



Diplomová práce

Posouzení vlivu mechanických vlastností ocelí na velikost zbytkových napětí po aplikaci svařovacího cyklu

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Autor práce:

Bc. Zdeněk Kalvoda

Vedoucí práce:

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Milan Pekárek
Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Posouzení vlivu mechanických vlastností ocelí na velikost zbytkových napětí po aplikaci svařovacího cyklu

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Zdeněk Kalvoda
<i>Osobní číslo:</i>	S21000220
<i>Studijní program:</i>	N0715A270015 Materiály a technologie
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra strojírenské technologie
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se teoreticky s podstatou vzniku a rozložení napětí, k nimž dochází při svařování.
2. Seznamte se způsoby stanovení hodnot vnitřního napětí v materiálech a s podstatou rentgenové difrakce XRD.
3. Seznamte se s teplotně napěťovým simulátorem Gleeble 3500.
4. Vytipujte oceli s obdobným chemickým složením, ale s rozdílnými mechanickými vlastnostmi. Navrhněte základní experimentální program.
5. Pomocí simulátoru Gleeble 3500 aplikujte na vzorky přesně definované teplotně-napěťové cykly.
6. Proveďte měření zbytkových napětí ve vzorcích pomocí metody XRD.
7. Proveďte zhodnocení výsledků a jejich diskuzi.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] KRAUS, I. a N. GANEV. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Skripta ČVUT, 2004.
[2] MORAVEC, J. a J. BRADÁČ. *Možnosti a využití teplotně-napětového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů*. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-138-2.
[3] KOUKAL, J., SCHWARZ, D. a J. HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
[4] TROJAN, K. *Strukturní charakteristiky svarů vytvořených pokročilými technologiemi*. Diplomová práce ČVUT – FJFI, 2015.
[5] NEUMANN, H. *Teorie svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN: 978-80-7494-171-9.
[6] MUSIL, M., MORAVEC, J. a kol. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. Skripta IWE (International Welding Engineer). 2017.

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Milan Pekárek
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 30. listopadu 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 30. května 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 30. listopadu 2022

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.

Posouzení vlivu mechanických vlastností ocelí na velikost zbytkových napětí po aplikaci svařovacího cyklu

Anotace

Cílem diplomové práce je posoudit, jak se projeví vliv mechanických vlastností na velikosti a rozložení zbytkových napětí po aplikaci stejného teplotně-napěťového cyklu. Práce je realizována pro jemnozrnné, termomechanicky zpracované oceli S355MC, S550MC a S700MC, tedy oceli s rozdílnou hodnotou meze kluzu.

Teoretická část práce je věnována tomu, jak vnitřní napětí vznikají, do jakých skupin se rozdělují, jaký mají vliv na vzorek, popřípadě jak je možné tato napětí snížit. Dále je nastíněna podstata metody difrakčních analýz a také podstata termomechanického zpracování. Na závěr je provedena rešerše stávající úrovně poznání v této oblasti.

Praktická část této práce je věnována stanovení mechanických vlastností, samotné aplikaci teplotních cyklů v přístroji Gleeble 3500 a následnému měření vzniklých zbytkových napětí. Dosažené výsledky jsou diskutovány.

Klíčová slova

Gleeble 3500, ocel S355MC, ocel S550MC, ocel S700MC, rentgenová difrakční analýza, teplotní cykly, zbytková napětí

Assessment of the influence of mechanical properties of steels on the magnitude of residual stresses after application of the welding cycle

Annotation

The main aim of the thesis is to assess the effect of mechanical properties on the magnitude and distribution of residual stresses after the application of the same temperature-stress cycle. The work is carried out for fine-grained, thermomechanically processed steels S355MC, S550MC and S700MC, i.e. steels with different yield strength values.

The theoretical part of the work is focused on how the internal stresses arise, what groups they are classified into, what effect they have on the sample, and how these stresses can be reduced. Next, the essence of the diffraction analysis method is described, as well as the principle of thermomechanical processing. Finally, a review of the current state of knowledge in this field is carried out.

The practical part of this work is focused on the determination of mechanical properties, the concrete application of temperature cycles in the Gleeble 3500 and the subsequent measurement of the resulting residual stresses. The achieved results are discussed.

Key words

Gleeble 3500, residual stress, S355MC steel, S550MC steel, S700MC steel, temperature cycles, X-ray diffraction analysis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Také bych rád poděkoval Ing. Šárce Bukovské a Ing. Milanu Pekárkovi za pomoc při měření. Dále chci poděkovat Mgr. Pavlíně Wünschové za pomoc s formální a grafickou úpravou. V neposlední řadě také rodičům a přátelům za podporu po celou dobu studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	10
1 Úvod	11
2 Teoretická část	12
2.1 Vnitřní napětí vznikající v materiálech	12
2.2 Napětí ve svařovaných materiálech	13
2.3 Napětí a jeho rozdělení.....	13
2.4 Podstata vzniku napětí při svařování.....	14
2.5 Mechanizmy vzniku zbytkových napětí.....	17
2.5.1 Mechanické procesy	17
2.5.2 Chemické procesy	17
2.5.3 Tepelné procesy	17
2.5.4 Kombinované procesy	17
2.6 Metody ke snížení vnitřního napětí.....	18
2.6.1 Snížení napětí během svařování	18
2.6.2 Možné způsoby snížení napětí po svařování	19
2.7 Fyzikální principy využitelné ke stanovení hodnot vnitřního napětí	22
2.8 Popis vybraných metod měření vnitřních napětí.....	24
2.8.1 Odvrtávací metoda	24
2.8.2 Ultrazvuková metoda.....	25
2.8.3 Magnetická metoda.....	25
2.8.4 Difrakční metoda XRD.....	26
2.9 Jemnozrnné oceli.....	29
2.9.1 Termomechanické zpracování	30
2.10 Teplotně-napěťový simulátor Gleeble 3500.....	34
2.10.1 Testovací vzorky.....	35

2.11	Rešerše stávajícího stavu poznání	38
3	Experimentální část	42
3.1	Ocel S355MC.....	42
3.2	Ocel S550MC.....	44
3.3	Ocel S700MC.....	46
3.4	Návrh postupu měření	48
3.5	Příprava vzorků	48
3.6	Simulace svařovacího cyklu na přístroji Gleeble.....	50
3.6.1	Příprava programu pro simulaci svařovacího cyklu	52
3.7	Měření zbytkových napětí za pomoci difrakční analýzy	56
3.7.1	Výsledné hodnoty z měření vzorků	57
3.7.2	Výsledné hodnoty získané z předchozích měření a jejich porovnání	59
4	Diskuze výsledků.....	61
5	Závěr	63
	Použitá literatura	65

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Název	Jednotky
Δl	změna délky	[mm]
ΔT	změna teploty	[K]
μ	Poissonovo číslo	[-]
A	tažnost	[%]
A_{c1}	eutektoidní teplota	[°C]
A_{20}	tažnost	[%]
A_{c3}	podeutektoidní teplota	[°C]
d_{0hkl}	vzdálenost sous. rovin po difrakci	[mm]
d_{hkl}	vzdálenost sousedních at. rovin	[mm]
HRC	tvrdost dle Rockwella	[-]
l_0	počáteční délka	[mm]
M	martenzit	
M_f	teplota konce přeměny martenzitu	[°C]
M_s	teplota začátku přeměny martenzitu	[°C]
n	řád difrakce	[-]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
R_p	mez kluzu	[MPa]
t	čas	[s]
T	teplota	[K]
α	součinitel lineární roztažnosti	[K ⁻¹]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
ε	poměrná deformace	[-]
$\varepsilon_{\varphi\psi}$	mřížková deformace ve směru φ, ψ	[-]
θ	Braggův úhel	[-]
θ_0	Braggův úhel po deformaci	[-]
λ	vlnová délka	[mm]
σ_{ij}	složka tenzoru napětí působícího na objemový element vzorku	[MPa]

1 Úvod

Ve strojírenské praxi se lze v poslední době čím dál častěji setkat s materiály, které byly tepelně, často termomechanicky zpracovány. Výsledkem takového zpracování je struktura s velmi malou velikostí zrna oproti klasickým konstrukčním ocelím. Takovéto oceli se nazývají jemnozrnné. Lze se s nimi setkat v mnoha různých odvětvích, kde je zapotřebí snížit hmotnost výrobku při zachování stejných nebo podobných mechanických vlastností a zároveň při zachování požadavků na bezpečnost. Tyto oceli bývají často mikrolegované a jsou označovány jako HSLA (High Strength Low Alloy) oceli. Vyšší cena za termomechanické zpracování je z větší části kompenzována nižší cenou za legující prvky. Další výhodou těchto materiálů je větší konstantnost technologických vlastností, jako je tváření za studena a svařování. To je způsobeno především vyššími požadavky na hlídání chemického složení a rovnoměrností struktury.

Tato diplomová práce se věnuje velikostem a rozložení vnitřních napětí, která vznikají při svařování zmíněných výrobků a jejichž účinek má poměrně velký vliv na životnost výrobku. S použitím výsledků této práce bude možné při svařování zkoumaných ocelí alespoň přibližně předpokládat tvar a smysl vnitřních napětí, která vzniknou při tomto procesu u konkrétního typu ocele. Na základě toho bude možné upravovat i technologické postupy svařování.

2 Teoretická část

V teoretické části bude nastíněna problematika vzniku vnitřních napětí při svařování a také jeho rozložení v místě svaru. Dále se tato část bude zabývat metodami, kterými lze tato napětí zjistit a následně vyhodnotit. V závěru teoretické části bude provedena rešerše stávajícího stavu poznání v oblasti vlivu mechanických vlastností u termomechanicky zpracovaných ocelí na hodnotu zbytkových napětí.

2.1 Vnitřní napětí vznikající v materiálech

Ať už se jedná o technologie svařování, tváření, slévání a jiné, vždy se jako průvodní jev objevují napětí a deformace. Nikdy se jich však nelze zcela zbavit, je možné je pouze omezit do takové míry, kdy je to pro výrobek, konstrukci, odlitek apod. v rámci požadovaných vlastností dostačující. Vnitřní napětí jsou ta napětí, která zůstávají ve výrobku, pokud se odstraní veškerá vnější zátěž, která působí na výrobek.

Hlavní podstata vzniku napětí a deformací v materiálu spočívá v tepelném ovlivnění. Pokud by se výrobek například z pokojové teploty zahříval v celém svém průřezu stejně, došlo by k roztahení ve všech směrech. Při ochlazení na původní teplotu by se opět vrátil na své rozměry před tepelným ovlivněním a nevzniklo by v něm žádné vnitřní napětí ani deformace. To vše lze uvažovat pouze za předpokladu, kdy by bylo vše ideální. Bohužel v praxi se zpravidla s ideálním předpokladem nesetkáme [1].

Při běžném svařování dochází k lokálnímu tepelnému ovlivnění materiálu, který ztrácí své pevnostní vlastnosti a má tendenci se roztahovat. Okolní materiál, který je ohřátý na jinou teplotu, však tvoří překážku, podobně jako kdyby byl materiál vystaven tuhému upnutí. Napětí se může zvyšovat až k mezi kluzu při dané teplotě, následně kolem svaru vzniká zplastizovaná zóna, kde se materiál napěchuje na ten chladnější. Po dosažení maximální teploty začíná materiál postupně chladnout a mez kluzu se zvyšuje. Deficit materiálu vzniklý smrštěním svarového kovu a napěchované oblasti způsobí vznik vnitřního napětí v oblasti svaru, které dosahuje hodnot meze kluzu. Napětí se následně uvolní buď vnější deformací, nebo se přeneso do celého výrobku. Napětí, které se neuvolní, může v průběhu životnosti výrobku vytvářet problémy spojené s plastickou deformací během provozu, při rázovém zatížení, popřípadě v koncentrátoch napětí (vruby, vměstky,...), může vést až k překročení meze pevnosti a k porušení materiálu (trhliny, lomy,...) [1, 2].

K dosažení požadované kvality výrobku, spojenou se zajištěním přijatelných geometrických tolerancí, opakovatelnosti a zároveň přijatelnými mechanickými vlastnostmi, je proto nutné se vznikem vnitřních napětí ve výrobku počítat. Napětí jsou propojena s mnoha aspekty, které budou blíže popsány v této diplomové práci.

2.2 Napětí ve svařovaných materiálech

Napětí, která vznikají při procesech svařování, působí v tělese bez vnějšího ovlivnění silami. Jak již bylo zmíněno, vnitřní napětí se vyskytuje jako průvodní jev nejen u svařování, ale i u dalších technologických procesů, například při tepelném zpracování. Rozhodující pro vznik a velikost napětí, ať už z hlediska metalurgického, nebo fyzikálního, je:

- množství vneseného tepla,
- nerovnoměrné rozložení tepla v základním materiálu,
- velikost, tvar svarové lázně a její umístění,
- fyzikální a tepelně fyzikální vlastnosti materiálu,
- mechanické vlastnosti materiálu v závislosti na teplotě,
- objemové změny způsobené změnou struktury,
- tuhost svarku,
- tuhost upnutí [2, 3].

2.3 Napětí a jeho rozdělení

Vnitřní napětí lze rozdělit dle několika hledisek. Lze ho rozdělit na **aktivní** napětí, které se nachází v úzkém okolí svaru, a na **reaktivní**, které je zapříčiněno reakcí aktivního, z důvodu tuhosti svařence [2, 3].

Dále je možné napětí rozdělit **dle charakteru vzniku**, a to na:

- teplotní, které jsou způsobené nerovnoměrným ohřevem, a
- strukturní, kdy v materiálu mohou vznikat různé typy fází s rozdílnými objemy nebo mohou vznikat v rozdílný čas.

Jako další hledisko lze uvážit **dobu existence**, která je:

- dočasná, kdy napětí působí pouze určitou dobu, kterou udává příčina jeho vzniku, nebo

- zbytková, kdy napětí zůstává v materiálu i po ukončení technologických operací.

Napětí lze dále rozdělit i **dle oblasti působení**:

- makroskopická (I. druhu) – Tato napětí vznikají a následně se vyrovnávají v makroskopických objemech, mají svůj definovaný směr, který lze spojit s geometrií svařovaného výrobku (jako napětí od vnějších sil). Dle stavu napjatosti lze tento druh napětí rozdělit na napětí jednoosé (lineární), dvouosé (rovinné) a trojosé (prostorové).
- mikroskopická (II. druhu) – Vznik těchto napětí a jejich vyrovnávání je pouze v mikroskopických objemech (v oblastech jednotlivých krystalů). Z důvodu jejich velikosti nelze spojit jejich směr a smysl s geometrií svařovaného výrobku.
- submikroskopická (III. druhu) – Jejich vznik a následné vyrovnávání je pouze v submikroskopických objemech (na úrovni několika elementárních buněk krystalografické mřížky) a je zapříčiněn například mřížkovými poruchami v podobě vakancí, dislokací atd. Na vnější deformaci nemají prakticky žádný vliv [2, 3].

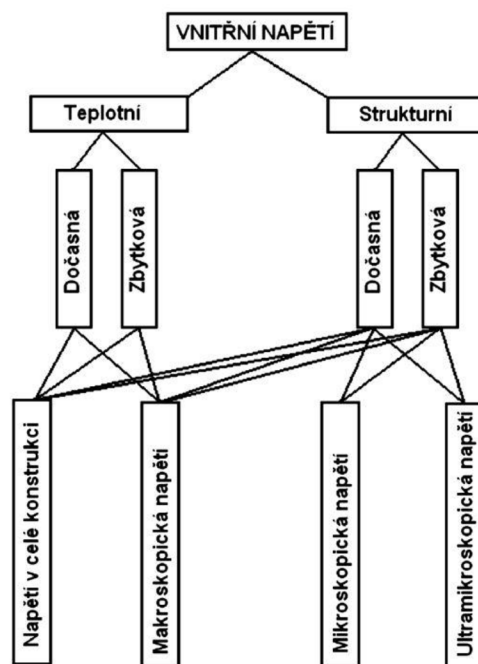
Napětí se rozdělují také **dle směru působení vzhledem na osu svaru**:

- podélná, která působí ve směru osy svaru, a
- příčná, která působí kolmo na směr osy svaru [3].

Celkově lze výše uvedená rozdělení (dle charakteristiky vzniku, doby existence a oblasti působení) vyjádřit v jednom schématu, viz obr. 2.1.

2.4 Podstata vzniku napětí při svařování

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, na vzniku vnitřního napětí ve svaru má podíl mnoho aspektů. Může se jednat o nerovnoměrné teplotní pole, které působí na materiál, tuhost upnutí, strukturní změny v materiálu či o dilataci materiálu. V podstatě se za největší zdroj vzniku a rozložení vnitřních napětí považuje nestacionární teplotní pole. Z důvodu proměnlivých mechanických a fyzikálních vlastností materiálu vzniká vnitřní napětí, které ale nemůže být větší, než je hodnota meze kluzu při daných podmínkách [2].



Obr. 2.1 Schematické znázornění rozdělení vnitřních napětí [2]

Dalším aspektem, který je nutno brát v úvahu, je hodnota součinitele lineární tepelné roztažnosti materiálu. Při ohřevu je tedy většinou nutné počítat s prodloužením materiálu. Pokud nemůže materiál volně dilatovat, dochází ke vzniku vnitřních napětí (nikdy nelze při běžných metodách svařování provádět ohřev či ochlazení stejnoměrně v celém materiálu). Pokud lze předpokládat, že v celém svarku bude ve stejný čas stejná teplota, lze změnu délky určit pomocí relativně jednoduché rovnice (2.1). Tento vztah lze použít tehdy, když nebude svarek nijak ovlivněný vnějšími silami (nebude mu zabráněno v roztažení – nebude upnutý) [2, 3]:

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T = l_0 \alpha (T - T_0) \quad (2.1),$$

kde:

Δl	- změna délky	[mm],
l_0	- počáteční délka	[mm],
α	- součinitel lineární roztažnosti materiálu	[K ⁻¹],
T	- teplota	[K].

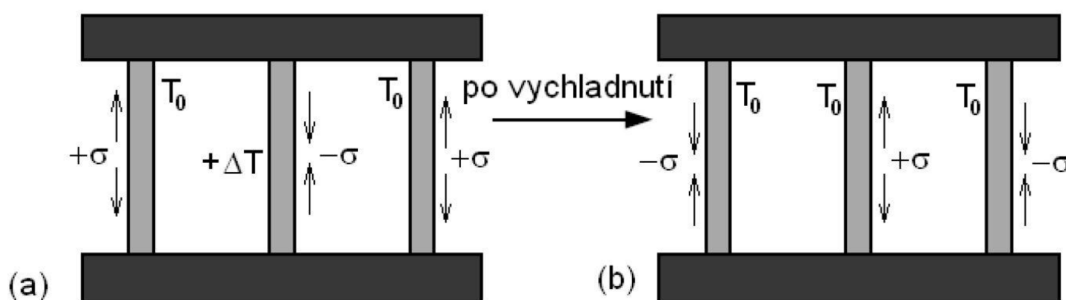
Pokud by ovšem byl materiál upnut, a to tím způsobem, že by nemohl dilatovat, došlo by ke vzniku již zmíněného vnitřního pnutí, které vznikne v elastických deformacích. Lze ho tedy vyjádřit s využitím Hookova zákona (2.2):

$$\sigma = -\varepsilon \cdot E = -\frac{\Delta l}{l_0} \cdot E = -\alpha E \Delta T \quad (2.2),$$

kde:

ε	- poměrné prodloužení	[-],
E	- Youngův modul pružnosti	[MPa],
σ	- napětí	[MPa].

Pro lepší představu je možné použít model se třemi pruty, které jsou ze stejného materiálu a průřezu a jsou umístěny v pevném rámu (je zamezen jejich volný pohyb), viz obr. 2.2. Tento model lze přirovnat k samotnému svaru a k oblasti, která je v určité vzdálenosti od svaru (záleží na typu materiálu), kde prostřední tyč představuje vlastní svar a část TOO a krajní tyče představují oblasti vzdálenější od svaru.



Obr. 2.2 Model nestacionárního teplotního pole se „třemi tyčemi“ [2]

Při zahřívání prostřední tyče dojde k jejímu roztažení, to je ale z velké části blokováno krajními tyčemi, a tím pádem vznikne v prostřední tyči tlakové napětí – oproti krajním tyčím, kde vzniká napětí tahové. Po překročení meze kluzu v tlaku dojde v prostřední tyči k plastické deformaci. Do meze kluzu se jedná pouze o elastické deformace. Díky dvojnásobnému průřezu a mnohem nižší teplotě tahová napětí v krajních tyčích zpravidla nepřekročí hodnotu meze kluzu.

Při ochlazování prostřední tyče se tlaková napětí začínají snižovat. Z důvodu plastické deformace, která proběhla ve fázi ohřevu, se napětí přemění na tahová a ta dosáhnou až hodnot meze kluzu v tahu. U krajních tyčí se po ochlazení vytvoří napětí

tlaková, která se budou rovnat poloviční hodnotě napětí tahového, které vznikne v prostřední tyči. Jak již bylo zmíněno, tento model je analogický pro tvorbu svarů v praxi, pouze se mění podmínky upnutí (od volného k tuhému), a tím pádem i velikost vnitřních napětí [2, 3].

2.5 Mechanizmy vzniku zbytkových napětí

Jak již bylo řečeno, zbytková napětí v materiálech se dělí dle několika hledisek. Tato pnutí mohou vznikat pomocí různých mechanismů, ať už za pomoci mechanických, chemických, tepelných, či kombinovaných procesů. Následně se s využitím principu superpozice sčítají v celém objemu materiálu [4].

2.5.1 Mechanické procesy

Tyto procesy ovlivňují zpravidla povrch součásti na základě jeho deformace, jedná se například o proces kuličkování, válečkování, leštění atd. Po odstranění všech sil působících na materiál se na povrchu vytvoří napětí tlaková. Uvnitř součásti byly z velké části deformace elastické, proto bude zde spíše převládat tahová napjatost [4].

2.5.2 Chemické procesy

Při těchto procesech jsou zbytková napětí výsledkem různých chemických reakcí/procesů, ať už těch nezáměrných, jako je například oxidace, či koroze, nebo těch záměrných. Z nich lze zmínit galvanické pokovování, nitridování nebo cementaci. U posledních dvou se vytváří zbytková napětí na povrchu poměrně ve vysoké míře oproti zbytku materiálu [4].

2.5.3 Tepelné procesy

Nejen při svařování, ale také při tepelném zpracování, slévání a dalších strojírenských technologiích se lze ve velké míře setkat s procesy, které jsou spojeny s nerovnoměrným rozložením tepla. Účinkem teplotních gradientů se v materiálu vytvářejí zbytková napětí, která mají nemalý vliv na následné použití konečného výrobku. Napětí způsobená tepelnými procesy jsou často doprovázena napětími od fázových přeměn v materiálu. Velká vnitřní pnutí jsou například u zakalených struktur v podobě martenzitických nebo bainitických fází [4, 5].

2.5.4 Kombinované procesy

U kombinovaných procesů má na tvorbu vnitřních napětí vliv kombinace dvou a více z výše uvedených procesů. Například při obrábění materiálu pomocí frézování se

materiál ubírá mechanicky frézou, nachází se zde tedy mechanické procesy. Mezi obráběným materiálem a frézou je ale vždy třecí odpor. Výsledkem je uvolnění energie ve formě tepla, které se vždy dostane i do obrobku, proto zde mohou nastat i změny spojené s tepelnými procesy. Podle podmínek, za jakých je materiál obráběn, se podíly každého z procesů navzájem mění. Při obrábění mohou nastat i procesy chemické, ty jsou většinou jen v malé míře oproti mechanickým či tepelným [4, 5].

2.6 Metody ke snížení vnitřního napětí

Vnitřní napětí jsou nedílnou součástí každého výrobku, který je vyroben jakoukoliv technologií. Zbytková napětí v materiálu jsou různě velká a u většiny výrobku je snahou tahová napětí co nejvíce snižovat. Lze tak předcházet následným problémům, které jsou spojeny například se sníženou únavovou pevností, kde po dynamické zátěži může dojít z důvodu vnitřního pnutí k nashromáždění napětí v koncentrátoch a k následné destrukci dílu. Zbytková napětí samozřejmě úzce souvisí i s deformacemi a naopak. Je proto nutné tuto provázanost uvažovat, protože po každé změně zbytkového napětí se mění i deformace materiálu, a tím pádem i geometrie výrobku a naopak.

Velikost a charakter zbytkových napětí závisí na konstrukci dílu a hlavně na technologii, kterou bude výrobek zhotoven. Je proto nutné již před výrobou brát ohled na:

- tloušťku materiálu,
- konstrukční řešení s ohledem na tuhost v okolí svaru,
- druh, velikost, počet a místo jednotlivých svarů,
- druh základního materiálu s ohledem na jeho původ,
- parametry svařování,
- teplotní režim spojený se svařováním,
- vhodný výběr svařovací metody [2, 3].

2.6.1 Snížení napětí během svařování

Snížení výsledného zbytkového napětí po výrobě lze ovlivnit i během samotného výrobního procesu. Je k tomu možné použít několik postupů a metod, například:

- svařování dílů, které nejsou upnuty (lze snížit příčná napětí),

- svařování s předchozí elastickou deformací v opačném směru, než se očekává od svařování (lze snížit i deformaci),
- místní předpětí či předehřev dílu, které snižují aktivní a reaktivní napětí,
- celkový předehřev dílu (lze snížit makroskopická a strukturní napětí i zbytkové deformace pomocí snížení teplotního gradientu),
- správné dodržení postupu kladení housenek a vrstev, popřípadě dodržení teploty interpass (mezihousenkové teploty),
- svařování s vyšší hodnotou energie na jednotku délky svaru (lze snížit podélná napětí na úkor zvýšení příčných napětí) [2, 3].

Je nutné brát ohled na celkový výsledek po použití těchto metod, z důvodu možného ovlivnění jednotlivých typů napětí a jejich možné superpozice. Ta může zapříčinit nechtěné deformace či naopak zvýšení zbytkového napětí. Dále je nutné si uvědomit, že těmito metodami nelze materiál zbavit veškerých zbytkových napětí [2, 3].

2.6.2 Možné způsoby snížení napětí po svařování

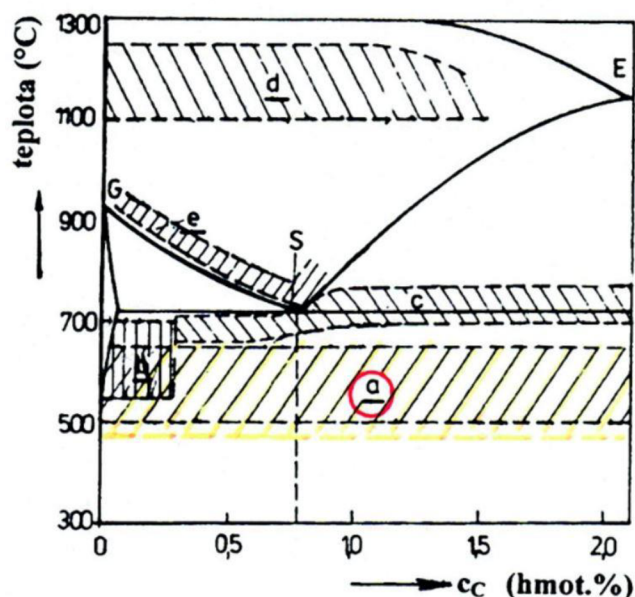
Pokud se nepodaří snížit zbytková napětí během výroby, je možné použít metody pro snížení napětí po svařování. Pro tento úkon lze použít metody, které jsou založeny buď na tepelném ovlivnění materiálu (např. žihání na snížení vnitřního pnutí), nebo na mechanickém ovlivnění materiálu (prokování, vibrování, přetížení) [2, 3].

Žihání na snížení vnitřního pnutí

Tento způsob je v praxi často využíván a používá se buď lokálně, nebo v celém objemu materiálu. Hlavními parametry žihání jsou:

- rychlost ohřevu na žihací teplotu,
- velikost žihací teploty,
- doba výdrže na žihací teplotě,
- rychlost ochlazování z žihací teploty.

Konkrétní hodnoty parametrů pro žihání s celkovým ohřevem záleží na použitém typu svařovaného materiálu, jeho geometrii apod. Tyto hodnoty lze dohledat pomocí příslušné normy nebo je lze stanovit na základě zkušeností s příslušným materiálem. Žihací teplota se vždy pohybuje pod teplotu A_{c1} , tedy v rozsahu teplot 500 °C až 650 °C (viz obr. 2.3, oblast „a“), a doba výdrže se často stanovuje jako 4 minuty



Obr. 2.3 Oblast teplot žíhání na snížení vnitřních pnutí [6]

na 1 mm tloušťky materiálu, nejméně však 20 minut. Ochlazení je alespoň z části prováděno uvnitř pece. Zbytková napětí ve výrobku se sníží pomocí plastické deformace (pokud napětí budou větší než mez kluzu při dané teplotě), proto je nutné počítat s rozměrovými změnami pro případné obrábění [2, 3].

Pokud bude výrobek rozměrný a nebude ho možné vložit do pece, popřípadě by to nebylo výhodné z ekonomického hlediska, je možné provést žíhání pouze lokálně. V takovém případě se dané místo zahřeje na žíhací teplotu pomocí indukčního ohřevu nebo elektrického odporového tělesa, kde teplota bude regulována pomocí příslušných regulátorů, a celý proces lze tak jednoduše řídit. Pokud z některých důvodů nelze využít zmíněné zdroje tepla (například z důvodu absence elektrického proudu), lze použít i ohřev za pomoci plamene. Pro správné provedení tohoto postupu je opět nutné vycházet z příslušné normy a zejména je důležité dodržet předepsané teplotní gradienty. Teplota ohřevu je podobná jako u žíhání celého výrobku. Lokální ohřev se zpravidla provádí v blízkosti svarového spoje, v šířce, která je 3,5krát větší než šířka svaru. Z důvodu rozdílného teplotního pole dochází ke vzniku přídavných napětí, která mohou být nežádoucí, ale také se díky nim může přesunout napětí z těsného okolí svaru na větší vzdálenost od svaru, a tím pádem se z nich stávají napětí, která jsou méně nebezpečná pro následné použití konstrukce [2, 3].

Prokování svaru

Tato metoda pro snížení vnitřního pnutí využívá mechanické ovlivnění svarového spoje. Používá se zejména u svařování šedé litiny bez předehřevu s použitím přídavných materiálů z neželezných kovů. Samotné prokování se nejčastěji provádí pomocí kladiva nebo pomocí ručních pneumatických kladiv se zaoblenými pracovními nástavci, kde se ihned po vytvoření krátké svarové housenky svar prokove. Pro tuto činnost se může použít i tryskací zařízení, které za pomoci tryskacího materiálu (např. ocelových kuliček) mechanicky ovlivní svar. Lze provádět i za studena [2, 3].

Vnitřní napětí se snižuje na základě vyvolání povrchových i podpovrchových deformací po prokování. Snižují se tak tahová napětí a také se může změnit jejich směr na napětí tlaková, čímž se může zvýšit únavová pevnost. Naopak u nevhodného prokování může dojít až k tvorbě trhlin v křehké oblasti, popřípadě ke snížení korozní odolnosti svaru. Tato metoda se používá tam, kde nelze z nějakých důvodů výrobek vyžít [3].

Metoda vibrování

U velkých strojních součástí, kde by byl proces žihání energeticky náročný, nebo zcela neproveditelný, se používají ke snížení vnitřních napětí mechanické vlny. Ty pomáhají k tzv. relaxaci napětí. Tato metoda funguje na principu uvedení výrobku do rezonančních a subrezonančních stavů, kde vibrace šířící se materiálem napomáhají k uvolňování napětí v mikroobjemech (ve výsledku i v makroobjemech) pomocí mikroobjemové plastické deformace. Tyto deformace jsou velice malé, a tím pádem se nijak zásadně nezmění rozměry výrobku.

Vibrování se provádí pomocí několika různých rezonančních frekvencí, které se zvolí při postupném zvyšování frekvence kmitů vibračního zařízení, nejméně však tří. V dnešní době se používají nízkofrekvenční rezonátory s vysokou amplitudou kmitu. Pomocí příslušného softwaru, který je součástí vibračních zařízení, trvá vyhledání rezonanční frekvence výrobku pouze několik minut a samotná vibrace 10–30 minut. Délka vibrování závisí na doporučení prodejce vibračního zařízení. Tato metoda není vhodná pro materiály zpevněné tvářením za studena, vytvrzené materiály a materiály se sklony ke stárnutí, naopak je vhodná pro šedou litinu s kuličkovým grafitem, ocelolitinu, nízko a vysokolegovanou ocel se strukturou po normalizačním žihání nebo

po popouštění. Výhodou této metody oproti žíhání je možnost vibrování v podstatě na kterémkoliv místě, stačí pouze odizolovat výrobek od okolí, aby se vibrace nepřenašely (např. pomocí gumových podložek) [3, 7].

Přetížení svařované konstrukce

Jedná se v principu o velice jednoduchou metodu, kde se konstrukce zatíží nad hodnotu její meze kluzu, a tím dojde k částečnému uvolnění vnitřních napětí v konstrukci. Tato metoda se používá například při zkoušce tlakových lahví pomocí přetlaku. V oblastech svarů může také dojít ke zvýšení únavové pevnosti z důvodu vzniku tlakových napětí v kořenech defektů [2, 3].

Snížení napětí pomocí tlakové vlny

V některých případech, kdy je potřeba změnit nevhodně rozložená napětí a vytvořit ve výrobku tlaková napětí, se využívá detonace trhaviny, která vytvoří tlakovou vlnu napětí. Při použití různých typů trhavin bude rozložení zbytkových napětí v materiálu rozdílné [3].

2.7 Fyzikální principy využitelné ke stanovení hodnot vnitřního napětí

Zjištění hodnot zbytkového napětí v materiálu je velice důležité. V dnešní době zaujímají metody, které dokážou vyčíslit hodnoty a směry napětí, nezanedbatelné místo ve strojírenském, stavebním, lékařském i leteckém průmyslu. Pomocí těchto metod lze předpokládat, jak byl materiál svařován, jestli správně nebo ne, jestli je napětí vhodně rozloženo z pohledu následného cyklického namáhání součásti a mnoho dalších možných aplikací. V této kapitole budou rozděleny a obecně popsány jednotlivé metody, které se používají, ať už v laboratořích, či v praxi.

Metody pro stanovení hodnot vnitřního napětí lze rozdělit do několika skupin, například do skupin z hlediska narušení materiálu na:

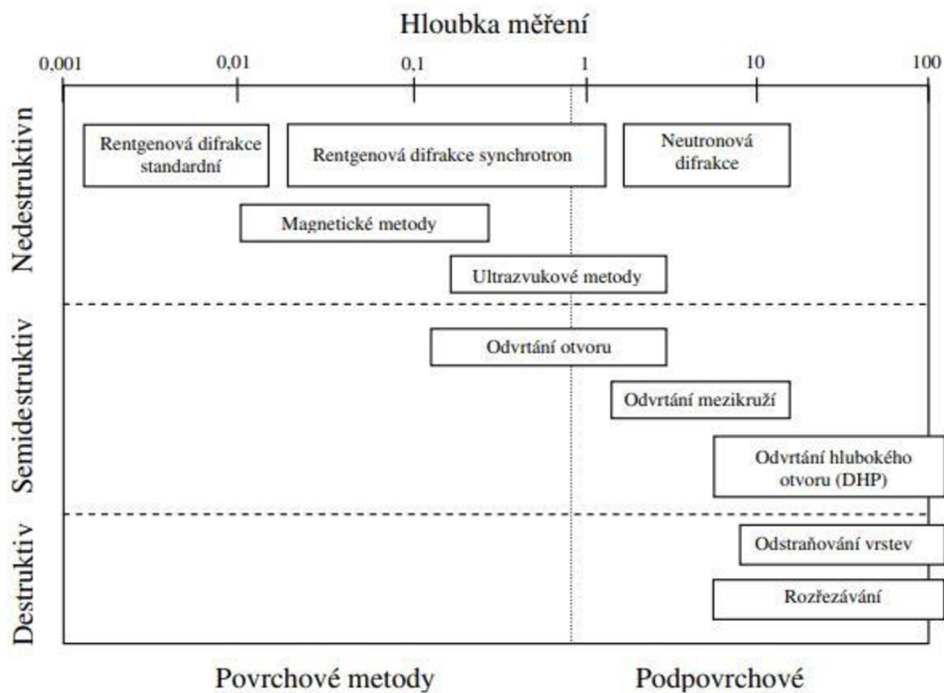
- destruktivní,
- semidestruktivní,
- nedestruktivní [8].

U destruktivních metod se materiál nevratně znehodnotí a výrobek není možné již dále používat. Naproti tomu u semidestruktivních metod se materiál odebírá pouze tak, aby výrobek mohl být bez problému používán nadále, i třeba za pomoci určitých oprav. Poslední skupina metod celistvost zkoumaného materiálu nijak neovlivňuje ani nezanechává v materiálu nějaké stopy po měření [9, 10].

Další rozdělení lze provést z hlediska fyzikálního principu, na kterém je konkrétní metoda založena. Fyzikální principy, které jednotlivé metody využívají, lze rozdělit na:

- mechanické,
- difrakční,
- magnetické,
- optické,
- ultrazvukové,
- chemické.

Všechny výše zmíněné metody jsou pro přehlednost uvedeny na obr. 2.4, který bere v potaz i hloubku, do níž je možné zbytková napětí analyzovat.



Obr. 2.4 Rozdělení jednotlivých metod měření zbytkových napětí v závislosti na hloubce měření [8]

Mechanické metody patří z hlediska chování se k materiálu do kategorií destruktivních a semidestruktivních. Jsou založeny na odstranění určitého objemu materiálu, který je nejčastěji vyvrtán nebo vyfrézován, a na základě této změny se v materiálu uvolní napětí, které se projeví deformací. Ta je zaznamenána pomocí různých čidel na principu tenzometru. Tímto postupem lze zjistit pouze průměrnou velikost makroskopických napětí. Do skupiny mechanických metod lze zařadit například metodu odvrtávací [8, 10].

Další způsob, kterým lze zjistit hodnoty vnitřních napětí, je **metoda difrakční**, která využívá rozptylu (difrakce) rentgenových paprsků. Tato metoda pracuje na základě mřížkových deformací, při kterých se mění vzdálenost atomů mezi sebou, což následně dokáže software přepočítat na velikosti vnitřních napětí v materiálu, pomocí vztahů lineární teorie elasticity [8, 10].

Magnetické metody využívají magnetických vlastností materiálů v závislosti na napětí. Jsou použitelné pouze pro feromagnetické materiály. Tento způsob využívá metoda založená na tzv. Barkhausenově šumu či magnetostrikční metoda [10].

Podobně jako u magnetických metod se u **chemických metod** využívají změny chemických vlastnosti materiálu v závislosti na napětí. Jako příklad lze uvést metodu koroze pod napětím [9].

Optické metody jsou založeny na odrazu světla pod určitým úhlem [11].

Ultrazvukové metody pak fungují na principu změny rychlosti šíření ultrazvukových vln v závislosti na vnitřním napětí. Touto metodou lze zjistit všechny druhy napětí, bohužel nelze tato napětí mezi sebou rozlišovat [11].

2.8 Popis vybraných metod měření vnitřních napětí

V průmyslové praxi se pro měření zbytkových napětí používají metody, které jsou použitelné pro výrobky, jaké firma vyrábí. Za pomoci jedné metody totiž nelze měřit jakýkoliv materiál s jakoukoli geometrií v jakýchkoli podmínkách. V následující kapitole budou popsány některé metody, které je možno pro tuto činnost využít.

2.8.1 Odvrtávací metoda

Odvrtávací metoda se řadí mezi semidestruktivní metody, tedy při jejím použití dochází pouze k malému poškození vzorku. Jako další výhodou je třeba zmínit její široké

uplatnění – metoda se neomezuje jen na ocele, ale lze ji využít například i pro plasty či kompozity. Další výhodou spočívá v její jednoduchosti, rychlosti a také v přenosnosti měřicího zařízení.

Metoda měří zbytkové napětí v blízkosti povrchu materiálu. Na předem zvolené místo se nalepí speciální tenzometrické růžice pro měření zbytkových napětí. Následně se do materiálu vyvrtá otvor, což způsobí uvolnění zbytkových napětí. Odvrtávání probíhá po krocích daných normou, která udává postup měření i způsob vyhodnocení. Po každém kroku se zaznamenají uvolněné deformace, které vznikají vlivem narušení rovnovážného stavu součásti. Na základě měření deformace se pak pomocí tzv. kalibračních koeficientů zpětně určí hodnoty zbytkových napětí [9, 12].

2.8.2 Ultrazvuková metoda

Ultrazvuková metoda se řadí mezi metody nedestruktivní, v čemž lze spatřovat její výhodu. Tato metoda vychází z toho, jak se mění rychlost šíření zvuku v kovech v závislosti na namáhání, což se označuje jako akustoelastický jev. Pro měření se využívají podélné vlny, kdy se body kontinua pohybují ve směru šíření vlnění, nebo příčné vlny, kdy se body kontinua pohybují kolmo ke směru šíření vlnění. Kvalita metody značně kolísá, neboť rychlost šíření vlnění ovlivňuje mnoho různých faktorů, jako je například krystalická textura, složení či tvrdost. Při technologických procesech, v rámci kterých dochází ke vzniku zbytkových napětí, dochází také k materiálovým změnám, kvůli kterým někdy nelze odlišit vlivy samotných zbytkových napětí, a dochází tak ke zkreslení. Právě kvůli tomu metoda momentálně není rozšířena v průmyslové praxi, nicméně má i řadu výhod. Kromě výše zmíněného nedestruktivního charakteru lze vyzdvihnout rychlé zpracování dat, přenosnost zařízení či možnost automatizace měření i vyhodnocování [11].

2.8.3 Magnetická metoda

Magnetická metoda spadá pod metody nedestruktivní, a tak ji lze aplikovat v provozních podmínkách. Využívá Barkhausenův šum, který poprvé popsal roku 1919 německý fyzik Heinrich George Barkhausen. Zkoumá celistvost povrchu feromagnetického materiálu, který lze charakterizovat jako látku tvořenou z malých magnetických oblastí podobných tyčovým magnetům, jež se nazývají domény. Domény se magnetizují podél krystalograficky vyznačených směrů a oddělují je doménové stěny, které se pohybují v závislosti na vnějším magnetickém poli. Pohyb stěn je možný

díky tomu, že se doména na jedné straně zvětší a doména na druhé straně naopak zmenší. Důsledkem toho dojde ke změně celkové magnetizace vzorku.

Když je doména v pohybu a v blízkosti vzorku se v té chvíli nachází cívka, změna magnetizace vzorku indukuje v cívkce elektrický puls, který se záhy zobrazí na monitoru počítače. Elektrické pulsy vytvoří křivku, na základě které je možné určit zbytková napětí [13].

Nevýhodu této metody lze spatřovat v tom, že je omezena pouze na feromagnetické materiály. Měření je však rychlé, a proto ho lze využít při kontrole dílů při sériové výrobě a při zjišťování informací o jejich struktuře a vlastnostech. Mimoto metoda slouží i jako zpětná vazba, na základě které je možné modifikovat podmínky výrobního procesu [14].

2.8.4 Difrakční metoda XRD

V této diplomové práci se pro zjišťování hodnot vnitřních napětí používá rentgenová difrakční metoda, konkrétně zařízení Proto iXRD Combo. Tato kapitola se bude věnovat podrobnějšímu popisu této metody s detailnějším vysvětlením principu, na jakém funguje.

XRD metoda využívá rozptylu rentgenových paprsků k tomu, aby mohla být zjištěna vzdálenost atomových mřížkových rovin, které se z důvodu působení zbytkových napětí změnilly. Tyto změny v podobě deformací jsou za pomoci příslušného softwaru a teorie elasticity přepočteny na hodnoty vnitřních napětí [4].

Zdrojem rentgenového záření je tzv. rentgenka, která produkuje záření určité vlnové délky, a to dopadá pod určitým úhlem na zkoumaný materiál, kde se odráží, viz obr. 2.5. Pokud je rozdíl drah paprsků celočíselným násobkem vlnové délky, lze pro zjištění vzdálenosti sousedících atomových rovin použít tzv. Braggovu podmínku, která je definována vztahem:

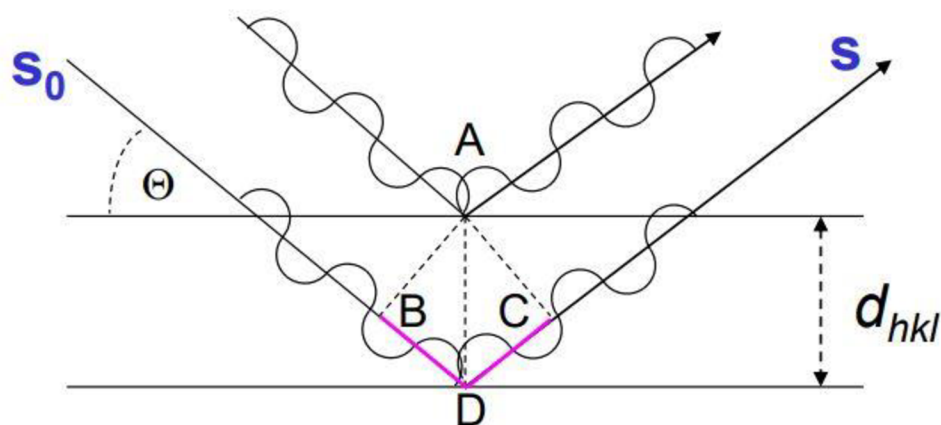
$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (2.3),$$

kde:

n	-	řád difrakce	[-],
λ	-	vlnová délka	[mm],
d_{hkl}	-	vzdálenost sousedících atomových rovin	[mm],

θ - Braggův úhel [-].

Jak je zřejmé z již zmiňovaného obr. 2.5, podmínka je založena na geometrické podobnosti trojúhelníků, kde $|BD| = d \cdot \sin\theta$, $|DC| = d \cdot \sin\theta \rightarrow |BD| + |DC| = n \cdot \lambda$, S_0 je intenzita dopadajícího záření a S je intenzita difraktovaného svazku rentgenového záření [15].



Obr. 2.5 Podmínky difrakce [15]

V mezivivinné vzdálenosti a úhlové poloze dojde vlivem mechanického napětí ke změně, z tohoto rozdílu vyplyne vztah (2.4):

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

kde:

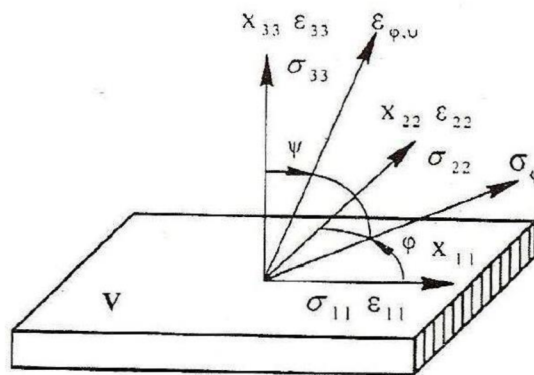
- ε - mřížková deformace [-],
- d_{hkl} - vzdálenost sousedících atomových rovin [mm],
- $d_{o\ hkl}$ - vzdálenost sousedících rovin po deformaci [mm],
- θ - Braggův úhel [-],
- θ_0 - Braggův úhel po deformaci [-].

Pokud bude vzorek umístěn v souřadnicovém systému dle obr. 2.6, bude mřížková deformace vyjádřena vztahem:

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

kde:

- σ_{ij} - složka tenzoru napětí působícího na objemový element vzorku (splňující podmínky lineární teorie plasticity) [MPa],
- $\varepsilon_{\varphi\psi}$ - mřížková deformace ve směru φ a ψ [-],
- E - modul pružnosti [MPa],
- μ - Poissonovo číslo [-].



Obr. 2.6 Souřadnicový systém vzorku [10]

Po úpravě vztahu na dvouosý stav napjatosti a za pomoci substituce vznikne lineární závislost mezi mřížkovou deformací $\varepsilon_{\varphi\psi}$ a $\sin^2 \psi$:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{\mu + 1}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi - \frac{\mu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (2.6).$$

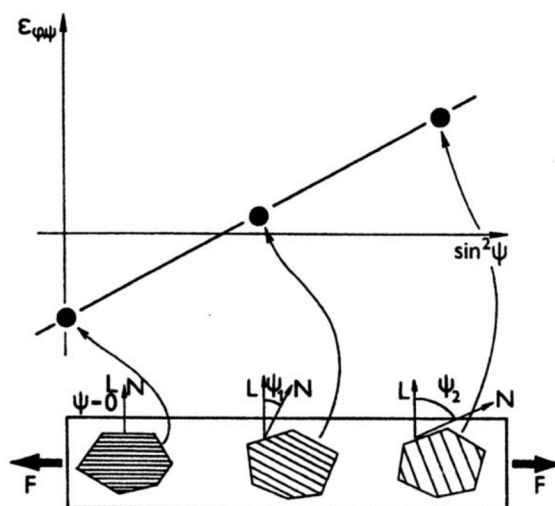
Derivací dle $\sin^2 \psi$ se získá směrnice přímky, která je definována elastickými konstantami E , μ a působícím napětím σ_{φ} . Ta společně s Braggovou podmínkou tvoří výpočet složky napětí σ_{φ} :

$$\sigma_{\varphi} = -\frac{\mu + 1}{E} \cot g \theta_0 \frac{\partial \theta_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \quad (2.7).$$

Spojením mřížkové deformace ε s deformací $\varepsilon_{\varphi\psi}$ vznikne základní rovnice rentgenografického měření napětí využívající metodu $\sin^2 \psi$:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = -\cot\theta_0(\theta - \theta_0) = \frac{\mu + 1}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2\psi - \frac{\mu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (2.8).$$

Metoda $\sin^2\psi$ spočívá v přesném určení úhlové polohy $\theta_{\varphi\psi}$ interferenčních linií, které jsou výsledkem rozptylu rentgenových paprsků na vrstvy atomové mřížky, v azimutální projekci $\varphi = \text{konstantní}$, zatímco úhel ψ může nabývat různých hodnot. Schéma metody zobrazuje obr. 2.7.

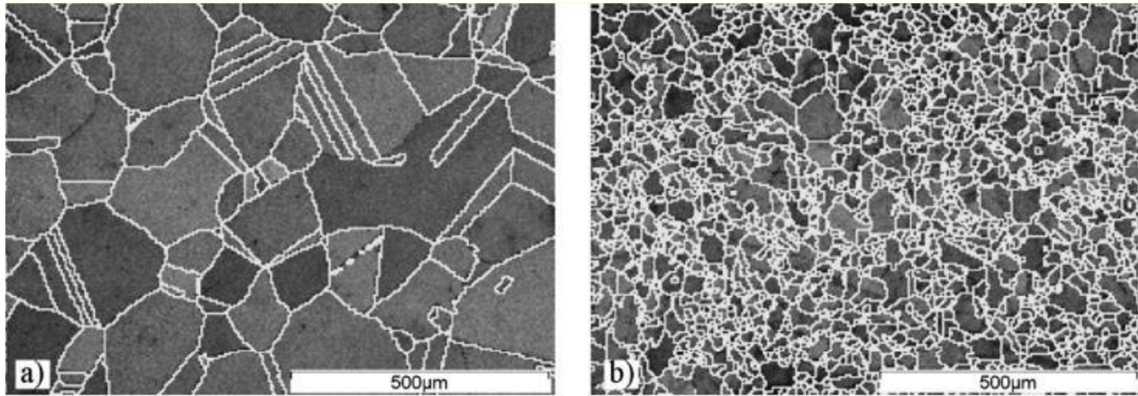


Obr. 2.7 Schéma metody „ $\sin^2\psi$ “ [10]

Rentgenografické měření zbytkových napětí se vyznačuje tím, že pro stanovení napětí není v mnoha případech nutné znát strukturu materiálu bez zbytkových napětí. Dále se vyznačuje schopností měřit materiály s různými napěťovými poli, možností od sebe odlišit napětí I. a II. druhu, ale také tím, že při měření vícefázových materiálů lze určit napětí jednotlivých složek [4].

2.9 Jemnozrné oceli

Materiál, na kterém budou provedeny definované teplotní cykly, byl zvolen ze skupiny jemnozrných ocelí. Již z názvu je patrné, že oproti klasickým konstrukčním ocelím mají jemnozrné oceli menší velikost zrna (viz obr. 2.8). Tyto oceli se vyznačují (oproti běžným konstrukčním ocelím) například lepšími mechanickými vlastnostmi v podobě vyšší meze kluzu, pevnosti, vyšší houževnatosti. To je zapříčiněno dolegováním dalšími prvky: Al, Ti, Nb, Zr, V, které se precipitačně vylučují (v podobě nitridů, karbidů, karbonitridů,...) a umožňují zpevnění jak na hranicích zrn, čímž podporují jak vznik jemnozrné struktury, tak zpevnění struktury pomocí samotných



Obr. 2.8 Příklad hrubozrnné struktury „a“ a jemnozrnné struktury „b“ [16]

precipitátů. Tímto způsobem je možné docílit úspory drahých legur, nezbytných pro dosažení potřebných hodnot mechanických vlastností substitučním zpevněním. Z tohoto důvodu se jemnozrnné oceli využívají stále častěji [3].

Jak již bylo řečeno, precipitace zvyšuje hodnoty některých mechanických vlastností a napomáhá také vznikem karbidů a karbonitridů k snížení uhlíkového ekvivalentu, čímž zlepšuje svařitelnost materiálu. Dále mohou mikrolegující prvky vytvářet precipitáty spolu s dusíkem, a tím pádem i omezit vnik nitridů železa, způsobujících stárnutí oceli. Za další výhodu lze považovat přítomnost precipitátů menších než 50 nm, z důvodu omezení migrace hranic zrn při rekrytalizaci, což brání hrubnutí zrna [3].

Jemnozrnné oceli se vyrábí za pomoci termomechanického zpracování, které se dle normy ČSN 10027-1 označuje písmenem „M“. Jako další způsoby výroby lze využít normalizační žihání (dle ČSN 10027-1 se označuje písmenem „A“) či zušlechťování (dle ČSN 10027-1 se označuje písmenem „Q“).

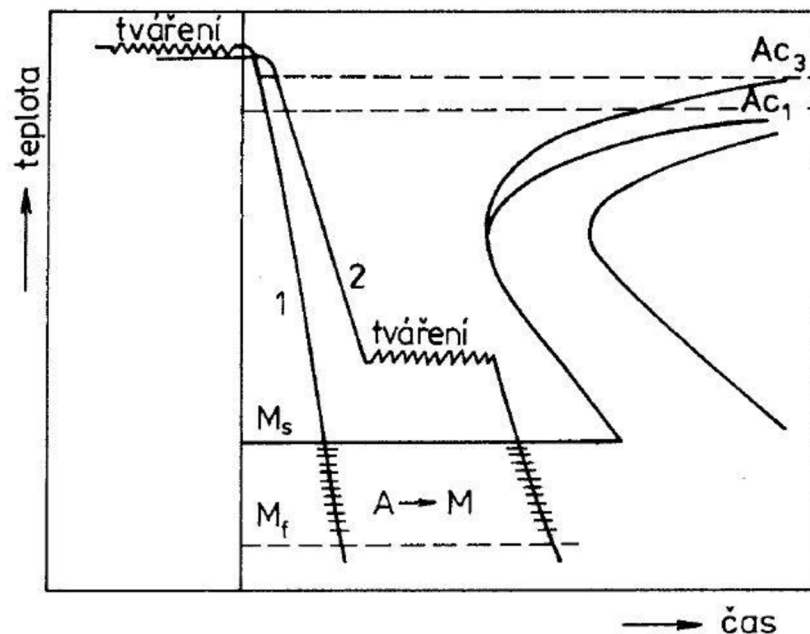
2.9.1 Termomechanické zpracování

Jak je již z názvu patrné, u tohoto typu zpracování ocelí se využívá nejen zahřátí na požadované teploty, ale také mechanické působení (plastická deformace definované velikostí) na materiál během procesu. V dnešní době má velký podíl na výrobě již zmíněných jemnozrnných ocelí, z důvodu jejich pevnosti při poměrně malém přídavku legur. Běžnými způsoby zpracování nelze takových pevností nikdy dosáhnout. Pro porovnání: ocel (0,35 C, 4,5 Ni, 1,5 Cr [hm. %]), která byla zpracována pomocí konvenčního tepelného zpracování, dosahuje hodnot $R_m = 1700$ MPa, $HRC = 57$, $A_5 = 2$

% a po termomechanickém tepelném zpracování hodnoty mechanických vlastností jsou: $R_m = 2800 \text{ MPa}$, $HRC = 58$, $A_5 = 12 \%$ [17].

Dle úrovně deformace výrobku lze rozdělit zpracování na několik dalších metod, a to na nízkoteplotní termomechanické zpracování, vysokoteplotní termomechanické zpracování, zpracování během přeměny austenitu (isoforming), řízené válcování a tzv. zerolling [17].

Nízkoteplotní termomechanické zpracování (NTMZ) se skládá z ohřevu nad teplotu A_{c3} a kompletní austenitizace. Následně se materiál rychle ochladí do oblasti metastabilního austenitu ($500\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$), kde probíhá plastická deformace za pomoci



Obr. 2.9 Schéma průběhu vysokoteplotního TZ (1) nízkoteplotního TZ (2) [5]

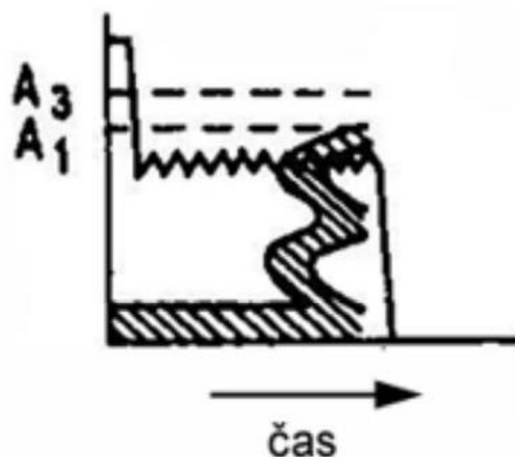
válcování či kování (obr. 2.9, křivka 2). Stupeň deformace je až 50 %. Tímto tepelným zpracováním lze zpracovávat oceli s širokou oblastí metastabilního austenitu (legované oceli), je ale technologicky náročné provést prudké zchlazení materiálu, následné dodržení tvářecí teploty a další podmínky tak, aby neproběhla bainitická či perlitická přeměna. Dalším problémem spojeným s plastickou deformací při nízkých teplotách (pod teplotou rekystalizace) je vyšší přetvárný odpor, tím pádem je nutné použití větších tvářecích sil než u tváření za vyšších teplot [5, 17].

U **vysokoteplotního termomechanického zpracování (VTMZ)** je nejprve také realizován ohřev nad teplotu A_{c3} a kompletní austenitizace. Plastická deformace je pak

kompletně provedena v oblasti stabilního austenitu, tedy nad teplotou A_{c3} (obr. 2.9. křivka 1). Stupeň deformace zde dosahuje hodnot 50–90 %. Jak lze vidět z obr. 2.9, po tváření následuje rychlé ochlazení (zakalení), kde se austenit přemění na martenzit, nebo jinou fázi odpovídající použité ochlazovací rychlosti. Tento typ termomechanického zpracování lze použít i u uhlíkových ocelí, je ale důležité brát v potaz rekrystalizaci zrn, z důvodu zániku deformačních zpevnění a následně poklesu požadovaných mechanických vlastností. Dalšími faktory, na kterých záleží tyto vlastnosti, jsou stupeň deformace, teplota, složení oceli a také rychlost, jakou je materiál ochlazen po skončení tváření [5, 17].

Materiál, který je po vysokoteplotním nebo po nízkoteplotním termomechanickém zpracování, je zpravidla popouštěn, nejčastěji při teplotě 200–300 °C. Vzniká tak velice jemný popuštěný martenzit. Tento typ zpracování má také pozitivní vliv na eliminaci vzniku kalických trhlin, zabržděných a předčasných lomů. Výše zmíněné typy termomechanických zpracování se nejvíce používají pro nízko a středně legované podeutektoidní oceli s obsahem uhlíku 0,3–0,6 hm. % [17].

Isoforming patří k dalším metodám tepelně mechanického zpracování, jedná se o kombinaci izotermické přeměny současně s deformací nebo deformace musí proběhnout před samotnou přeměnou (viz obr. 2.10). Vlnkovaná čára představuje plastickou

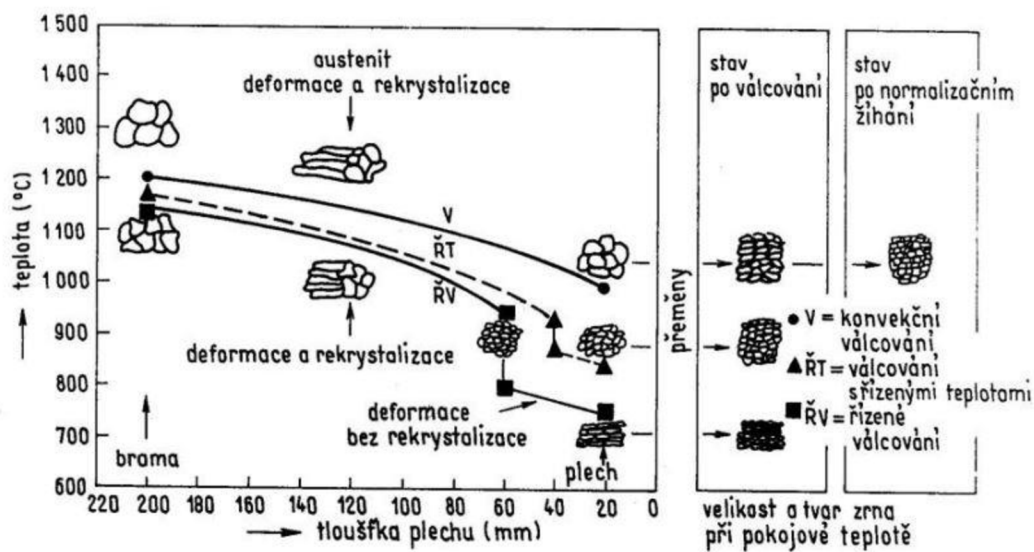


Obr. 2.10 Schéma průběhu isoformingu [18]

deformaci materiálu). To má za následek částečnou sferodizaci perlitu. Tvářecí teplota se pohybuje okolo 600–700 °C a po ukončení izotermického rozpadu austenitu je materiál dochlazen na vzduchu. V porovnání s izotermickým žháním materiál po

isoformingu dosahuje lepších mechanických vlastností v podobě lepší houževnatosti a nižší tranzitní teploty [17, 18].

Řízené válcování a ochlazování se používá nejčastěji k válcování mikrolegovaných svařitelných ocelí, vyznačuje se zejména tvorbou velice jemné struktury (viz obr. 2.11, porovnání s konvenčními způsoby). Samotné válcování probíhá ve třech základních teplotních oblastech.



Obr. 2.11 Porovnání různých druhů válcování s výsledným vlivem na strukturu [18]

První oblast se nazývá oblast rekrytalizace. Zjemnění zrn je tedy dáno cyklem rekrytalizace-deformace. Zárodky transformace $\gamma \rightarrow \alpha$ se tvoří pouze na hranicích zrn a po dosažení mezní hodnoty již zmíněného cyklu se zrno už dále nezmenšuje. Velikost zrna závisí na teplotě, ale také na metalurgickém charakteru oceli. Pro dosažení optimální velikosti zrn se doporučuje použití deformací v rozmezí $\epsilon = 0,4-0,5$ [18].

Druhá oblast se z důvodu nižších teplot oproti první nazývá oblast bez rekrytalizace. Zrno je nutné dále zjemnit. Na základě zbrzděné rekrytalizace z první oblasti se zrna austenitu prodlužují a vznikají takzvané dislokační pásy, které mají velkou vnitřní energii, a tím pádem přispívají k nestabilitě celého systému. Ferit nukleuje nejen na hranicích austenitu, ale také v dislokačních pásách. Při fázové přeměně $\gamma \rightarrow \alpha$ se pásy dislokací chovají podobně jako hranice zrn, a proto zde vzniká mnohem více zárodků, čímž dochází k zjemnění zrna [18].

Třetí oblast neboli oblast austeniticko-feritická je také nazývána jako oblast dvoufázová. Feritické zrna nemůže rekrystalizovat a při jeho zotavení vznikají takzvaná subzrna. Za podpory deformace vznikají precipitáty, jejichž vznik je zapříčiněn sníženou rozpustností Mn a V ve feritu po fázové transformaci. Tyto precipitáty „brzdí“ dislokace a subranice zrn, tím pádem přispívají k dalšímu zjemnění zrna a zvýšení pevnosti materiálu. V praxi se úroveň tohoto zpevnění za pomoci „tvrdých částic“ provádí například vhodnou volbou teploty svinování plechů [17, 18].

Zerolling je typ tepelně-mechanického zpracování, který se používá převážně u vysokolegovaných ocelí se strukturou metastabilního austenitu, který má teplotu začátku přeměny na martenzit (M_s) v záporných teplotách. S využitím plastické deformace je ale možné vytvořit zárodky martenzitu a teplotu M_s tak zvýšit na takzvanou teplotu M_d . Tato plastická deformace se používá ke zvýšení hodnot meze kluzu, a hlavně ke zvýšení plasticity za malé ztráty houževnatosti, které je známé jako TRIP efekt. Tento efekt se využívá na potlačení lokalizace plastické deformace. V dnešní době se oceli s tímto efektem převážně používají pro absorbování energie při nárazu automobilu, a proto se lze s nimi setkat v částech přední a zadní deformační zóny vozidla [17, 19].

2.10 Teplotně-napět'ový simulátor Gleeble 3500

Přístroj Gleeble (viz obr. 2.12), vyvinutý americkou firmou Dynamic Systems Inc., patří k jednomu z nejpoužívanějších systémů, které umožňují provádět fyzické simulace. Ty se od běžných zkušebních testů liší tím, že probíhají za podmínek skutečných výrobních procesů, ačkoli probíhají v laboratoři. Pro fyzickou simulaci stačí využít pouze malý testovací vzorek a simulace pomáhá ověřit, zda nastavené technologické parametry lze využít i při zpracování reálného výrobku, neboť stav, kterým vzorek při simulaci prochází, je totožný se stavem při konkrétním výrobním procesu. Výsledky fyzické simulace tak mohou být následně využity v reálném výrobním procesu, čímž dochází k jeho optimalizaci. Kromě toho dochází také k optimalizaci technologických parametrů a výsledky lze využít i pro numerické simulace.

Systém Gleeble má mnohostranné využití – lze jej aplikovat například u simulací svařování, tepelného zpracování, objemového tváření, válcování za tepla či kontinuálního lití. Systém umožňuje testovat, nakolik je materiál náchylný ke vzniku trhlin za tepla, ale také zkoumat děje odehrávající se při tuhnutí, rekrystalizaci či zotavení [21].

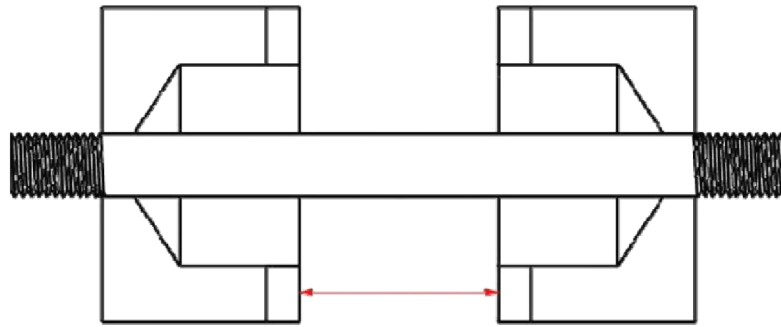


Obr. 2.12 Teplotně-napěťový simulátor Gleeble [20]

2.10.1 Testovací vzorky

Vzorky použité při testování mohou mít různou geometrii, avšak jejich průměr nesmí přesahovat 20 mm, popřípadě jejich plocha průřezu nesmí být větší než 400 mm². Přístroj dosahuje maximální síly v tahu nebo tlaku až 100 kN, přičemž vzorek je možné ohřívat rychlostí až 10000 °C·s⁻¹ a vzorky s malým průměrem lze také ochladit rychlostí až 6000 °C·s⁻¹. Maximální zdvih systému je 100 mm a zařízení dokáže vyvinout rychlost pohybu 1 m·s⁻¹.

Na zařízení Gleeble 3500 je možné v závislosti na konfiguraci testu (geometrie a materiál vysokoteplotních čelistí, volná délka vzorku) definovat rozdílné tvary teplotních polí. Teplotní gradienty také výrazně ovlivňuje samotný testovaný materiál a jeho teplotní a elektrická vodivost, poměr povrchu a objemu, délka, průřez nebo také tzv. volná délka. Volnou délkou se rozumí vzdálenost mezi okraji kontaktů vzorku s vysokoteplotními čelistmi (viz obr. 2.13). Z důvodu vodního chlazení čelistí je v místě styku čelistí a vzorku menší teplota než uprostřed volné délky vzorku, proto lze přepokládat, že čím menší bude volná délka, tím strmější bude i teplotní gradient ve vzorku [21].



Obr. 2.13 Volná délka vzorku [21]

Čelisti, do kterých je upnut zkoušený vzorek, mají několik různých druhů provedení a jsou vyrobeny z různých druhů materiálů kvůli své teplotní vodivosti, nejčastěji z mědi a z austenitické vysokolegované oceli. Jejich tvar (viz obr. 2.14) závisí například na upínaném vzorku, zatěžovací síle, odvodu tepla i na samotném ohřevu.

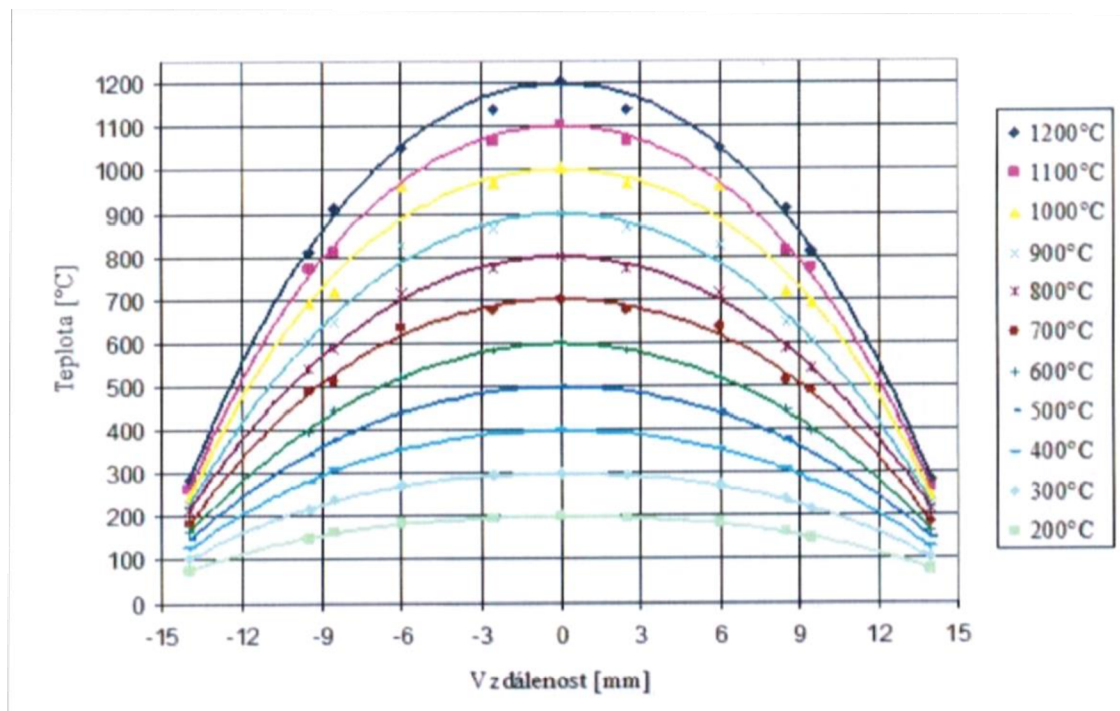


Obr. 2.14 Typy upevňovacích čelistí [21]

Jak již bylo řečeno, na výsledný teplotní gradient ve vzorku a na způsob jeho upnutí má vliv mnoho aspektů. Je proto nutné brát v potaz několik následujících otázek:

- 1) Jaký typ teplotního gradientu je potřebný pro test?
- 2) Jaký bude tvar a materiál vzorku?
- 3) Jaká bude zatěžovací síla?
- 4) Jaká bude maximální rychlost ohřevu, popřípadě ochlazení?
- 5) Jakým maximálním teplotám budou čelisti vystaveny?

Jelikož se tato práce zabývá velikostí vnitřních napětí, která byla způsobena svařovacím cyklem, je nutné použít takové podmínky, aby se teplotní gradient co nejvíce podobal teplotnímu gradientu u reálného cyklu. Jako příklad je zde uveden graf teplotních gradientů pro ocel S355J2 (viz obr. 2.15), které jsou v rozmezí od 200 do 1200 °C. Ocel je upnuta do měděných čelistí s plnými kontakty [21].



Obr. 2.15 Teplotní gradient na volné délce vzorku oceli S355J2 [21]

2.11 Rešerše stávajícího stavu poznání

Mechanickými vlastnostmi svarových spojů se zabývá řada odborníků. Z pohledu změny vlastností se zpravidla orientují na změny v teplotně ovlivněné oblasti TOO. A právě na studie dějů, k nimž dochází v TOO, se s úspěchem využívají teplotně-napěťové simulátory. Studie se zpravidla věnují strukturním změnám, hrubnutí zrna, vlivu teplotních cyklů na únavovou životnost atd. Zvláštní kapitolou jsou pak studie vlivu teplotních cyklů a vlastní nebo vynucené tuhosti na úroveň zbytkových vlastností.

Vlivem teplotních cyklů s využitím tepelně-napěťového simulátoru se zabývali například Boumerzoug et al. [22], kteří simulovali vliv teplotního cyklu na mikrostrukturu nízkouhlíkové oceli. Hodnoty získané během simulace porovnávali s hodnotami získanými během skutečného svaření. Při experimentu využívali jeden typ oceli a upravovali teplotní cykly. Z teplotních cyklů získaných při skutečném svařování

vychází i článek od Mičiana et al. [23]. Ti se zabývali vlivem změny parametru $t_{8/5}$ u teplotních cyklů aplikovaných na ocel S960MC. Mičian et al. [23] pro simulaci využili přístroj Gleeble 3500. Stejný přístroj využili i Moravec et al. [24] při experimentech, jejichž cílem bylo vyhodnotit rozložení maximálních teplot v tepelně ovlivněné oblasti v oceli S460MC v závislosti na vneseném teple během svařování GMAW.

Měřením zbytkového napětí se zabývá například studie od Somodiho a Kövesdiho [25]. Ti při pokusech nevyužívali simulátor, ale zbytkové napětí měřili na předem definovaných svařencích. Somodi a Kövesdi [25] však také na rozdíl od výše zmíněných studií pracují s různými typy ocelí (S235, S355, S420, S460, S500 a S960), v čemž lze spatřovat podobnost s touto diplomovou prací – nejedná se však o jemnozrnné ocele.

Měřením zbytkových napětí na jemnozrnné oceli se zabývali i Kik et al. [26]. Konkrétně se soustředili na to, jakým způsobem ovlivňují teplotní a časové změny procesu žihání hodnoty a rozložení napětí v simulované tepelně ovlivněné oblasti svarových spojů oceli S700MC.

Autoři na úvod své studie vyzdvihují důležitost svařovaných konstrukcí, se kterými se lze setkat ve všech oblastech lidského života. Tyto konstrukce musí být co nejkvalitnější a splňovat stanovené požadavky, jako jsou například mechanické vlastnosti, čemuž napomáhá rychlý rozvoj metalurgie a technicky vyspělé postupy. Autoři v této souvislosti zmiňují ekonomické výhody, které s sebou tyto materiály přinášejí – ačkoli jsou materiály lehčí, jejich mechanické vlastnosti zůstávají stejné, a tak je jejich využití výhodnější, protože je potřeba menší množství materiálu. To je spojeno také s nižšími náklady na přípravu před svařením, zpracování i přepravu. Z tohoto důvodu se jemnozrnné oceli hojně využívají ve strojírenském i automobilovém průmyslu, například při výrobě rámu nákladních vozidel, při stavbách i při výrobě lodí.

I když jemnozrnné oceli disponují celou řadou výhod, jejich zpracování mohou provázet jisté problémy. Autoři zmiňují [26] například skutečnost, že materiál při svařování ztrácí své původní vlastnosti z důvodu rozpuštění precipitátů, či skutečnost, že kvůli přesunu mikrolegur do svarového kovu dochází ke změně v uhlíkovém ekvivalentu mezi základním materiálem a svarem. Dalším problematickým aspektem jemnozrnných ocelí je to, že svařované konstrukce obsahující desítky svarů je nutné tepelně zpracovat, aby se snížila úroveň vnitřních napětí a sjednotila se jejich distribuce.

Toto je nezbytný krok, neboť během teplotních cyklů při svařování může vlivem nechtěných změn dojít ke křehkému a únavovému lomu. Zpracování je nutné provést za přesně nastavených parametrů, protože hrozí, že materiál ztratí mechanické či plastické vlastnosti. Na základě předešlých výzkumů lze konstatovat, že pokud žihací teploty nepřesáhnou 600 °C, ocel by si své mechanické vlastnosti měla zachovat.

Ačkoli se tato diplomová práce nesoustředí na žihání, taktéž se zabývá jemnozrnnými ocelmi a jejich vnitřními napětími. V obou případech je ale nutné vědět, jak se tyto ocele chovají při zpracování. Autoři zdůrazňují [26], že je důležité zkoumat, jaký má vliv jak svařovací proces, tak tepelné zpracování na probíhající strukturální změny, které mohou případně vést ke vzniku vnitřního napětí.

Kik et al. [26] ve svém výzkumu vystavují vzorky ocele S700MC teplotním cyklům simulovaného svařování a tepelného zpracování, konkrétně žihání, za použití předem definovaných parametrů. Výzkum, stejně jako tato závěrečná práce, využívá simulátor Gleeble 3500, ale na rozdíl od ní zkoumá tři teplotní cykly, které se liší maximální teplotou. Tato diplomová práce pracuje pouze s jedním teplotním cyklem, ale taktéž měří zbytková napětí pomocí difrakční analýzy. Kik et al. [26] po změření zbytkových napětí vzniklých během teplotních cyklů aplikovali žihání pro snížení zbytkových napětí při různých teplotách. Pozorovali tak vliv teploty a doby výdrže při žihání na velikost a rozložení zbytkových napětí ve vzorku. V posledním kroku byla provedena numerická analýza, která by vytvořila rámec pro metodologii použitelnou při analýze toho, jaký vliv mají změny v procesu žihání po svařovacím cyklu na hodnoty a distribuci zbytkových napětí.

Jemnozrnnými ocelmi se zabývá i článek od Bukovské et al. [27], jejichž cílem bylo stanovit vliv svařování na únavovou životnost vzorků a určit zbytková napětí vzniklá v tepelně ovlivněné oblasti. Autoři při experimentu opět využili simulátor Gleeble 3500, přičemž vstupní data byla nastavena dle reálně naměřených hodnot při skutečném svařovacím cyklu realizovaném metodou MAG. Bukovská et al. [27] experiment provádí na vzorku s geometrií, která se shoduje s geometrií vzorku, který bude použit při experimentu prováděném i v rámci této diplomové práce. Autoři pro zjištění vnitřních napětí taktéž využívají difrakční metodu pomocí stejného přístroje.

Ačkoli se tedy téma objevuje v mnoha studiích, jen některé si kladou za primární cíl měřit zbytkové napětí. Specifika této práce tedy spočívají v tom, že si za hlavní cíl

klade změřit zbytková napětí u termomechanicky zpracovaných jemnozrnných ocelí s rozdílnou hodnotou meze kluzu. Cílem je najít závislost mezi mechanickými vlastnostmi ocelí a velikostí zbytkových napětí po svařování při stejných podmínkách. Práce využívá výsledků z bakalářské práce Milana Pekárka [28], který měřil zbytková napětí po aplikaci teplotního cyklu na jemnozrnné oceli S700MC.

3 Experimentální část

V experimentální části se tato diplomová práce zabývá posouzením toho, jak bude vypadat velikost a rozložení zbytkových napětí u ocelí s rozdílnými mechanickými vlastnostmi po aplikaci teplotně-napěťového cyklu realizovaného za identických podmínek. Experimentální část navazuje na bakalářskou práci Milana Pekárka [28], realizovanou na HSLA oceli S700MC, a rozšiřuje jí na oceli S355MC, S550MC. Proto budou pro obě oceli využity identické vzorky, identický teplotní cyklus a identické podmínky tuhosti upnutí v přístroji Gleeble 3500. K následnému vyhodnocení zbytkových napětí bude použit přístroj na difrakční analýzu Proto iXRD Combo. V následujících kapitolách budou popsány mechanické vlastnosti, chemické složení a oblast využití jednotlivých porovnávaných ocelí.

3.1 Ocel S355MC

Jako jeden ze tří vybraných materiálů byla zvolena konstrukční ocel S355MC, s minimální zaručenou hodnotou meze kluzu 355 MPa. Jak napovídá její označení dle normy ČSN EN 10027-1, písmeno „S“ značí, že se jedná o konstrukční ocel, písmeno „M“ označuje termomechanické válcování a písmeno „C“ zvláštní tváritelnosti za studena. Tato ocel se převážně používá na zvedací konstrukce, motorová vozidla, přepravní zařízení a v mnoha dalších oblastech, kde je potřeba větší únosnosti při nižší hmotnosti oproti klasickým konstrukčním ocelím [29].

Mechanické vlastnosti oceli dle normy ČSN EN 10149-2 spolu s hodnotami z materiálového atestu a hodnotami naměřenými experimentálně jsou uvedeny v tabulce 3.1. Experimentální hodnoty byly zjištěny statickou zkouškou tahem dle normy EN ISO 6892-1, za pomoci trhacího přístroje Tira Test 2300 na dvou vzorcích.

Tabulka 3.1

	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{40mm} [%]
Průměrná hodnota:	474,1±8,3	545,8±5,0	12,83±0,07	26,36±0,02
Materiálový atest	409	545	-	25
ČSN EN 10149-2	>355	470-630	-	>20

Jak je zřejmé z tabulky 3.1, naměřené hodnoty meze kluzu, meze pevnosti, homogenní tažnosti i celkové tažnosti vyhovují údajům daným normou ČSN EN 10149-2. Experimentálně zjištěné hodnoty odpovídají údajům z materiálového atestu, odchylka je pouze v hodnotě meze kluzu, která je oproti hodnotě z materiálového atestu vyšší.

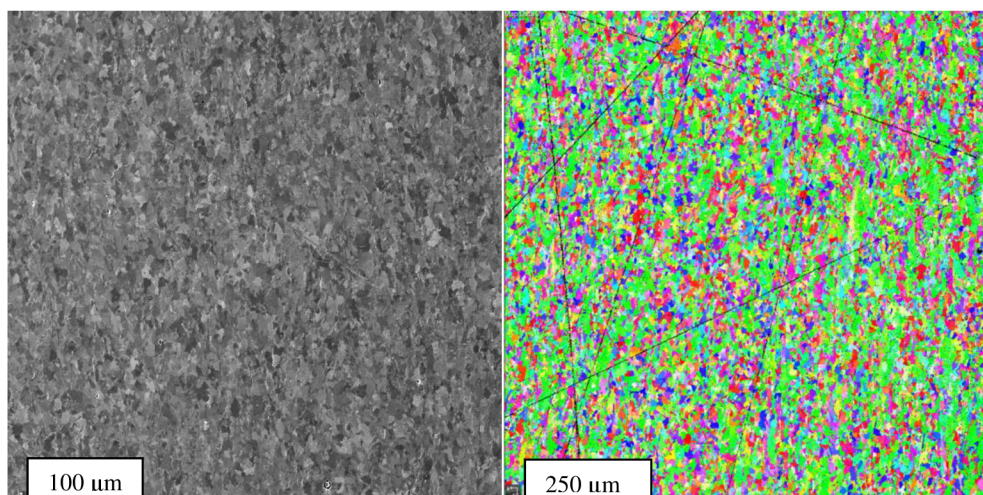
Chemické složení oceli je velice důležitý ukazatel, který může částečně vysvětlit chování materiálu za určitých teplot a který má vliv na mechanické vlastnosti materiálu, popřípadě další vlastnosti materiálu. V tabulce 3.2 je proto chemické složení uvedeno z několika zdrojů, první je dle normy ČSN EN 10149-2, druhé dle materiálového atestu a třetí bylo zjištěno experimentálně, za pomoci spektrometru Bruker Q4 Tasman.

Z tabulky 3.2 jsou zřejmé hodnoty, které byly zjištěny experimentálně a vyhovují předepsané normě. Výraznější odchylka je pouze v materiálovém atestu v množství C, který by měl být pod hranicí 0,12 hm. %. U termomechanicky zpracovaných ocelí je zpravidla obsah uhlíku limitován pod 0,1 hm. %, proto je naměřená hodnota 0,06 hm. % pravděpodobná.

Tabulka 3.2

	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti
ČSN EN 10149-2	max. 0,12	max. 0,50	max. 1,50	max. 0,025	max. 0,020	min. 0,015	max. 0,09	max. 0,20	max. 0,15
Materiálový atest	0,18	0,028	1,24	0,012	0,007	0,054	0,01	<0,001	<0,001
Q4 Tasman	0,06	0,023	1,06	0,016	0,009	0,057	0,032	<0,001	<0,001

Dalším krokem bylo stanovení průměrné velikosti zrn. Analýza byla realizována pomocí metody EBSD na skenovacím elektronovém mikroskopu Tescan Mira 3. Bylo provedeno metalografické zpracování a mikroskopické vyhodnocení dodané oceli. EBSD analýza byla realizována s krokem snímání 1 μm na snímané ploše o velikosti 1x1 mm. Výsledná průměrná hodnota velikosti zrna byla 7 μm . Výsledná struktura a grafické znázornění EBSD analýzy jsou vyobrazeny na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Struktura + EBSD analýza oceli S355MC

Protože bude následná analýza zbytkových napětí realizována na vyžihaných vzorcích, bylo třeba posoudit, jaký vliv bude mít žihání na mechanické vlastnosti oceli. Žihání vzorků pro statickou zkoušku tahem bylo provedeno ve vakuové peci při teplotě 600 °C po dobu 2 hodin. Zkouška proběhla opět na stroji Tira Test 2300. Zjištěné mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3

	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{40mm} [%]
Průměrná hodnota:	501,3±5,0	521,3±0,9	14,4±0,2	30,4±0,8

3.2 Ocel S550MC

Jako další materiál byla zvolena konstrukční ocel s minimální zaručenou hodnotou meze kluzu 550 MPa. Jedná se opět o termomechanicky zpracovanou ocel se zvláštní tvářitelností za studena jako předešlá ocel S355MC. Tato ocel se používá opět v širokém spektru na výrobu různých komponent, kde je potřeba zachovat pevnost při snížení hmotnosti dílu. Stejně tak jako u předchozí oceli i zde byly naměřeny hodnoty mechanických vlastností, které jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tabulka 3.4

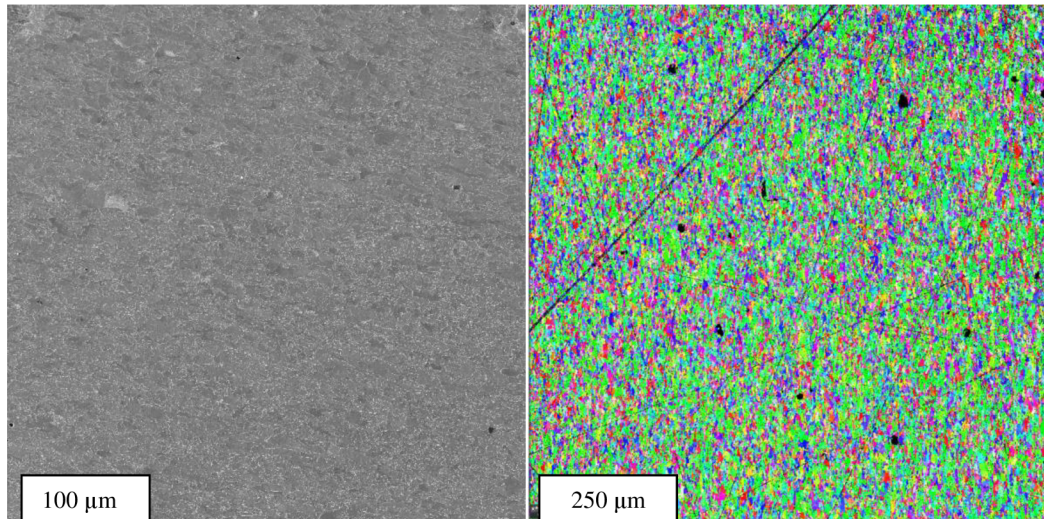
	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{40mm} [%]
Průměrná hodnota:	712,3±2,4	818,0±2,2	9,41±0,09	21,03±0,15
Materiálový atest	585	659	-	27
ČSN EN 10149-2	>550	600-760	-	>12

V tabulce 3.5 je pak uvedeno chemické složení dané normou ČSN EN 10149-2, materiálovým atestem i experimentálně zjištěné pomocí spektrometru Bruker Q4 Tasman.

Tabulka 3.5

	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti
ČSN EN 10149-2	max. 0,12	max. 0,50	max. 1,80	max. 0,025	max. 0,015	min. 0,015	max. 0,09	max. 0,20	max. 0,15
Materiálový atest	0,07	0,47	1,84	0,008	0,001	0,035	0,106	0,01	-
Q4 Tasman	0,059	0,412	1,797	0,009	0,002	0,034	0,054	0,008	0,094

Na elektronovém mikroskopu byla opět provedena analýza mikrostruktury a EBSD analýza velikosti zrna za stejných podmínek jako u oceli S355MC. Výsledná průměrná hodnota velikosti zrna byla 5,5 μm . Výsledná struktura a grafické znázornění EBSD analýzy jsou zobrazeny na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Struktura + EBSD analýza oceli S550MC

Po provedení stejného typu žíhání na všech vzorcích jako u předchozí oceli byly naměřeny mechanické vlastnosti materiálu pomocí statické zkoušky tahem na přístroji Tira Test 2300, viz tabulka 3.6.

Tabulka 3.6

	R_e	R_m	A_g	A_{40mm}
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
Průměrná hodnota:	678,6±5,7	743,8±0,6	9,72±0,02	21,60±0,22

3.3 Ocel S700MC

Posledním materiálem využitým pro experimentální část práce je jemnozrná konstrukční ocel s minimální zaručenou hodnotou meze kluzu 700 MPa. Tato ocel, stejně jako předešlé oceli, je termomechanicky zpracovaná se zvláštní tvářitelností za studena. Používá se tam, kde jsou větší nároky na pevnost s úsporou hmotnosti, například při konstrukcích mostních jeřábů, zvedacích zařízení, komponent nákladních vozů, rámců, sklopných nákladních návěsů a mnoho dalších využití.

Výsledky mechanických vlastností (tabulka 3.7) byly převzaty z bakalářské práce Milana Pekárka [28] a jsou doplněny o hodnoty uvedené v normě ČSN EN 10149-2. Výsledky poslouží pro porovnání s výsledky z této diplomové práce. Chemické složení je uvedeno v tabulce 3.8.

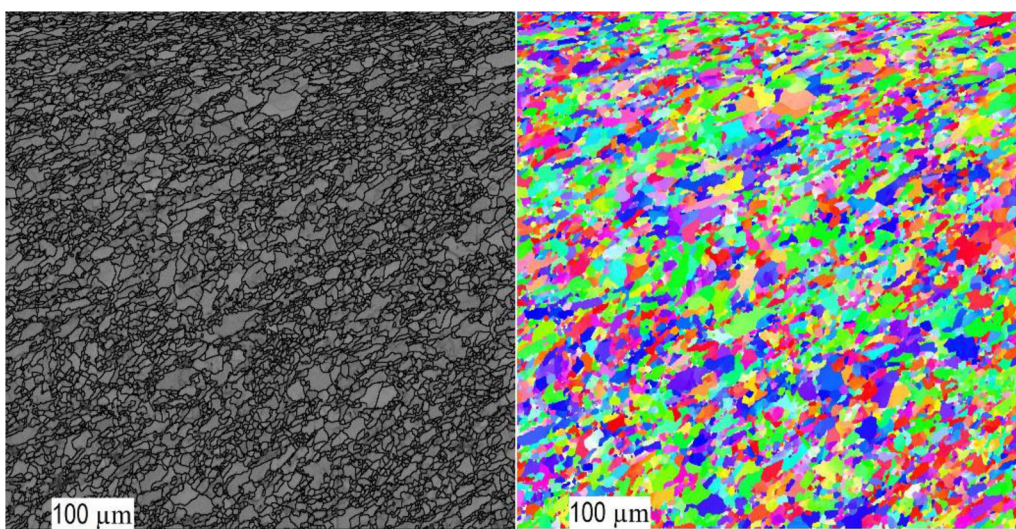
Tabulka 3.7

	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A₂₀ [%]
Průměrná hodnota:	753±8	851±1	11,01±0,71	24,25±0,70
ČSN EN 10149-2	>700	750-950	-	>12

Tabulka 3.8

	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V
ČSN EN 10149-2	max. 0,12	max. 0,60	max. 2,10	max. 0,025	max. 0,015	min. 0,015	max. 0,09	max. 0,20
Q4 Tasman	0,05	0,196	1,914	0,006	0,006	0,037	0,063	0,072
	Ti	Mo	B					
ČSN EN 10149-2	max. 0,22	max. 0,50	max. 0,005					
Q4 Tasman	0,056	0,112	0					

Při měřeních na elektronovém mikroskopu bylo zjištěno, že tato ocel má perliticko-bainitickou strukturu s průměrnou velikostí zrna 3,38 μm. Pro EBSD analýzu byla vybrána oblast o velikosti 300x300 μm s urychlovacím napětím 15 kV a krokem 0,25 μm.



Obr. 3.3 Struktura + EBSD analýza oceli S700MC [27]

Mechanické vlastnosti naměřené po žihání na snížení napětí po obrábění jsou uvedeny v tabulce 3.9.

Tabulka 3.9

R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{40mm} [%]
745±3	785±3	9,69±0,12	21,16±0,29

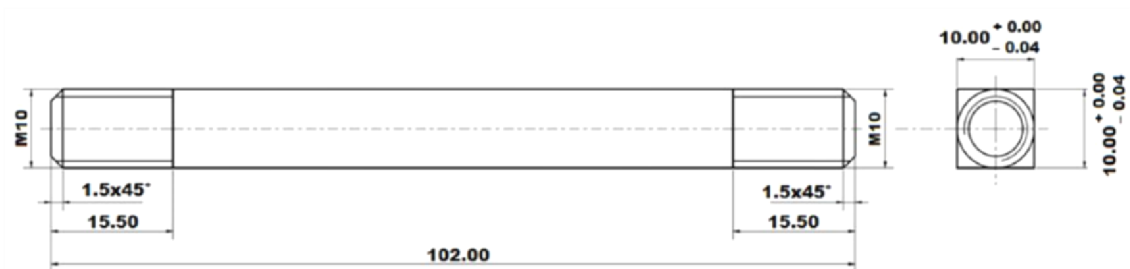
3.4 Návrh postupu měření

Pro tuto diplomovou práci byl navrhnut postup měření následovně:

1. definice teplotních cyklů a další podmínek experimentu, který bude proveden na tepelně napěťovém simulátoru Gleeble 3500,
2. aplikace teplotních cyklů na předem připravených vzorcích,
3. vyhodnocení naměřených hodnot po aplikaci teplotních cyklů,
4. příprava vzorků na měření zbytkových napětí a samostatné měření za pomoci difrakční analýzy pomocí Proto iXRD Combo,
5. vyhodnocení měření zbytkových napětí pro jednotlivé typy ocelí,
6. porovnání velikostí a tvarů zbytkových napětí u jednotlivých typů ocelí společně s výsledky již naměřenými pro ocel S700MC.

3.5 Příprava vzorků

Ještě před samotnou přípravou programu pro Gleeble 3500 bylo nutné připravit vzorky, na kterých budou experimenty provedeny. Testované materiály byly dodány ve formě plechu o tloušťce 12 mm. Pomocí CNC plazmového dělení byly plechy nařezány na pásy o šířce 110 mm a následně rozřezány na pásové pile na jednotlivé polotovary 12x12 mm. Z nich byly obrobena vzorky dle výkresu (obr. 3.4) na čtvercový průřez o rozměrech 10x10 mm a konce vzorků byly opatřeny závitem M10. Tento tvar vzorků byl zvolen záměrně, a to z důvodu snadnějšího měření zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakce. V případě válcového tvaru zkušební vzorku by muselo dojít ke kompenzaci tvaru v místě měření napětí.



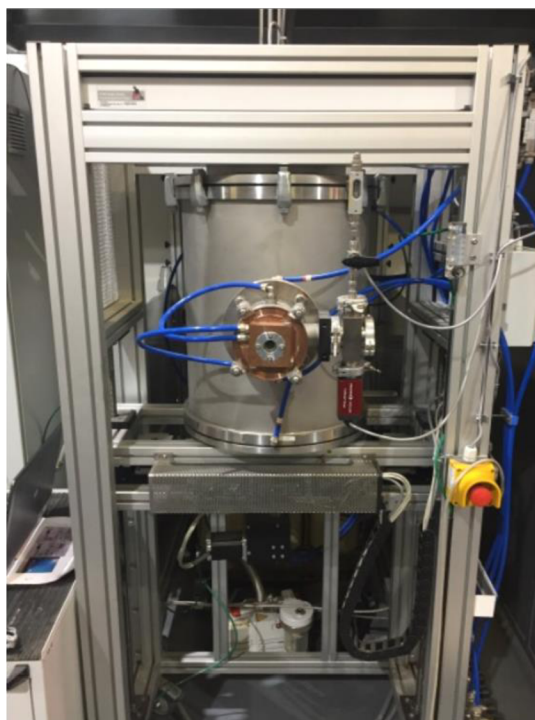
Obr. 3.4 Výkres vzorku pro Gleeble 3500 [30]

Po obrobení vzorků na finální rozměry (obr. 3.5) bylo nutné provést žihání ke snížení vnitřního pnutí.



Obr. 3.5 Obrobený vzorek

Tento krok se provádí z důvodu snížení vnitřního napětí v povrchových vrstvách vzorku, které vzniklo během obrábění vzorku působením nástroje na obrobek. Po frézování se v povrchových vrstvách vzorku vyskytuje tahové napětí o velikosti 550 až 600 MPa. K žihání byla využita vakuová pec Reetz (obr. 3.6). Vzorky byly uzavřeny do komory, která byla následně vyvakuována na požadovanou hodnotu vakua $8 \cdot 10^{-5}$ Pa, a poté bylo provedeno žihání na teplotu 600 °C po dobu dvou hodin. Rychlost ohřevu je realizována kaskádově, z důvodu udržení dostatečně vysokého vakua, rychlost ochlazování pak byla $5 \text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 3.6 Vakuová pec Reetz

3.6 Simulace svařovacího cyklu na přístroji Gleeble

Přístroj Gleeble 3500 je vybaven takzvaným zpětnovazebným řízením, které jeho systému poskytuje údaje o konkrétních hodnotách veličin v definovaném a kontrolovaném místě zkušební vzorku. Jedná se nejen o údaje o konkrétní teplotě, buď v místě přivaření termočlánku, nebo v místě snímání pyrometrem, ale také údaje o tlaku působícím na vzorek v případě řízení v režimu síly nebo údaje o deformaci vzorku, v případě řízení v režimu deformace. Protože se v případě aplikace svařovacích cyklů jedná o velmi rychlé děje, je nezbytné, aby byla odezva pro řídicí systém dostatečně rychlá a systém tak mohl vše korigovat dle nastaveného programu.

Proto jsou teplotní cykly zpětnovazebně řízeny téměř výhradně termočlánky. Pokud by termočlánek při pokusu upadl nebo by došlo k jinému poškození či k jeho přerušení, systém zaregistruje nekonečně velký odpor mezi drátky termočlánku. Tato porucha je okamžitě vyhodnocena jako nejvyšší možná dosažitelná teplota a program se přeruší. Jelikož systém Gleeblu reguluje výkon transformátoru na základě získaných hodnot teploty ze vzorku, je třeba vždy nastavit maximální akceptovatelnou teplotu, při níž dojde k přerušení testu. Ohřevy totiž mohou probíhat velmi vysokými rychlostmi

dosahujícími až $10\,000\text{ °C}\cdot\text{s}^{-1}$, při nichž nemá obsluha šanci dostatečně rychle zareagovat.

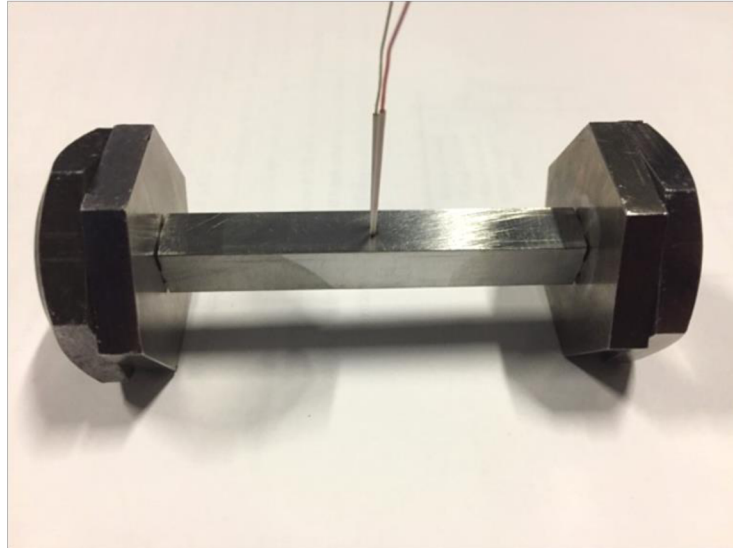
Jak již bylo zmíněno, je nutné na vzorek připevnit termočlánek. V tomto případě se používají termočlánky typu K a jsou připevněny za pomoci kondenzátorové svářečky (viz obr. 3.7), která je určena přímo pro tuto činnost.



Obr. 3.7 Kondenzátorová svářečka na termočlánky

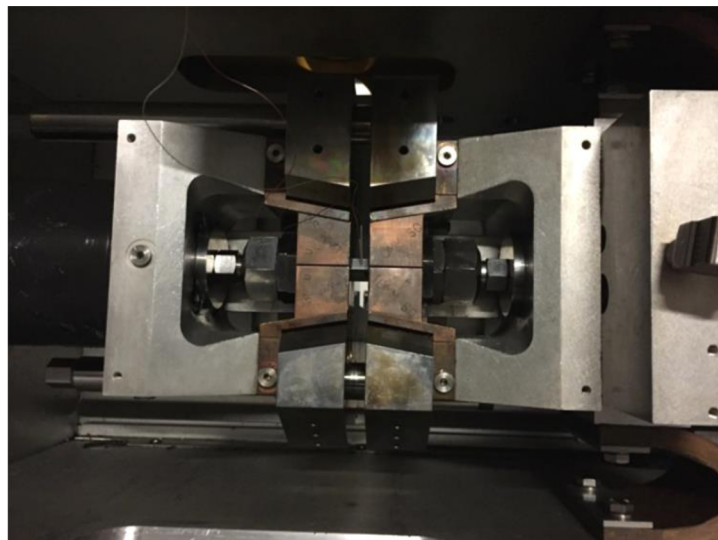
Při připevnění obou drátků vedení termočlánek je nutné pracovat co nejprecizněji, aby byly drátky přivařeny k sobě co nejbližší a snímaly tak stejnou teplotu. Vzhledem k isothermickému ohřevu vzorku ve směru osy vzorku je třeba, aby byly oba drátky na stejné isothermické linii. Nejprve je důležité si připravit pracovní desku svářečky na správnou geometrii vzorku, která na ni bude upevněna. V tomto případě se jedná o vzorek se čtvercovým průřezem. Dalším krokem je vyznačení středu vzorku v podélném směru (isothermická linie) pomocí posuvného měřítka. Dále následuje lehké obroušení plochy brusným papírem v místě, kde bude termočlánek připevněn. Poté je možné přistoupit k přivaření termočlánek. Výsledek je ukázán na obr. 3.5.

Jako další krok je nutné na vzorek našroubovat příslušné upevňovací matice M10. Matice se našroubuje až na konec závitu a zajistí se druhou kontramaticí (viz obr. 3.8).



Obr. 3.8 Vzorek s připevněnými termočlánky a s našroubovanými maticemi

Podle tvaru testovaného vzorku a požadavku na rozložení teplot ve vzorku je volen tvar a materiál vysokoteplotních čelistí. V tomto případě byly zvoleny čelisti čtvercového průřezu s plným kontaktem z mědi. Tyto čelisti je nutné upevnit na vzorek, který je záhy opatrně vložen do zkušební komory přístroje (viz obr. 3.9). Jeho upevnění je provedeno pomocí speciálních stavitelných (rozpěrných) matic, které upevní vzorek vůči stěnám tak, aby nemohl dilatovat. Pomocí klíče je nutné matice pečlivě dotáhnout.



Obr. 3.9 Upevnění vzorku do zkušební komory přístroje Gleeble 3500

Další krok, který je potřeba provést, je správné zapojení termočlánku do svorkovnice na pozici TC1 uvnitř komory (viz obr. 3.10). Následně je možné komoru uzavřít, uzavřít vyrovnávací ventil tlaků a přejít k samotnému testu.



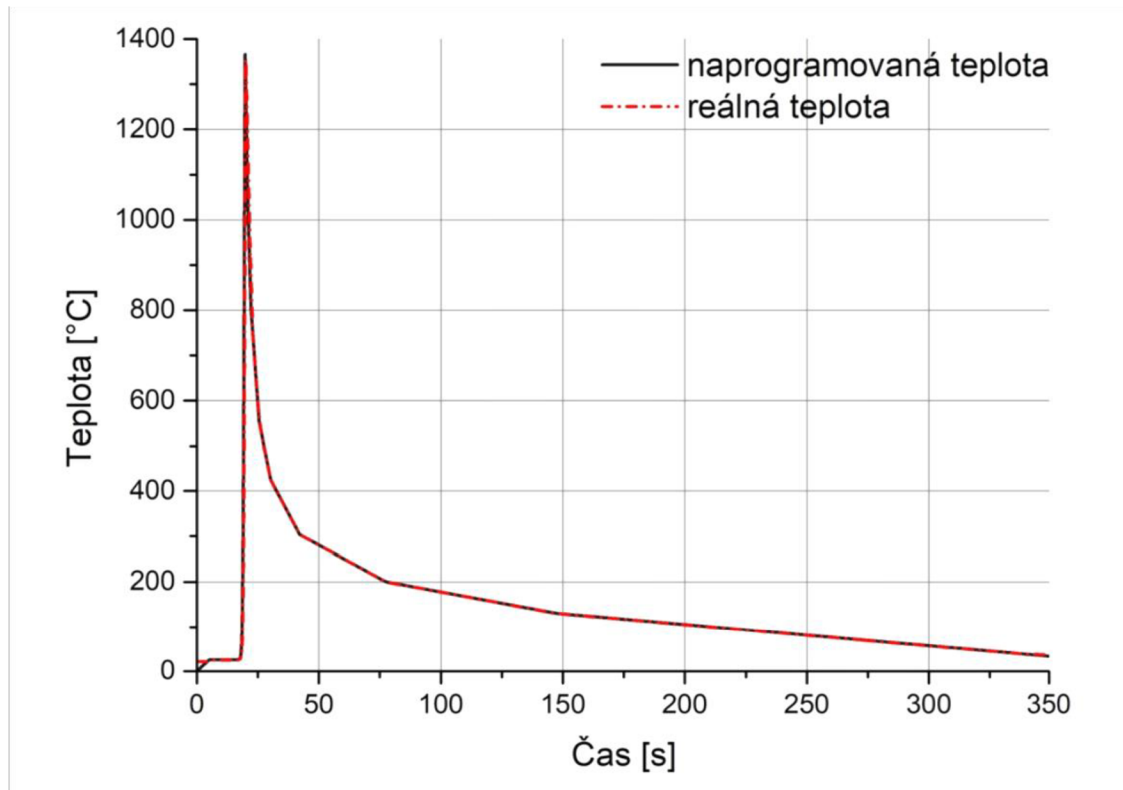
Obr. 3.10 Připevnění drátků do svorkovnice

3.6.1 Příprava programu pro simulaci svařovacího cyklu

Před aplikací svařovacího cyklu je nutné připravit zkušební program, dle kterého proběhne test. Nejprve je nutné stanovit maximální teplotu, která bude v programu dosažena. V tomto případě se jedná o teplotu 1366 °C. Tato teplota byla zvolena i z důvodu již provedených cyklů na oceli S700MC, v již zmíněné bakalářské práci [28].

Samotný program byl vytvořen v softwaru QuickSim2. V tomto softwaru je možné nastavit celý teplotně-napěťový cyklus, včetně okrajových podmínek experimentu a limitních podmínek procesu. Okrajovými podmínkami experimentu jsou míněny zejména podmínky týkající se tuhosti upnutí během aplikace teplotního cyklu. Okrajové podmínky budou popsány níže. Limitními podmínkami procesu jsou pak omezení zajišťující, aby v daném programu nebylo možné překročit předem definované parametry a nedošlo tak k poškození přístroje. Například při odpadnutí termočlánku systém vyhodnotí poruchu a za pomoci zpětného řízení okamžitě vypne ohřev vzorku.

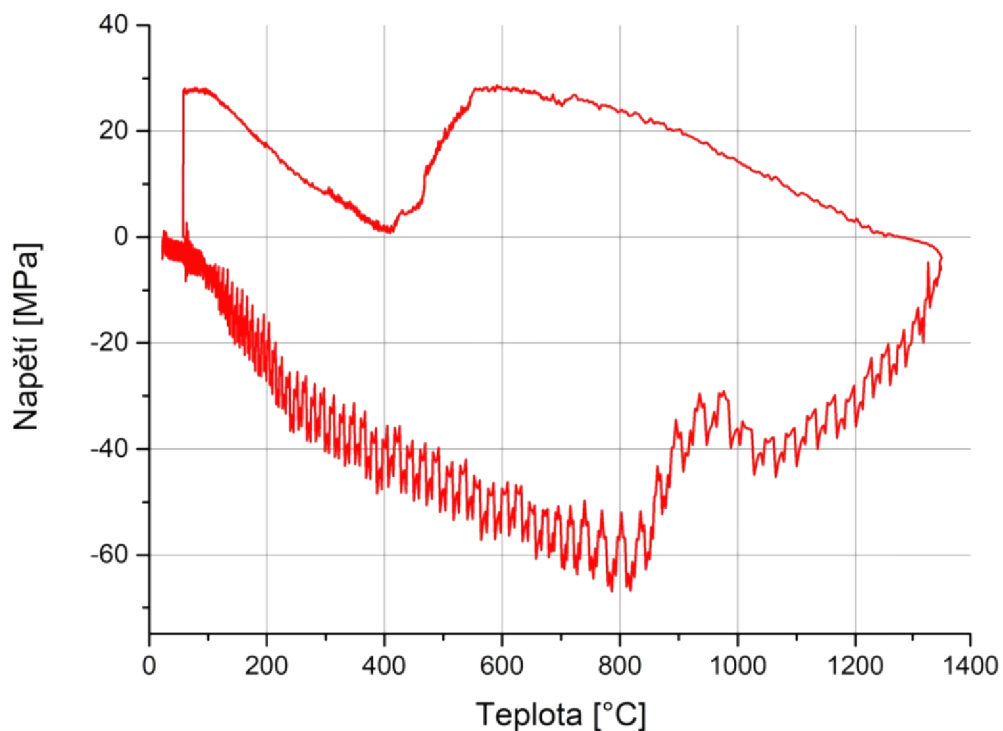
Teplotní cyklus byl naprogramován dle hodnot, které byly již v minulosti naměřeny na reálném svařovacím cyklu, a to metodou MAG. Výsledný teplotní cyklus, který bude aplikován na vzorek, je vyobrazen na obr. 3.11.



Obr. 3.11 Průběh teplotního cyklu na vzorku z oceli S355MC

Dalším parametrem, kterým je možné ovlivňovat teplotně-napěťový cyklus, je nastavení síly, kterou má působit čelist přístroje na vzorek. Přístroj Gleeble je totiž vybaven hydraulicky ovládanou posuvnou čelistí s tenzometrickou hlavou a průtahoměrem, která má za úkol působit v závislosti na hodnotách získaných z tenzometrické hlavy. Pokud by neměla ve vzorku vzniknout žádná plastická deformace, lze nastavit, aby síla působící na vzorek byla nulová.

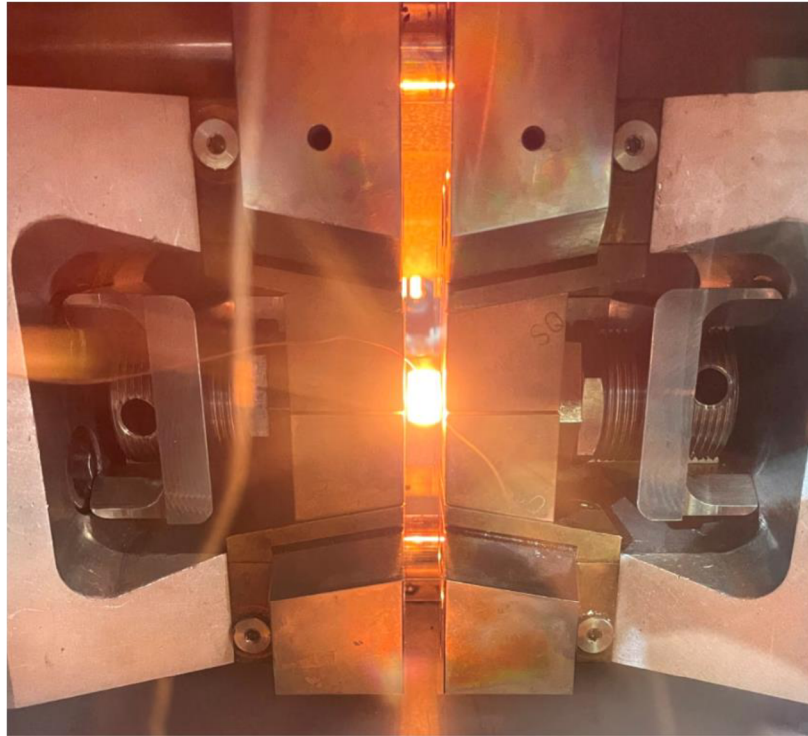
Během experimentu prováděného v rámci této diplomové práce bylo zapotřebí simulovat tuhé upnutí vzorku. Okrajovou podmínkou zde bylo nastaveno, že hydraulická čelist nesmí vykonat žádný lineární posuv. Díky tomu je zamezeno roztahování vzorku a ve vzorku vzniká napětí, které je při dosažení hodnoty meze kluzu při dané teplotě kompenzováno plastickou deformací. Pomocí tenzometrické hlavy bylo možné v průběhu testu zaznamenávat údaje o velikosti napětí, která se vytvořila uvnitř vzorku (obr. 3.12), z důvodu jejich velikosti a rozdílných směrů však nelze konstatovat,



Obr. 3.12 Průběh napětí v závislosti na teplotě u oceli S550MC

že se jedná o skutečné hodnoty vnitřního napětí ve vzorku. Co se ale dá z grafu jednoznačně vyčíst, je fázová transformace, která proběhla při ohřevu i při ochlazení. Na spodní křivce ohřevu se nachází přibližně v intervalu od 900 °C do 1100 °C. Na horní ochlazovací křivce probíhá přibližně od teploty 580 °C do teploty 400 °C.

Pokud jsou všechny přípravné kroky spojené se vzorkem a jeho upevněním provedeny, je možné přistoupit k vyvakuování pracovní komory přístroje. Vakuum se spustí na ovládacím panelu přístroje. Předem připravený program je možné spustit po dosažení hodnoty $4 \cdot 10^{-3}$ Torru. Na obr. 3.13 je ukázán vzorek v pracovní komoře v průběhu testu.

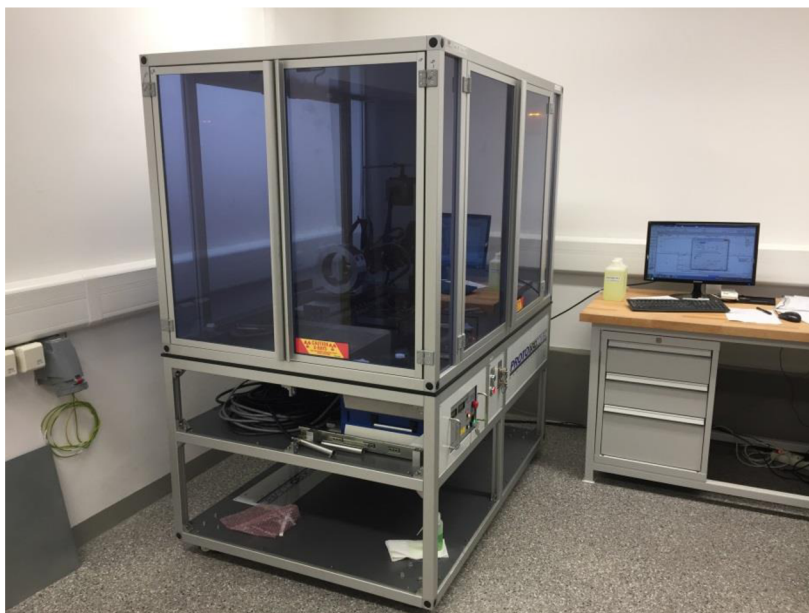


Obr. 3.13 Pohled na vzorek v průběhu testu

Po aplikaci teplotního cyklu na vzorek se napustí pomocí příslušného ventilu komora vzduchem, aby došlo k vyrovnání tlaků a mohla se tak otevřít. Následně se ze svorkovnice odpojí termočlánek a vyšroubují se stavěcí matice, které upevňují vzorek v komoře. Pomocí hydraulického posuvu je možné vzorek společně s měděnými čelistmi z pracovní komory vyjmout. Po vyjmutí vzorku je nutné odmontovat matice, které byly připevněny na vzorek. Při povolování a vyšroubovávání matic ze vzorku je nutné pracovat velice opatrně, aby se nechtěně do vzorku nevnesla nějaká zbytková napětí či aby nezrelaxovala. Tento postup byl proveden pro osm vzorků oceli S355MC a osm vzorků oceli S550MC. Poté, co proběhla simulace, bylo možné přejít k měření vnitřních napětí za pomoci difrakční analýzy.

3.7 Měření zbytkových napětí za pomoci difrakční analýzy

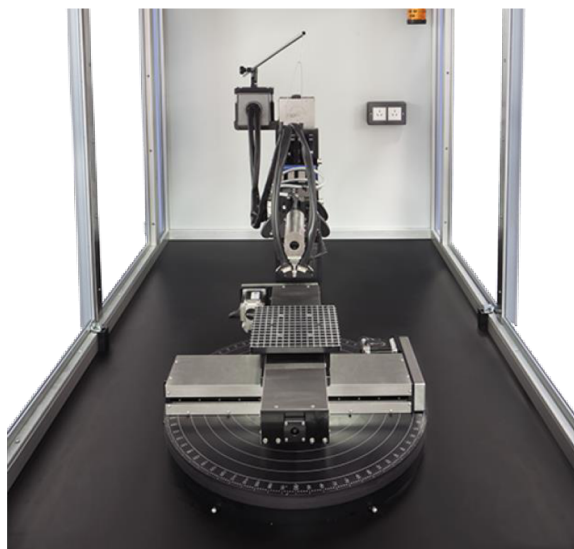
V dalším kroku bylo započato měření zbytkových napětí, která vznikla ve vzorcích po aplikaci teplotních cyklů. Tato napětí byla měřena na přístroji Proto iXRD Combo s chromovou rentgenkou (obr. 3.14).



Obr. 3.14 Proto iXRD Combo

Před začátkem měření bylo nutné stroj zahřát na požadovanou teplotu. Během zahřívání byly vzorky upnuty na křížový stůl (obr. 3.15), k tomuto úkonu postačí kousky plastelíny, do kterých se vzorky na koncích vtlačí, čímž se zamezí jejich pohybu a případnému vychýlení z dráhy měření. Software přístroje zvládne uložit pouze 100 měřicích bodů, proto je možné na křížový stůl připevnit pouze omezený počet vzorků. V tomto případě se jednalo o tři vzorky, každý s 33 měřenými body, tedy 99 bodů celkem.

Při samotném naprogramování přístroje je nejdříve nutné na každém vzorku ručně nastavit měřicí body. Nejprve se na rentgenku nasadí speciální kryt, který je vybaven snímačem doteku. Na vzorku se vyznačí střed, na který je nutné „najat“ rentgenkou pomocí ručního ovladače. Následně se nastaví nulové hodnoty ve všech osách. Poté se s krokem 1 mm od středu vzorku ve směru osy Y „natrasuje“ vždy 16 měřicích bodů, a to v obou směrech. Tento postup se provádí z důvodu křivosti vzorku (proměnlivé hodnoty osy Z), protože po aplikaci teplotního cyklu byl vzorek plasticky deformován a tím změnil svůj tvar.



Obr. 3.15 Pracovní stůl přístroje Proto iXRD Combo [31]

Stejný postup se provede i u ostatních vzorků, přičemž je nutné dopočítávat hodnoty v ose Y, protože vzorky nikdy nelze přesně upevnit do jedné roviny. Software přístroje bohužel neumožňuje nulování os na dalších vzorcích, pouze to je možné pouze u prvního z nich. Nastavení parametrů přístroje je vyobrazeno v tabulce 3.10.

Tabulka 3.10

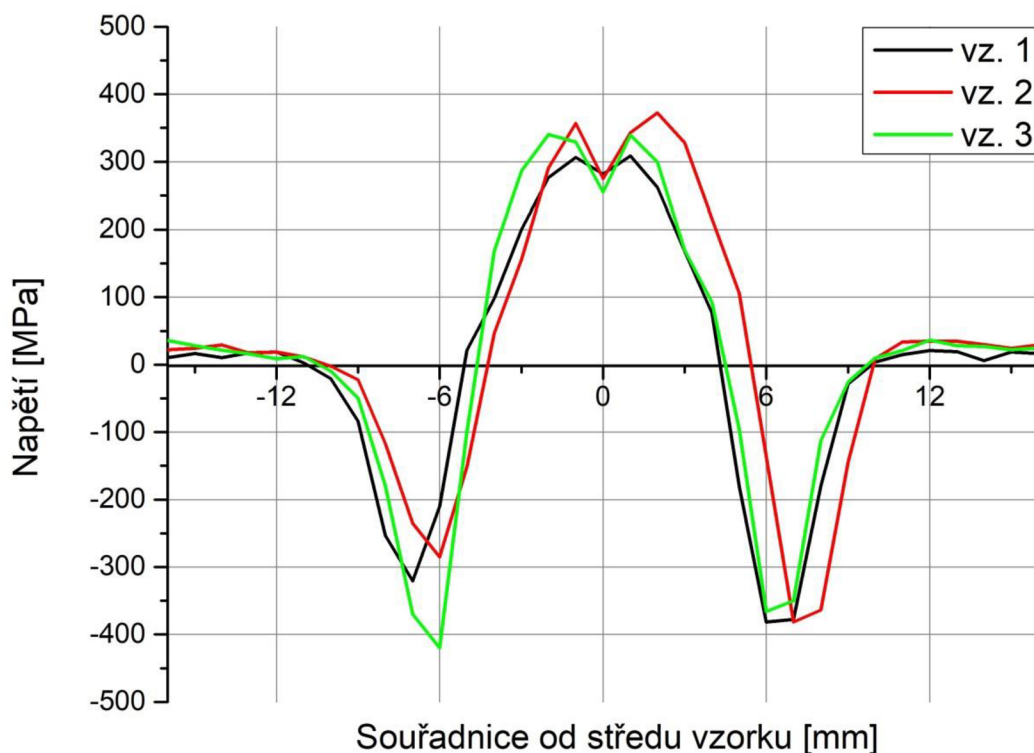
Použitá rentgenka	Cr rentgenka
Doba expozice	1 s
Použitý kolimátor	Ø 1 mm
Oscilace rentgenky	5°
Počet náklonů úhlu β	11
Počet opakování expozice pro každé měřené difrakční maximum	15

Měření proběhlo vždy pro tři vzorky pro každý typ oceli. Z bakalářské práce [28] je zřejmá vysoká opakovatelnost testů na vzorcích z oceli S700MC, včetně vysoké opakovatelnosti v rozložení a velikosti zjištěných zbytkových napětí.

3.7.1 Výsledné hodnoty z měření vzorků

Po dokončení všech měření bylo možné exportovat změřené hodnoty do programu pro tvorbu grafů. V tomto případě byl pro všechny grafy použit program OriginPro. Pro každý typ oceli byl vytvořen samostatný graf, ve kterém byly vyobrazeny všechny naměřené hodnoty ze všech vzorků.

V prvním případě byl vytvořen graf pro ocel S355MC (obr. 3.16). Jak je z grafu patrné, ve středu vzorku byla naměřena napětí tahová, která ve vzdálenosti cca 4,5 mm od středu vzorku přešla na napětí tlaková a přibližně 10 mm od středu vzorku přešla opět do tahu. Mírná odchylka je patrná na vzorku číslo 3, který ve vzdálenosti -6 mm od středu vykazuje hodnotu přibližně o 80 MPa vyšší než zbývající dva. Jelikož tento přístroj měří pouze do malé hloubky pod povrchem cca 0,1mm, je možné, že ačkoli byl vzorek po obrábění žíhán, v povrchové vrstvě mohla zůstat nějaká napětí, která se projevila takovýmto způsobem, popřípadě se mohlo jednat o lokální strukturní anomálie.

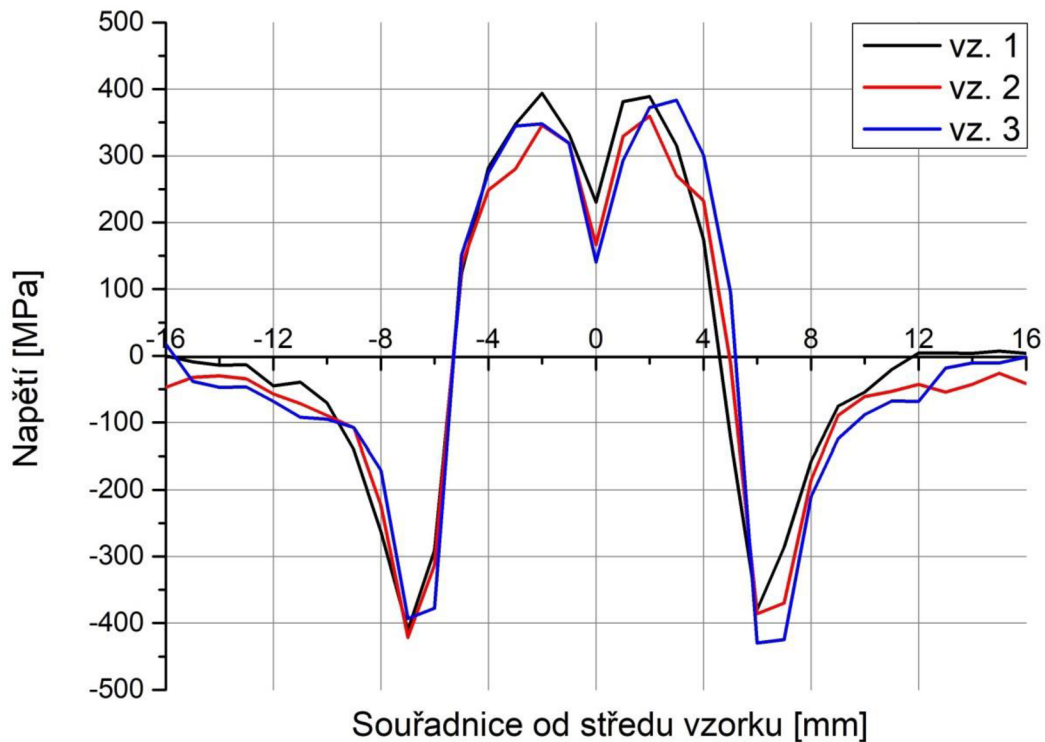


Obr. 3.16 Naměřená vnitřní napětí na vzorcích oceli S355MC

Druhý graf velikostí zbytkových napětí v závislosti na vzdálenosti od středu vzorku byl opět vytvořen ze tří vzorků, tentokrát ale z oceli S550MC (obr. 3.17). Stejně jako u předchozího grafu jsou i zde vidět opět v okolí středu vzorku napětí tahová, která okolo vzdálenosti 6 mm přecházejí na napětí tlaková. Je možné vidět i souměrná lokální minima u středu vzorků. Zajímavé je, že uprostřed vzorku (v místě nejvyšší teploty) došlo u oceli S550MC k mnohem výraznější relaxaci napětí než u oceli S355MC.

Z obou grafů byly vytvořeny průměrné hodnoty, které byly mezi sebou porovnány (obr. 3.18). Maximální hodnota napětí v tahu u oceli S355MC dosahuje

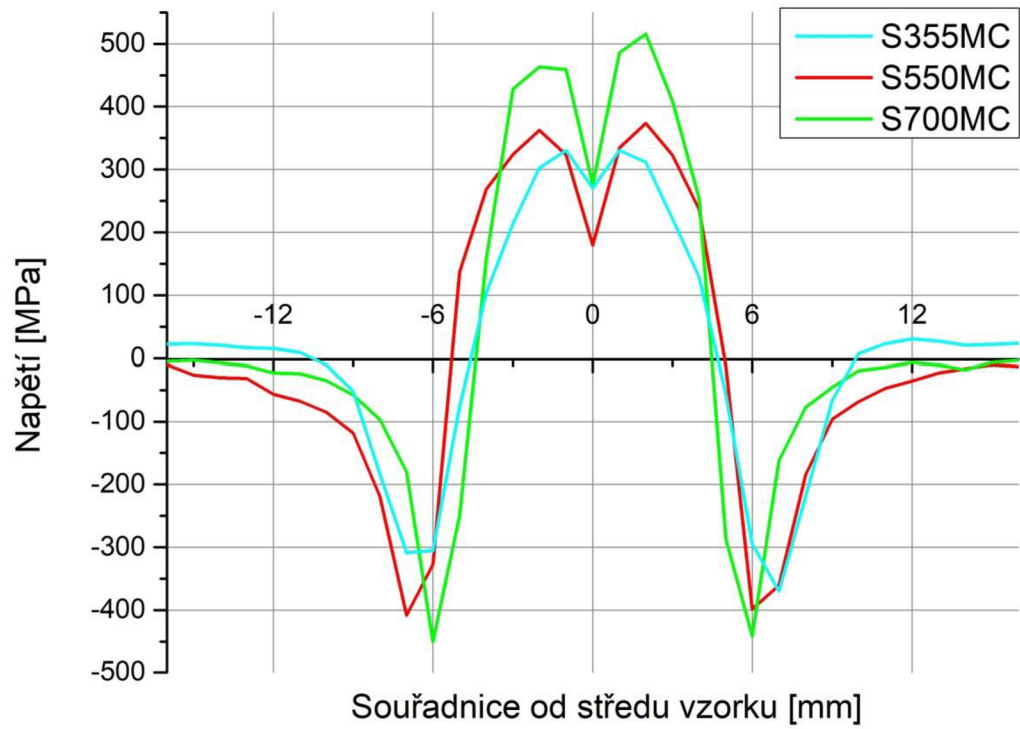
hodnot 330 MPa a maximální hodnota napětí v tlaku dosahuje 370 MPa. U druhého typu oceli S550MC dosahuje maximální hodnota vnitřního napětí v tahu 374 MPa a maximální hodnota vnitřního napětí v tlaku je 408 MPa.



Obr. 3.17 Naměřená vnitřní napětí na vzorcích oceli S550MC

3.7.2 Výsledné hodnoty získané z předchozích měření a jejich porovnání

Jak už bylo řečeno, tato diplomová práce srovnává získané výsledky s výsledky již dříve naměřenými v bakalářské práci Milana Pekárka [28]. Jedná se o ocel S700MC, která byla vyžehána na snížení vnitřních pnutí po obrobení, a na vzorky byl aplikován stejný tepelný cyklus. Následně bylo u těchto vzorků změřeno zbytkové napětí na stejném přístroji se stejnou rentgenkou a nastavením. Výsledky z měření jsou vyobrazeny v grafu zelenou čarou (obr. 3.18). Zbytková napětí naměřená po aplikaci teplotního cyklu na oceli S700MC dosahují maximálních hodnot 515 MPa v tahu a 450 MPa v tlaku.



Obr. 3.18 Porovnání vnitřních napětí v ocelích S355MC, S550MC a S700MC

4 Diskuze výsledků

V následující části budou rozebrány výsledky získané při měřeních popsanych v předchozí kapitole této práce. Jejich cílem bylo zjistit, jakých hodnot dosahují zbytková napětí po aplikaci teplotního cyklu s maximální dosaženou teplotou 1366 °C a jak jsou tato napětí rozložena. Jinak řečeno, cílem bylo posoudit, jak se vůči sobě budou lišit zbytková napětí dosažená při použití identického teplotně-napěťového cyklu aplikovaného na jemnozrnné oceli s rozdílnými mechanickými vlastnostmi, zejména s rozdílnou hodnotou meze kluzu.

Úroveň zbytkových napětí zůstávajících ve vzorcích po svařování je závislá na hodnotě meze kluzu, protože nad touto hodnotou je napětí kompenzováno plastickou deformací. Je ale třeba si uvědomit, že při použití teplotních cyklů se hodnota meze kluzu mění s teplotou, navíc také při vysokých teplotách dochází k relaxaci materiálu. To je také důvod, proč uprostřed použitých vzorků jsou zbytková napětí výrazně nižší.

Při zadávání tématu diplomové práce byl předpoklad, že průběh zbytkových napětí ve směru osy vzorku a tedy i ve směru teplotního gradientu bude podobný. Předpokládala se ale rozdílná úroveň hodnot zbytkových napětí, a to jak tahových, tak i tlakových – tedy předpokládalo se, že u jemnozrnných ocelí s vyššími mechanickými vlastnostmi bude po svařování dosaženo vyšších napěťových špiček. Dosažené výsledky, viz obr. 3.18, ale ukazují něco jiného. Zejména v místě maximálních napěťových špiček v tlaku jsou dosažené rozdíly jen velmi malé a napěťové špičky v oblasti tlaku mezi ocelmi S355MC a S550MC nepřesáhly nárůst napětí 10 %, přestože rozdíl v hodnotách jejich meze kluzu je mnohem větší.

V rámci realizovaných experimentů bylo třeba provést několik omezení tak, aby bylo možné plánovaná měření vůbec realizovat. První omezení se týkalo nutnosti vyžít vzorky po obrábění tak, aby v jejich povrchu byla minimální zbytková napětí. Jinak by měření zbytkových napětí metodou XRD byla zkreslena. Při posuzování mechanických vlastností jemnozrnných ocelí je tedy nutné vycházet z údajů po statické zkoušce tahem u vyžítých vzorků. Proto jsou v následující tabulce 4.1 souhrnně uvedeny průměrné hodnoty mechanických vlastností v dodaném stavu a ve stavu vyžítaném. Pro lepší představu jsou v tabulce doplněny i údaje o velikosti zrna.

Tabulka 4.1

	S355MC	S550MC	S700MC
R_e dodaný materiál [MPa]	474	712	753
R_e vyžíhaný materiál [MPa]	501	679	745
R_m dodaný materiál [MPa]	546	818	851
R_m vyžíhaný materiál [MPa]	521	744	785
A_g dodaný materiál [%]	12,8	9,4	11
A_g vyžíhaný materiál [%]	14,4	9,7	9,7
Střední velikost zrna [μm]	7,0	5,5	3,4

Pro komplexnější posouzení by potom bylo vhodné znát také přesné rozložení teplot ve vzorku a s tím souvisí i možnost přiřadit konkrétní oblasti vzorku mechanické vlastnosti (zejména hodnotu meze kluzu dané teplotě). To ale nelze u jemnozrnných termomechanicky zpracovaných ocelí udělat standardním způsobem. Protože jsou teplotní cykly realizovány při vysokých rychlostech ohřevu i ochlazování, je třeba obdobným způsobem koncipovat i zkoušky tahem za zvýšených teplot. To se týká především teplot přesahujících 900 °C, kde se již teplota výrazněji projevuje na zhrubnutí zrna.

Proto zde, jako doporučení pro další experimenty v této oblasti, navrhuji posoudit mechanické vlastnosti porovnávaných ocelí při vyšších teplotách, za použití simulátoru Gleeble 3500. Zde bude možné dosáhnout rychlého ohřevu s následným provedením tahové zkoušky. Dále doporučuji s využitím Quenching dilatometru provést na malých vzorcích teplotní cykly s vysokou rychlostí ohřevu a dobou výdrže odpovídající provedení statické zkoušky tahem. Na takovýchto vzorcích bude možné pomocí EBSD analýzy posoudit intenzitu zhrubnutí zrna.

5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo posoudit vliv mechanických vlastností vybraných ocelí na velikost zbytkových napětí po aplikaci teplotně-napěťového cyklu odpovídajícího reálnému svařování. Proto se v teoretické části práce zaměřila na vysvětlení podstaty vzniku zbytkových napětí, jejich rozdělení do skupin a na možnosti jejich snižování. Dále byla nastíněna podstata metody difrakčních analýz a také podstata termomechanického zpracování. Praktická část práce pak byla věnována stanovení mechanických vlastností vybraných jemnozrnných termomechanicky zpracovaných ocelí, samotné aplikaci teplotních cyklů v přístroji Gleeble 3500 a následnému měření zbytkových napětí metodou XRD. Dosažené výsledky byly diskutovány a na základě diskuze je možné stanovit následující závěry:

- 1) Pro porovnání byly vybrány tři jemnozrnné termomechanicky zpracované oceli S355MC, S550MC a S 700MC, s předpokládanými rozdíly v hodnotách meze kluzu 200 MPa, respektive 150 MPa. Na základě statické zkoušky tahem byly reálné rozdíly v hodnotě meze kluzu R_e mezi oceli S355MC a S550MC 238 MPa, ale mezi oceli S550MC a S700MC to bylo pouhých 41 MPa.
- 2) Po obrobení vzorků bylo použito žíhání ke snížení zbytkových napětí. Žíhání se na hodnotách meze kluzu R_e projevilo u ocele S355MC mírným zvýšením o 27 MPa. U ocele S550MC se pak hodnota meze kluzu R_e snížila o 33 MPa a u ocele S700MC o 8 MPa. Hodnota meze pevnosti R_m se u všech ocelí snížila, u S355MC o 4,6%, u S550MC o 9,1 % a u S700MC o 7,8 %.
- 3) U všech ocelí byla také stanovena střední velikost zrna: u S355MC 7,0 μm , u S550MC 5,5 μm a u S700MC 3,4 μm . Z těchto hodnot je zřejmé, že s narůstající mezí kluzu klesá i velikost zrna. Vyšších hodnot mezí kluzu je tedy převážně dosaženo zpevněním pomocí hranic zrn.
- 4) Rozložení zbytkových napětí ve vzorku po aplikaci identického teplotně-napěťového cyklu bylo pro všechny použité oceli obdobné, čímž se potvrdil původní předpoklad.
- 5) Předpokládané výrazné rozdíly v úrovni zbytkových napětí se nepotvrdily. V oblasti maximálních napěťových špiček v tlaku jsou rozdíly velmi malé, nepřesahující 10 %. V oblasti napěťových špiček v tahu jsou rozdíly větší. U oceli S550MC je nárůst tahových napětí oproti oceli S355MC o 13 %, naproti tomu u S700MC jsou hodnoty zbytkových napětí oproti S550MC o 38 % vyšší.

- 6) V rámci diskuze byla dána doporučení pro další směřování výzkumu v této oblasti.

Použitá literatura

- [1] HUDEC, Zdeněk. *Deformace a napětí při svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1998. ISBN 80-7083-313-0.
- [2] NEUMANN, Heinz. *Teorie svařování a pájení*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-171-9.
- [3] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [4] KRAUS, Ivo a Nikolaj GANEV. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03099-7.
- [5] PLUHARŮ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [6] PILOUS, Václav. Tepelné zpracování konstrukcí svařených z normalizačně žíhaných a normalizačně válcovaných ocelí S235 a S355 ve shodě s ČSN EN ISO 17663. Konstrukce [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/tepelne-zpracovani-konstrukci-svarenych-z-normalizacne-zihanych-a-normalizacne-valcovanych-oceli-s235-a-s355-ve-shode-s-csn-en-iso-17663/>
- [7] Vibrace odstraňují vnitřní napětí v materiálech. *MM Průmyslové spektrum* [online]. c2001–2023, 2010 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vibrace-odstranuji-vnitri-napeti-v-materialech>
- [8] VÁCLAVÍK, Jaroslav, Zbyněk BUNDA, Petr BOHDAN a Otakar WEINBERG. Aplikace vybraných metod pro měření zbytkového napětí. *NDE for Safety / Defektoskopie 2012* [online]. Seč, 2012 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/?id=14436>
- [9] ROSSINI, N. S., et al. „Methods of Measuring Residual Stresses in Components”. *Materials & Design*, roč. 35, březen 2012, s. 572–88. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>.
- [10] BURKET, Tomáš. *Analýza metod pro měření zbytkových napětí a vhodnost jejich použití*. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Vítězslav Rázek.

- [11] VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. *Experimentální mechanika*. Brno: VUT, 2003.
- [12] AJOVALASIT, A., Michele SCAFIDI, Bernardo ZUCCARELLO, M. BEGHINI, Leonardo BERTINI, C. SANTUS, Emilio VALENTINI, Alessio BENINCASA a Lorenzo BERTELLI. *The hole-drilling strain gauge method for the measurement of uniform or non-uniform residual stresses Working Group on Residual Stresses*. 2010.
- [13] OCHODEK, Vladislav. Residual stress evaluation in spirally welded pipes for gas pipeline. In: *6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing*. Jevaskyla, 2007, s. 47–55. ISBN 951-98400-7-9.
- [14] SCHAJER, Gary S., 2013. *Practical residual stress measurement methods*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley. ISBN 9781118342374.
- [15] Difrakce záření. In: *Fyzikální ústav Akademie věd České republiky* [online]. Fyzikální ústav AV ČR, c1998–2023 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/~knizek/prednaska/Diffraction.pdf>
- [16] HAMADA, Atef Saad, Mahesh Chandra SOMANI a Leo Pentti KARJALAINEN. High Temperature Flow Stress and Recrystallization Behavior of High-Mn TWIP Steels. *ISIJ International* [online]. 2007, 47(6), 907-912 [cit. 2023-03-02]. ISSN 0915-1559. Dostupné z: doi:10.2355/isijinternational.47.907
- [17] PTÁČEK, Luděk, c1999. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM. ISBN 80-7204-130-4.
- [18] KOCICH, Radim, 2014. *Termomechanické procesy tváření: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3586-0.
- [19] ŽÁČEK, O., KLIBER, J. a MAN, O., *Hodnocení vlivu parametrů termomechanického zpracování na mechanické a mikrostrukturní vlastnosti TRIP ocelí*, Metal 2005.
- [20] Gleeble 3800-GTC. In: *Gleeble* [online]. New York: Dynamic Systems, c2023 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.leeble.com/products/leeble-systems/leeble-3800.html>

- [21] MORAVEC, Jaromír a Josef BRADÁČ, 2014. *Možnosti a využití teplotně-napětového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů*. Liberec: Technická univerzita. ISBN 978-80-7494-138-2.
- [22] BOUMERZOUG, Z., E. RAOUACHE a F. DELAUNOIS. Thermal cycle simulation of welding process in low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2011, **530**, 191–195 [cit. 2023-03-02]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2011.09.073
- [23] MIČIAN, Miloš, Daniel HARMANIAK, František NOVÝ, Jerzy WINCZEK, Jaromír MORAVEC a Libor TRŠKO. Effect of the t_{8/5} Cooling Time on the Properties of S960MC Steel in the HAZ of Welded Joints Evaluated by Thermal Physical Simulation. *Metals* [online]. 2020, **10**(2) [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.3390/met10020229
- [24] MORAVEC, Jaromír, Martin ŠVEC, Šárka BUKOVSKÁ a Jiří SOBOTKA. Assessment of the Heat Input Effect on the Distribution of Temperature Cycles in the HAZ of S460MC Welds in MAG Welding. *Metals* [online]. 2021, **11**(12) [cit. 2023-03-02]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met11121954
- [25] SOMODI, B. a B. KÖVESDI. Residual stress measurements on welded square box sections using steel grades of S235–S960. *Thin-Walled Structures* [online]. 2018, **123**, 142–154 [cit. 2023-03-02]. ISSN 02638231. Dostupné z: doi:10.1016/j.tws.2017.11.028
- [26] KIK, Tomasz, Jaromír MORAVEC a Martin ŠVEC, 2020. Experiments and Numerical Simulations of the Annealing Temperature Influence on the Residual Stresses Level in S700MC Steel Welded Elements. *Materials* [online]. **13**(22) [cit. 2023-05-18]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13225289
- [27] BUKOVSKÁ, Šárka, Jaromír MORAVEC, Pavel SOLFRONK a Milan PEKÁREK, 2022. Assessment of the Effect of Residual Stresses Arising in the HAZ of Welds on the Fatigue Life of S700MC Steel. *Metals* [online]. **12**(11) [cit. 2023-05-18]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met12111890
- [28] PEKÁREK, Milan. *Vliv svařování a tepelného zpracování na hodnoty a rozložení zbytkových napětí ve zkušebních vzorcích*. Liberec, 2020. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Jaromír Moravec.

[29] Pevnostní oceli určené k tváření za studena. In: *Nypro* [online]. c2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://nyprohutni.cz/pevnostni-za-studena>

[30] KANG, Hong Tae, Yung-Li LEE a Xichen Jackson SUN, 2008. Effects of residual stress and heat treatment on fatigue strength of weldments. *Materials Science and Engineering: A* [online]. **497**(1-2), 37-43 [cit. 2023-05-10]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2008.06.011

[31] IXRD®. In: *PROTO* [online]. Proto Manufacturing, c2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.protoxrd.com/products/residual-stress-measurement/ixrd-portable>