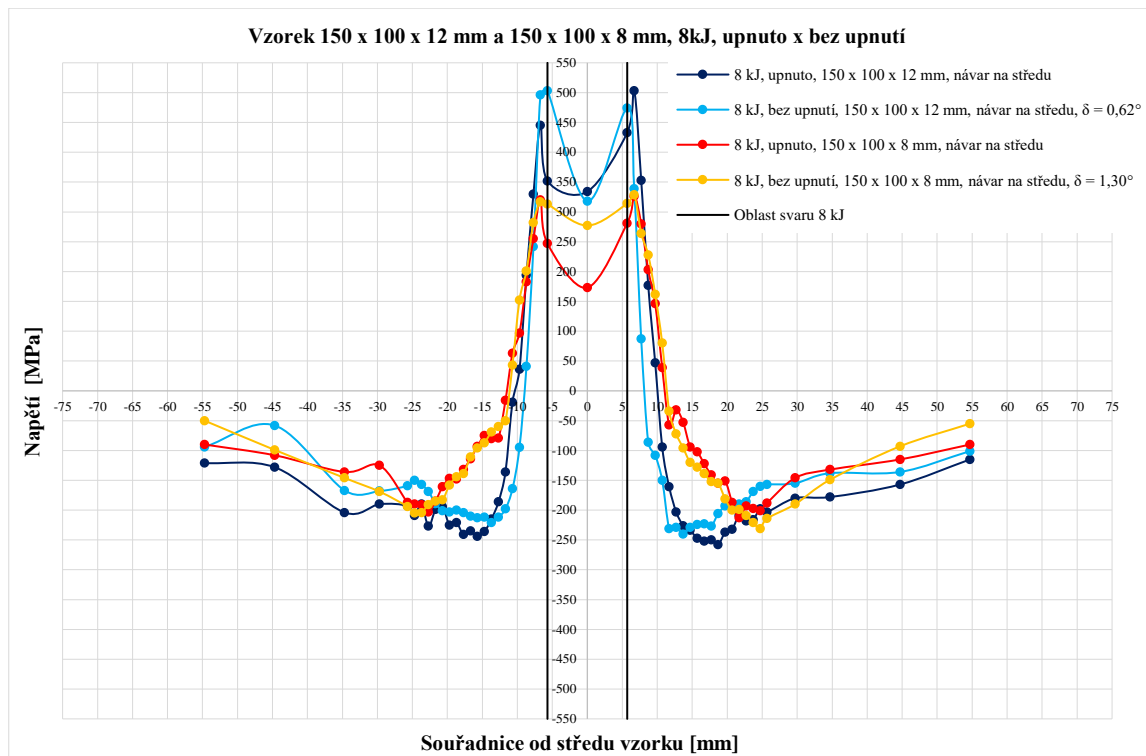
Dále došlo k analýze vnitřních napětí vzorků s rozměry 150 x 100 x 8 mm, které byly během procesu navařování s rozdílnou hodnotou vneseného tepla upnuty a neupnuty. Tyto vzorky měly stejný objem jako vzorky s rozměry 100 x 100 x 12 mm, ale menší tloušťku nežli vzorky s rozměry 150 x 100 x 12 mm. Vzhledem k menší tloušťce vzorků a menšímu objemu bylo očekáváno rychlejší prohřátí desek, během kterého dochází k uvolnění napětí do deformací a vzniku menších hodnot zbytkových napětí. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány a jejich průběh je zobrazen v grafu na obr. 3.20.



Obr.3.20 Průběh zbytkových napětí po navařování vzorků s rozměry 150 x 100 x 8 mm

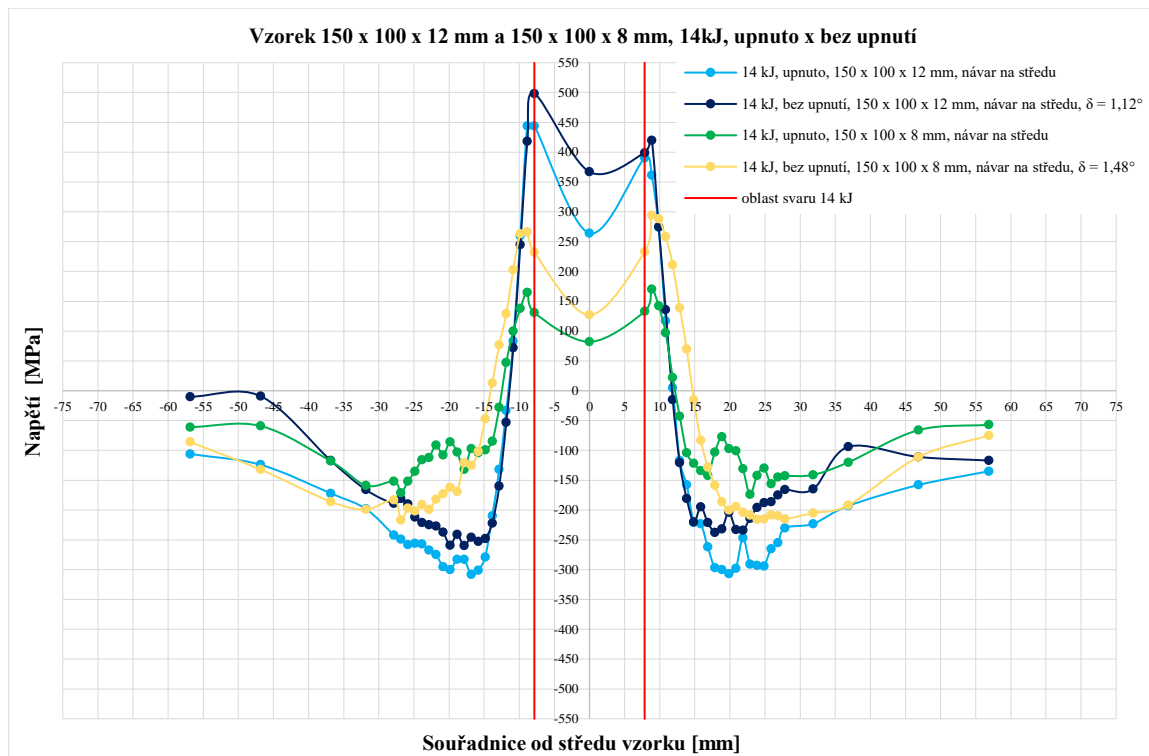
Z průběhu hodnot zbytkových napětí je vidět, že maximální naměřená hodnota tahových napětí byla cca 300 MPa. Menší tloušťka vzorku měla podobný efekt jako menší šířka vzorku, kdy došlo k rychlejšímu prohřátí desek a při menší mezi kluzu došlo k uvolnění

napětí do deformací. Při porovnání průběhů napětí vzniklých při navařování s vneseným teplem 8 kJ v upnutém a neupnutém stavu, dosáhla zbytková tahová i tlaková napětí přibližně stejného průběhu i stejných hodnot, pouze u upnutého dílu bylo tahové napětí přímo na návaru o cca 150 MPa větší. Po navařování s hodnotou vneseného tepla 14 kJ vznikla tahová napětí v upnutém vzorku o cca 100 MPa nižší nežli v neupnuté desce.



Obr.3.20 Průběh zbytkových napětí po navařování s hodnotou vneseného tepla 8 kJ

Na obr. 3.20 jsou porovnány průběhy zbytkových napětí po navařování s vneseným teplem 8 kJ na vzorky s rozměry 150 x 100 x 12 mm a 150 x 100 x 8 mm, kde je vidět pokles napětí u vzorků s menší tloušťkou. Desky s tloušťkou 8 mm měly menší tuhost a došlo u nich k většímu prohřátí, čímž byla snáze dosažena mez kluzu a došlo k uvolnění napětí do deformací. U neupnutých vzorků s menší tloušťkou došlo ke vzniku větších úhlových deformací a nejvyšší hodnoty tahových napětí byly cca o 200 MPa menší než maximální hodnoty tahových napětí u vzorku s tloušťkou 12 mm. U vzorků s menší tloušťkou došlo zejména k rozšíření oblasti tlakových napětí, vlivem větší TOO. V upnutých vzorcích s tloušťkou 8 mm vznikla zbytková napětí s maximální hodnotou o 150 MPa nižší nežli maximální hodnoty tahových napětí u vzorků s tloušťkou 12 mm.

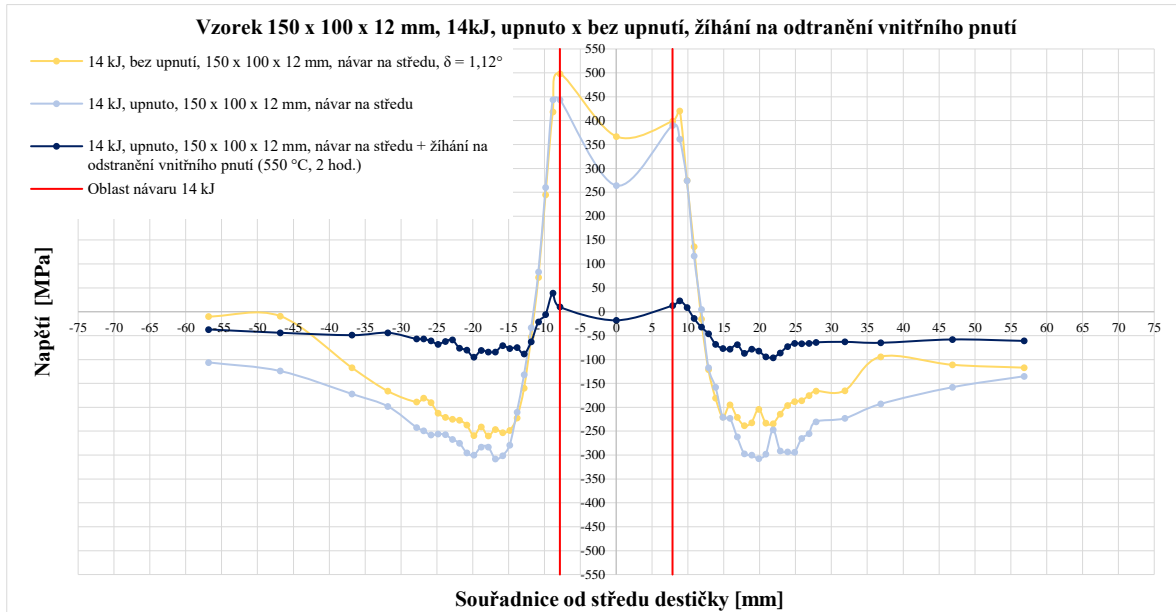


Obr.3.21 Průběh zbytkových napětí po navařování s hodnotou vneseného tepla 14 kJ

Na obr. 3.20 jsou zobrazeny průběhy zbytkových napětí po navařování s vneseným teplem 14 kJ na vzorky s rozměry 150 x 100 x 12 mm a 150 x 100 x 8 mm. Při porovnání těchto průběhů je viditelný pokles zbytkových napětí u vzorků s menší tloušťkou. Vzorky s menší tloušťkou mají menší tuhost a při navařování u nich dochází k rychlejšímu prohřátí, a tedy i k snadnějšímu dosažení meze kluzu, kdy se napětí uvolní do deformací. Vliv tloušťky se projevil zejména velikostí deformace neupnutého vzorku, kdy u vzorku s menší tloušťkou došlo ke vzniku větší deformace, ale rozdíl deformací nebyl tak výrazný, jako u vzorků, kde byla aplikována hodnota vneseného tepla 8 kJ. U neupnutého vzorku s tloušťkou 8 mm a 12 mm byl rozdíl mezi hodnotami tahového napětí přibližně 250 MPa. U upnutého vzorku tloušťky 8 mm a 12 mm byl rozdíl hodnot tahových napětí přibližně 300 MPa. U vzorků s menší tloušťkou vznikla širší oblast zbytkových napětí, vlivem větší TOO u vzorku s tloušťkou 8 mm, kdy byla šířka TOO přibližně 1800 μm , zatímco u vzorku s tloušťkou 12 mm byla tato šířka TOO cca 1300 μm .

Dále došlo k měření zbytkových napětí na desce s rozměry 150 x 100 x 12 mm s návarem na středu, na kterou bylo po navařování s hodnotou vneseného tepla 14 kJ aplikováno žíhání na odstranění vnitřního pnutí. Žíhací teplota byla 550 $^{\circ}\text{C}$ a doba výdrže na teplotě 2 hod. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány a jejich průběh je zobrazen na obr. 3.22, kde

jsou zobrazeny i průběhy hodnot zbytkových napětí po navařování na desku se stejnými rozměry a stejným parametrem vneseného tepla v upnutém a neupnutém stavu.



Obr.3.22 Průběh zbytkových napětí po navařování s hodnotou vneseného tepla 14 kJ a žihání

Z výše uvedeného grafu je vidět, že žiháním po navařování došlo téměř k eliminaci zbytkových napětí. Hodnoty zbytkových napětí se pohybovaly v oblasti návaru kolem nulového napětí a v TOO dosahovala tahová napětí cca 50 MPa a tlaková napětí cca 100 MPa. Tyto hodnoty zbytkových napětí nedosahují příliš vysokých hodnot a nejsou tak pro konstrukci nějak nebezpečné.

5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo posouzení velikosti zbytkových napětí s ohledem na geometrii tělesa a intenzitu odvodu tepla po navařování desek z konstrukční oceli S355J2.

V rámci experimentální části byly nejprve hodnoceny základní vlastnosti použitého materiálu a zvoleny rozměry vzorků. V další fázi byly navrženy parametry navařování a byl proveden navařovací experiment. Na vzorcích zhotovených na základě experimentu navařování bylo provedeno měření zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakční metody a také strukturní analýza doplněná měřením tvrdosti podle Vickerse.

Na základě provedené a vyhodnocené analýzy zbytkových napětí po navařování vzorků z konstrukční oceli S355J2 lze konstatovat, že:

- Velikosti zbytkových napětí jsou závislé na rozměru vzorku, kdy při větším objemu, šířce a tloušťce vznikají během navařování užší hodnoty zbytkových napětí.
- U desek s menší šířkou a tloušťkou vzniká menší oblast zbytkových tahových napětí.
- U návaru na okraji desky vznikají menší tahová napětí nežli na středě, ale vznikají zde větší tlaková napětí, vlivem intenzivnějšího odvodu tepla jednou stranou a volnou dilatací materiálu.
- Při větší hodnotě vneseného tepla dochází k většímu prohřátí materiálu, který má snahu se více rozpínat, čemuž zabraňuje okolní chladnější materiál, a vznikají tak větší tlaková napětí. Vzniklá vnitřní napětí tak mají efekt na zjemnění zrna. Při menší hodnotě vneseného tepla vznikají větší zbytková tahová napětí.
- Během většího prohřátí dochází k poklesu meze kluzu a uvolnění napětí do deformací, při ochlazování dochází k nárustu meze kluzu, ale napětí zůstává uvolněné.
- Ke snížení zbytkových napětí je vhodné žíhání na odstranění vnitřních pnutí při teplotě 550 °C s dobou ohřevu 2 hod. Teplota žíhání a doba ohřevu se ukázaly jako dostačující, aby došlo ke snížení vnitřních napětí až do oblasti blízké nulovému vnitřnímu napětí a zároveň aby nedošlo k výraznému ovlivnění mechanických vlastností základního materiálu.

Seznam použité literatury

- [1] WITHERS, Philip J.; BHADESHIA, H.K.D.H. BHADESHIA. Residual stress Part 1 – Measurement techniques. *Material Science and Technology*, 2001, 17.4: 355-365.
- [2] NEUMANN, Heinz. *Teorie svařování a pájení*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-171-9.
- [3] GARY S. Schajer. *Practical Residual Stress Measurement Methods*, John Willey & Sons, 2013. ISBN 978-1-118-34237-4.
- [4] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 9788085771817.
- [5] LEGGATT, R. H. Residual stresses in welded structures. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 58.3:144-151
- [6] Laserové navařování. In: *Průmyslové spektrum* [online]. 11. 4. 2001. [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-navarovani>
- [7] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [8] KULHÁNEK, Karel. Výukový vzdělávací modul svařování MIG/MAG (CO₂). Dostupné z: http://www.sosasou-opvk.cz/3doc/vys/Vyukovy_vzdelavaci_modul_svarovani_MIG-MAG.pdf
- [9] PATES, Mick J. How is argon used in MIG welding and how do MIG and MAG welding differ? *CWB Groub*. Dostupné z: <https://www.cwbgroup.org/association/how-it-works/how-argon-used-mig-welding-and-how-do-mig-and-mag-welding-differ>
- [10] RADAJ, Dieter. *Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion*. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 9783642486401.
- [11] MUSIL, Miloslav a Jaromír MORAVEC. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: výukové materiály pro kurzy Mezinárodní svářečský inženýr IWE*,

- Mezinárodní svářečský technolog IWT*. 1. vydání. Česká Třebová: DOM-ZO 13, s.r.o., 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.
- [12] KOU, Sindo. *Welding metallurgy* [online]. Druhé vydání, John Wiley and Sons, Inc., USA, 2003 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <http://www.elcoweld.com/files/editor/downloads/elmi/WELDING%20METALLURGY.pdf>
- [13] JANDERA, M.: Reziduální pnutí v uzavřených čtverhranných profilech z korozivzdorné oceli, Disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, 2009.
- [14] Svařitelnost některých technických materiálů a volba přídavných materiálů. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/N1_svaritelnost_materialu_ESA_B.pdf
- [15] VÁCLAVÍK, Jaroslav, Zbyněk BUNDA, Petr BOHDAN a Otakar WEINBERG. *Aplikace vybraných metod po měření zbytkových napětí* [online]. Seč u Chrudimi, 2012 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: https://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf
- [16] Vibrace odstraňující vnitřní napětí v materiálech. In: *Průmyslové spektrum* [online]. 1. 9. 2010. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vibrace-odstranuji-vnitri-napeti-v-materialech>
- [17] KRAUS, Ivo a Nikolaj GANEV. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03099-7.
- [18] WITHERS, P J. Residual stress and its role in failure. *Reports on Progress in Physics* [online]. 2007, 70(12), 2211-2264 [cit. 2022-03-13]. DOI: 10.1088/0034-4885/70/12/R04. ISSN 0034-4885. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0034-4885/70/i=12/a=R04?key=crossref.595db726860ce6f8a244246e705396a0>
- [19] BAS Rudnice. Ruční spektrometr a ruční analyzátor kovů DELTA professional. Dostupné z: https://www.bas.cz/innov-x-systems/rucni_analyzator_kovu_delta_professional.php

- [20] Materiálový list 1.0577. *Techportál* [online]. [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/?uniqueid=mRRWSbk196FNf8-jVUh4EkR0ZpwpMaXcpAYH1trUwZICD-vMUnwPlw&wa=WWW15SMART>
- [21] PÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [22] ČSN EN 10025-2. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Třídící znak 420904
- [23] MTMSTAL. Stal jakosciowa. Dostupné z: <https://www.mtmstal.cz/ocelove-tridy/ocel-s355j2-s355j2n>