

Vliv svařování a tepelného zpracování na hodnoty a rozložení zbytkových napětí ve zkušebních vzorcích

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Milan Pekárek

Vedoucí práce:

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

Konzultant práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Vliv svařování a tepelného zpracování na hodnoty a rozložení zbytkových napětí ve zkušebních vzorcích

Jméno a příjmení: **Milan Pekárek**
Osobní číslo: S16000135
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: 2019/2020

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se teoreticky s podstatou vzniku a rozložení napětí, k nimž dochází při svařování a tepelném zpracování vzorků.
2. Seznamte se způsoby stanovení hodnot vnitřního napětí ve vzorcích.
3. Seznamte se s podstatou rentgenové difrakce a způsobem vyhodnocení.
4. Seznamte se s teplotně napěťovým simulátorem Gleeble 3500.
5. Navrhněte základní experimentální program pomocí simulací teplotních cyklů realizovaných v přístroji Gleeble 3500, s přesně definovanými okrajovými podmínkami.
6. Realizujte experimentální program v daném přístroji a poté proveďte stanovení zbytkových napětí ve vzorcích pomocí rentgenové difrakce.
7. Proveďte zhodnocení výsledků a jejich diskuzi.

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

tabulky, grafy
cca 30
tištěná/elektronická
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. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 31. října 2019
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

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

Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

30. června 2020

Milan Pekárek

Anotace

Bakalářská práce se zabývá vlivem svařování a tepelného zpracování na hodnoty a rozložení zbytkových napětí ve zkušebních vzorcích z jemnozrné oceli S700MC. V teoretické části je popsána podstata vzniku zbytkových napětí při svařování a tepelném zpracování a možnosti měření těchto napětí. Dále je stručně popsán teplotně-napěťový simulátor Gleeble 3500. V experimentální části jsou simulovány svařovací cykly v teplotně-napěťovém simulátoru Gleeble 3500 a zbytková napětí měřena pomocí nedestruktivní rentgenové difrakční analýzy. Dále je experimentálně posouzen vliv žíhání na snížení vnitřních pnutí ve vakuové peci Reetz a nakonec aplikace vybraného způsobu žíhání na vzorky po simulaci svařovacích cyklů a vyhodnocení zbytkových napětí.

Klíčová slova

Zbytková napětí, ocel S700MC, Gleeble 3500, svařování, tepelné zpracování, rentgenová difrakční analýza

Annotation

The bachelor's thesis deals with the influence of welding and heat treatment on the values and distribution of residual stresses in test specimens of fine-grained steel S700MC. The theoretical part describes the nature of residual stresses during welding and heat treatment and the possibility of measuring these stresses. The Gleeble 3500 temperature-voltage simulator is briefly described. In the experimental part, the welding cycles in the Gleeble 3500 temperature-voltage simulator are simulated and the residual stresses are measured by non-destructive X-ray diffraction analysis. Furthermore, the effect of annealing on the reduction of internal stresses in the Reetz vacuum furnace and finally the application of the selected annealing method to samples after simulation of welding cycles and evaluation of residual stresses is experimentally assessed.

Key words

Residual stresses, steel S700MC, Gleeble 3500, welding, heat treatment, X-ray diffraction analysis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za jeho cenné rady, věnovaný čas během konzultací, ochotu, poskytnuté materiály a odbornou pomoc při vypracování této bakalářské práce. Také bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu v průběhu celého studia a při psaní této bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
1. Úvod	9
2. Teoretická část	10
2.1 Zbytková napětí v materiálu a jejich základní rozdělení.....	10
2.1.1 Způsoby vzniku zbytkových napětí.....	11
2.2 Vnitřní napětí při svařování a tepelném zpracování.....	12
2.2.1 Rozdělení vnitřních napětí a jejich vliv na vlastnosti svarových spojů.....	15
2.3 Způsoby snižování zbytkových napětí.....	16
2.4 Metody měření napětí v materiálu.....	18
2.4.1 Popis vybraných metod pro stanovení zbytkové napjatosti.....	20
2.5 Rentgenová difrakční analýza.....	21
2.6 Teplotně-napěťový simulátor Gleeble 3500.....	25
3. Experimentální část	29
3.1 Návrh experimentálního programu	29
3.2 Příprava vzorků pro experimenty v přístroji Gleeble 3500	30
3.3 Simulace svařovacího cyklu.....	32
3.4 Zbytková napětí po aplikaci svařovacích cyklů.....	36
3.5 Vliv žíhání na změnu velikosti zbytkových napětí.....	42
3.6 Vliv žíhání na snížení zbytkových napětí po teplotních cyklech.....	45
4. Diskuze Výsledků.....	47
5. Závěr	49
Seznam použité literatury	50



Seznam použitých zkratk a symbolů

Δl	– prodloužení vzorku	[mm]
l_0	– počáteční délka vzorku	[mm]
α	– lineární součinitel teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
T	– aktuální teplota vzorku	[°C]
T_0	– počáteční teplota vzorku	[°C]
σ	– napětí ve vzorku	[MPa]
ε	– poměrné prodložení	[-]
E	– modul pružnosti v tahu	[MPa]
A_{c1}	– teplota počátku transformace na austenit	[°C]
θ	– Braggův úhel	[°]
d_{hkl}	– vzdálenost sousedních rovin	[mm]
λ	– vlnová délka dopadajícího záření	[mm]
n	– celé číslo (řád difrakce)	[-]
ν	– Poissonovo číslo	[-]
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$	– napětí ve směrech hlavních os	[MPa]
θ_0	– Braggův úhel v klidovém stavu	[°]
d	– vzdálenost mezi sousedními rovinami ve zdeformovaném stavu	[mm]
d_0	– vzdálenost mezi sousedními rovinami v klidovém stavu	[mm]
$\varepsilon_{\varphi\psi}$	– deformace ve směru $\varphi\psi$	[-]
HSLA	– High-Strength-Low-Alloy	
R_e	– mez kluzu	[MPa]
R_m	– mez pevnosti	[MPa]
A_g	– tažnost na mezi pevnosti	[%]
MAG	– svařování v aktivním plynu pomocí tavící se elektrody	
TOO	– tepelně ovlivněná oblast	
R_{eL}	– dolní mez kluzu	[MPa]
R_{eH}	– horní mez kluzu	[MPa]



1. Úvod

Při svařování a tepelném zpracování dochází ke vzniku zbytkových napětí, způsobených teplotně-napěťovými i strukturními změnami k nimž ve spojích a zpracovávaných materiálech dochází. Zbytková napětí mohou mít negativní vliv na pevnost a únavovou životnost konstrukcí, kde může dojít k výrazným geometrickým změnám tvaru, nebo až k porušení. Proto je nutné umět zbytková napětí zmapovat a následně i snížit, nebo eliminovat. Pro měření zbytkových napětí v materiálu existuje celá řada metod, vhodné jsou ovšem ty, které testované díly nijak nepoškozují a tím je možné je následně opět použít v praxi. Z toho důvodu bude v práci využita takzvaná metoda rentgenové difrakční analýzy, která se mezi tyto nedestruktivní metody řadí.

Protože se v moderním průmyslu stále více klade důraz na snižování hmotnosti konstrukcí používáním materiálů s vylepšenými mechanickými vlastnostmi, nízkou pořizovací cenou, jsou stále populárnější jemnozrné oceli. Proto byla pro experimenty realizované v této práci použita mikrolegovaná jemnozrná ocel S700MC, která uvedené vlastnosti splňuje. Ocel S700MC se řadí mezi vysoko-pevnostní oceli a vyznačuje se vyšší mezí kluzu a pevnosti oproti běžně používaným konstrukčním ocelím. Pořizovací cena u vysoko-pevnostních mikrolegovaných ocelí je nízká z důvodu nízkého obsahu legujících prvků.

Jemnozrné oceli nejsou primárně určeny k tepelnému zpracování, naopak je třeba limitovat hodnotu vneseného tepla na jednotku délky svaru. Žihání na snížení zbytkových napětí se proto předepisuje především při svařování jemnozrných ocelí větších tloušťek. U dynamicky namáhaných konstrukcí však může být snížení zbytkových napětí zcela zásadní pro bezpečný provoz svařovaných součástí. Zbytková napětí mohou být snižována i jiným způsobem než tepelným zpracováním (například vibrováním), ale žihání ke snížení vnitřních napětí je stále zásadním způsobem eliminace zbytkových napětí ve svarových spojích.



2. Teoretická část

Teoretická část práce je zaměřena na definování pojmu zbytková napjatost, popis způsobu jejího vzniku a základní rozdělení zbytkových napjatostí vznikajících zejména při technologických postupech svařování a tepelného zpracování. Pozornost bude věnována způsobům měření zbytkových napětí i postupům vedoucím ke snížení jejich úrovně. Podrobněji bude popsán princip rentgenové difrakce, tedy metody využitě ke stanovení zbytkových napětí v experimentální části práce. Závěrečná část teorie se zabývá popisem funkce a možností využití teplotně-napěťového simulátoru Gleeble 3500, který bude využit pro aplikaci napěťově-deformačních cyklů do zkušebních vzorků.

2.1 Zbytková napětí v materiálu a jejich základní rozdělení

„Napětí v bodě elastického tělesa je definováno jako podíl velikosti elementární síly a elementární plošky, na kterou síla působí.“ [2] V tělesech jsou rozlišovány dva druhy vnitřních napětí a to vložena (přechodná) a zbytková. Při působení vnějších zatížení na tělesa vznikají napětí a tato napětí jsou nazývána vložena. Pokud vnější zatížení přestane na těleso působit, vložena napětí zanikají. Zbytková napětí se naopak v tělese nachází i poté, co vnější síly přestanou působit. Prakticky lze říci, že neexistují žádná reálná tuhá tělesa zcela bez zbytkových napětí. [1] Zbytková napětí vznikají prakticky při každém výrobním procesu a jsou důsledkem nehomogenních elastických nebo elasticko-plastických deformací. [3]

Napětí v materiálu je možné dělit podle různých kritérií. Nejčastějším typem rozdělení napětí v polykrystalických materiálech je členění podle velikosti objemů materiálu, v nichž napětí nemění svoje vlastnosti ani směr působení. [3]

Zbytková napětí I. druhu (tzv. makroskopická) - jejich výskyt se předpokládá ve velké oblasti materiálu (v řádech mm) a jsou přibližně homogenní (jejich směr a velikost je konstantní). Pokud při existenci těchto napětí dojde k zásahu do silové a momentové rovnováhy tělesa, změny se projeví ve velké oblasti. Tato napětí vznikají například při vrtání, soustružení, frézování, válcování, lisování nebo při tepelném zpracování jako je kalení, případně při chemicko-tepelném zpracování jako je cementace či nitridace.

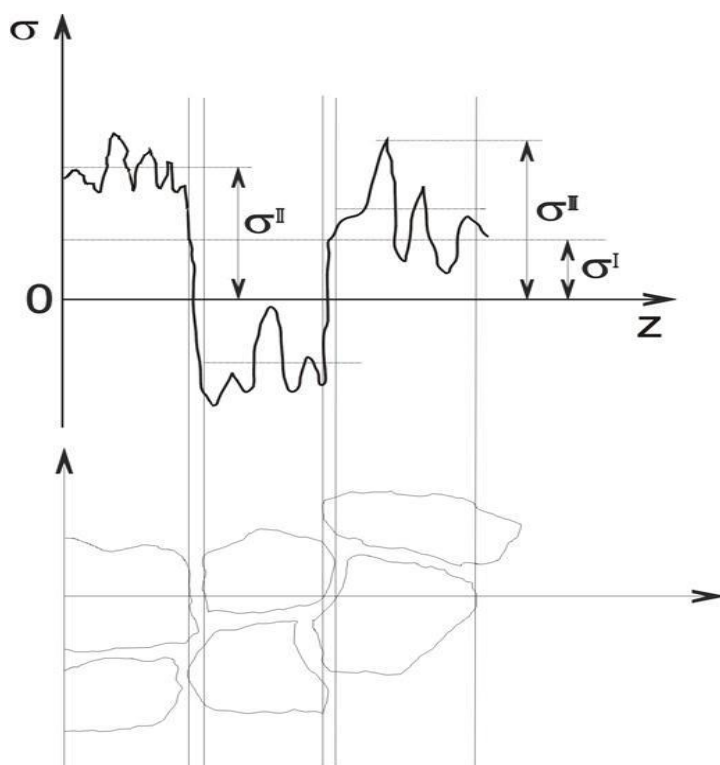
Zbytková napětí II. druhu (tzv. mikroskopická) jsou předpokládána přibližně homogenní v menších oblastech, a to konkrétně v oblastech podobných velikosti jednotlivých krystalů. Porušení silové a momentové rovnováhy se již neprojeví na celém objemu, ale pouze v oblasti tvořené větším počtem těchto krystalů. Ke vzniku napětí dochází při tepelném



zpracování vícefázových materiálů. Zde se projeví různé mechanické vlastnosti nebo rozdílná teplotní roztažnost jednotlivých fází.

Zbytková napětí III. druhu (tzv. submikroskopická) jsou nehomogenní i v rozsahu několika meziatomových vzdáleností. Při zásahu do silové a momentové rovnováhy nedojde k žádným tvarovým změnám tělesa. Tato napětí jsou způsobena mřížkovými poruchami, jako jsou vakance, dislokace nebo plošné poruchy, v reálných krystalech.

Celková hodnota zbytkového napětí v konkrétním bodě je dána superpozicí všech tří výše uvedených druhů. [3,5] Na obrázku 2.1 je schematicky ukázána klasifikace zbytkových napětí na základě velikosti objemů, v nichž jsou tato napětí konstantní. Napětí I. druhu jsou rovna střední hodnotě napětí v mnoha zrnech. Zbytková napětí II. druhu jsou dána rozdílem mezi napětími I. druhu a střední hodnotou napětí v jednotlivých zrnech a napětí III. druhu jsou rovna změnám skutečných zbytkových napětí kolem napětí mikroskopických. [2]



Obr. 2.1 Klasifikace zbytkových napětí na základě velikosti objemů, v nichž jsou tato napětí konstantní. [2]

2.1.1 Způsoby vzniku zbytkových napětí

Mechanické procesy

Při těchto procesech je deformován více povrch než vnitřek materiálu. Patří sem zejména povrchové opracování jako je leštění, kuličkování a další. Po ukončení procesu zůstane

v plasticky deformovaném povrchu materiálu zbytkové tlakové napětí. Uvnitř materiálu, který byl deformován mnohem méně, se pak nacházejí zbytková tahová napětí. [1]

Tepelné procesy

V tomto případě dochází ke vzniku zbytkových napětí vlivem teplotních gradientů. Jelikož jsou tepelné procesy doprovázeny také fázovou transformací materiálu, vzniká zde i transformační napětí. Mezi tepelné procesy patří kalení, odlévání, svařování a další. [1]

Chemické procesy

Mezi chemické procesy patří například koroze, oxidace, eloxování, případně další druhy galvanického pokovování. [1]

Kombinované procesy

Kombinované procesy jsou výsledkem kombinace předešlých procesů. Jako příklad si lze představit broušení za neideálních podmínek (velký úběr, špatné chladící médium), kde jsou brány v potaz jak mechanické, tak i tepelné procesy. Výsledná povaha zbytkového napětí záleží na tom, který efekt převládá. Mechanické procesy mají zpravidla tlakový efekt, tepelné procesy naopak tahový. [1]

Zbytková napětí v materiálu mohou mít jak pozitivní, tak negativní vliv. Mezi pozitivní vlivy patří například tlaková napětí, jež mají za následek zpevnění povrchu součásti a tím i zvýšení její meze únavy. Naopak mezi negativní vlivy jsou řazena tahová napětí, která mohou vést ke snížení její meze únavy materiálu, korozi pod napětím a vzniku trhlin.[5] Hlavním cílem těchto metod je eliminovat napětí s negativním vlivem, pokud možno nedestruktivním způsobem. [1]

2.2 Napětí vznikající při svařování a tepelném zpracování

Při svařovacím procesu je přiváděno velké množství energie do svařovaného místa, kde dochází k intenzivnímu ohřevu až na teploty několika tisíc stupňů Celsia. Teplo je, díky tepelné vodivosti materiálu a také radiaci, odváděno do základního materiálu a do okolí. V důsledku rychlého ohřevu a následného nerovnoměrného odvodu tepla, dochází ke vzniku objemových změn, které zapříčiňují vznik zbytkové napjatosti v materiálu. Hodnota napětí v materiálu se zvětšuje, až dosáhne meze kluzu materiálu při dané teplotě a dojde k jeho plastické deformaci. Materiál dodaný při svařování vyplní svarový prostor a spojí se se základním materiálem. Při následném ochlazení dochází ke smršťování svarového materiálu a tím i ke vzniku vnitřního napětí. Vzniku napětí a deformací



při svařování není možné nijak zabránit, ovšem za použití vhodného technologického procesu je možné jeho omezení nebo přesunutí do jiné oblasti materiálu. Velikost vzniklého napětí při svařování je také závislé na způsobu upnutí svařovaného materiálu. Při pevném upnutí, kdy je zamezeno roztahování materiálu v důsledku jeho teplotní roztažnosti, dochází ke zvyšování napětí. Deformace a napětí v materiálu jsou tedy na sobě přímo závislé.

Velikost napětí a deformací vznikajících při svařování významně ovlivňuje hodnota lineárního součinitele teplotní roztažnosti α , tepelná vodivost λ a také hodnota meze kluzu R_e daného materiálu. [4] Všechny uvedené veličiny jsou závislé na teplotě. Velikost prodloužení vzorku je možné stanovit podle vztahu (1), na základě znalosti součinitele teplotní roztažnosti α a gradientu teploty ΔT .

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T = l_0 \alpha (T - T_0) \quad (1)$$

Kde:

- Δl - je prodloužení vzorku [mm],
- l_0 - je počáteční délka vzorku [mm],
- α - je lineární součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}],
- T - je aktuální teplota vzorku [$^{\circ}C$],
- T_0 - je počáteční teplota vzorku [$^{\circ}C$].

Při tuhém upnutí vzorku (tyče), kdy je zamezeno teplotní roztažnosti, dochází ke vzniku napětí, které můžeme podle Hookeova zákona vyjádřit následujícím vztahem (2):

$$\sigma = -\varepsilon E = -\frac{\Delta l}{l_0} E = -\alpha E \Delta T \quad (2)$$

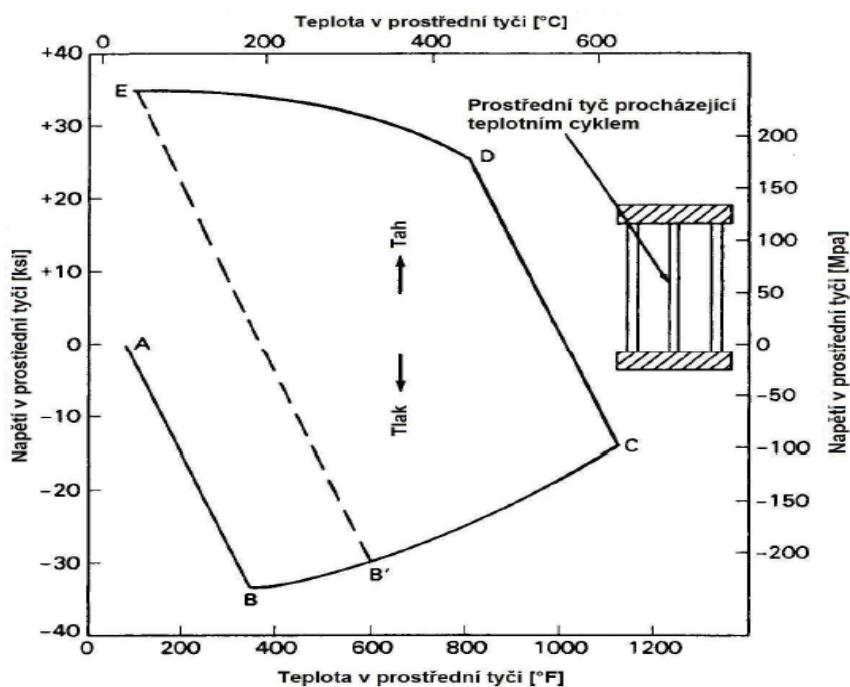
Kde:

- σ - je napětí ve vzorku [MPa]
- ε - je poměrné prodložení [-]
- E - je modul pružnosti v tahu [MPa]

Pro lepší vysvětlení vzniku zbytkových napětí lze použít model třech tyčí stejné délky, průřezu a materiálu umístěných v tuhém rámu (obr. 2.2). Prostřední tyč bude nejprve zahřívána a krajní tyče udržovány při pokojové teplotě. Následně bude prostřední tyč opět ochlazena. Tento model je simulací teplotního cyklu svařování. Při zahřívání prostřední tyče je bočními tyčemi zabráněno jejímu prodloužení a tím začne v tyči narůstat tlakové napětí.



V krajních tyčích naopak vzniká napětí tahové. Takto se napětí zvyšuje až do dosažení meze kluzu materiálu při dané teplotě (bod B). Hodnota meze kluzu se s rostoucí teplotou snižuje a tím dochází i k poklesu napětí v prostřední tyči. Při dosažení teploty daného procesu se ohřívání zastaví (bod C). Následným poklesem teploty se tlakové napětí v prostřední tyči postupně snižuje, až se nakonec změní na napětí tahové. Tahové napětí postupně roste, až dosáhne meze kluzu v tahu (bod D). Dalším ochlazováním už je hodnota vnitřního napětí omezena hodnotou meze kluzu. [4]



Obr. 2.2. Model vysvětlující vznik zbytkového napětí při svařování [6]

Při porovnání tohoto modelu s procesem svařování lze brát prostřední tyč jako samotný svar a krajní tyče jako okolní materiál. Tím je ukázán vznik napětí v okolí svaru. Rozhodujícími faktory vzniku vnitřních napětí ve svařovaném materiálu jsou:

- vlastnosti materiálu ovlivňující sdílení tepla (např. teplotní roztažnost a vodivost)
- velikost a tvar svarové lázně
- množství tepla, které je vneseno do svaru, nebo také rozsah deformací vnesených do svaru při tlakovém svařování
- nestacionární charakter teplotních polí v základním materiálu
- tuhost svařence
- mechanické vlastnosti svařovaného materiálu
- objemové změny v důsledku strukturních změn v materiálu [4]

2.2.1 Rozdělení vnitřních napětí a jejich vliv na vlastnosti svarových spojů

Napětí, která vznikají v místě svaru a v jeho nejbližším okolí, jsou nazývána **aktivní**. Napětí přenášená do dalších částí materiálu důsledkem tuhosti svarového spoje jsou nazývána **reaktivní** napětí. Rozdělení vnitřních napětí při svařování lze provádět podle různých dalších hledisek.

Vnitřní napětí podle oblasti působení:

- jak už bylo popsáno v kapitole 2.1 rozlišujeme dělení na napětí I. II. a III. druhu

Vnitřní napětí podle doby existence:

- Dočasná – působí pouze po dobu existence příčiny jejich vzniku
- Zbytková – působí i po vymizení jejich příčin vzniku. Po svařování jsou v materiálu zbytková napětí přítomna vždy, v důsledku plastických deformací během ohřívání.

Vnitřní napětí podle příčiny vzniku:

- Teplotní – jsou způsobena nerovnoměrným ohřevem a ochlazováním materiálu
- Strukturní – vznikají v důsledku objemových změn při fázových transformacích v různých částech tělesa

Obě tato napětí spolu velmi blízce souvisí.

Vnitřní napětí podle směru působení vzhledem k ose svaru:

- Podélná – působí ve směru svařování
- Příčná – působí kolmo na osu svaru
- Ve směru tloušťky materiálu – např. při svařování tlustých desek

Vliv vnitřních napětí na vlastnosti spojů:

V blízkém okolí svaru, zejména v tepelně ovlivněné oblasti, mohou podélná zbytková napětí, která jsou tahového charakteru, dosahovat hodnot srovnatelných s mezí kluzu. Tato napětí snižují zásobu plasticity a způsobují plastické deformace, což způsobuje pokles plastických vlastností materiálu, jako je např. tažnost. Při statickém namáhání se vliv vnitřních napětí projevuje snížením plasticity materiálu a tím i snížením pevnosti celé konstrukce. Pokud dojde při jednoosém stavu napjatosti k odbourání napětí trvalou deformací, zbytková napětí již nemusí mít vliv na pevnost konstrukce. V případě dynamického namáhání svarových spojů z dostatečně houževnatých materiálů se



při cyklickém zatěžování mohou zbytková napětí částečně odbourat a tím i částečně vyrušit tento vliv na kvalitu svařovaného spoje.

Jelikož jsou vnitřní napětí buď tahová, nebo tlaková, lze při vhodném postupu zvyšovat nebo snižovat hodnotu meze únavy materiálu. Při stejném smyslu vnitřních napětí (tah-tah) dochází k poklesu meze únavy. V opačném případě se hodnota zvyšuje. [4]

2.3 Způsoby snižování zbytkových napětí

Na velikost a směr vnitřních zbytkových napětí po svařování má vliv celá řada faktorů:

- nastavené svařovací parametry
- teplotní režim při svařování
- styl vytváření svaru
- vlastnosti základního materiálu
- tloušťka materiálu
- počet housenek, velikost a geometrie svaru
- tuhost svaru v celé konstrukci

Vzniku zbytkových napětí není možné žádným způsobem zabránit. S ohledem na tyto faktory však lze snižovat vznikající napětí již během svařovacího procesu. [4]

Způsoby snižování vnitřních napětí během svařování:

- pro snížení příčných napětí jsou svařovány volné neupnuté díly
- svařování dílů předem deformovaných v opačném směru, než je deformace vzniklá při svařování
- zvýšení přívodu energie do svaru – snížení podélných napětí, ale zvýšení příčných napětí
- předehřev svařovaných dílů
- vhodný postup vytváření svarového spoje

Je důležité brát v úvahu, že vnitřní napětí úzce souvisí s deformacemi materiálu. Pokud se snažíme snižovat napětí materiálu, může se stát, že se zvýší jeho deformace. Deformace v materiálu jsou v praxi obvykle více závažné než vnitřní napětí. Oba tyto faktory se dají snižovat, nebo také odstranit různými technologickými procesy i po svařování. [4]

Způsoby snižování vnitřních napětí po svařování:

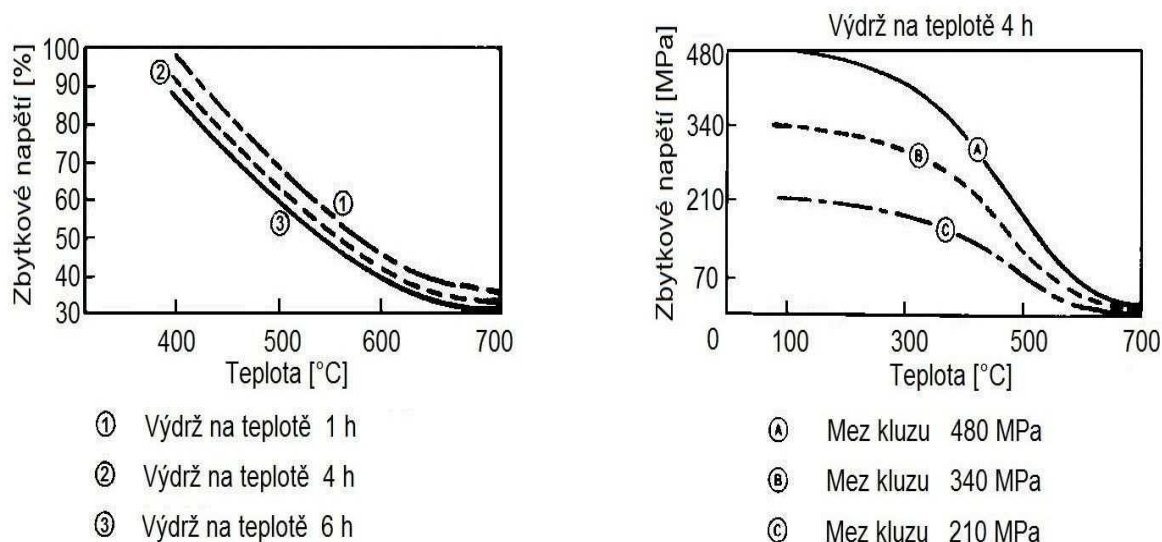
- žíhání na snížení vnitřního pnutí (celkový ohřev nebo lokální ohřev svaru, s následnou relaxací vnitřních napětí a jejich přeměnou na plastickou deformaci)



- mechanické způsoby snižování (prokování, jednorázové nebo opakované přetížení konstrukce, vibrace)

Žihání na snížení vnitřního pnutí

Při celkovém ohřevu v peci je teplotní cyklus složen z pomalého ohřevu na teplotu v blízkosti A_{c1} . Tato teplota se liší druhem konkrétního materiálu. Následně se provede výdrž na dané teplotě. Doba výdrže závisí jak na druhu materiálu, tak i na velikosti, tvaru a složitosti svaru. Nejkratší doba výdrže je 20 minut, ale jinak se tato doba počítá tak, že na 1 mm největší tloušťky svaru připadají 4 minut výdrže na dané teplotě. Po dostatečné výdrži následuje pomalé ochlazování v peci. Na obr. 2.3 je zobrazen vliv žihání a doba výdrže na konkrétní teplotě a na množství zbytkových napětí ve vzorku.



Obr. 2.3 Vliv doby výdrže na teplotě (vlevo) a velikosti teploty (vpravo) na hladinu zbytkových napětí [6]

Při místním (lokálním) ohřevu, který se používá hlavně u obvodových svarů je teplota podobná jako u celkového ohřevu. Oblast ohřevu je ovšem pouze v blízkém okolí kolem svaru (3,5krát šířka svaru). Protože se při tomto postupu nebere v úvahu charakter průběhu teplot kolem svaru, mohou zde vznikat další nepříznivá přídavná napětí. Pro dosažení obdobných výsledků jako při celkovém ohřevu lze použít způsob axiálního rozložení teplot. Pomocí dvou hořáků jsou zahřívána pásma po obou stranách svaru, následně je pomocí vodní sprchy tato oblast ochlazena. Při zahřívání pomocí hořáků vznikají další vnitřní napětí, která se sloučí se zbytkovým napětím po svařování materiálu. Následkem toho vzniknou v oblasti svaru plastické deformace a celkové napětí se sníží. Tato metoda je vhodná zejména pro dlouhé a rozměrné nepřerušované svary. [4]

Mechanické prokování

Provádí se po vytvoření svarové housenky v počáteční fázi ochlazování. Prokování se provádí nejčastěji ručně pomocí kladiva. Prokováním svarových housenek se snižuje vznik nepříznivých napětí tahového charakteru v oblasti svaru. V daných místech vzniká povrchová i podpovrchová deformace. Tím se snižuje tahové napětí, ale může zde naopak vznikat napětí tlakové. [4]

Vibrace

Metoda vibrací funguje na základě uvedení svařované konstrukce do rezonančních nebo subrezonančních stavů pomocí vibrátorů. V důsledku toho se snižují vnitřní napětí a stabilizují se rozměry svarů. Napětí snižovaná vibracemi jsou v mikroskopických objemech materiálu, ale dohromady tvoří makroskopická napětí. Dochází zde k elementárním skluzům v zrnech a vznikají mikroskopické deformace v tahu i tlaku. Tyto deformace jsou ovšem velmi malé. Celkové vnitřní pnutí v materiálu se obvykle snižuje až o 40 %. Metoda snižování vnitřních napětí vibrováním je využívána stále častěji [4].

Přetížení konstrukce

Jedná se o záměrné přetížení konstrukce, kde po dosažení meze kluzu dochází k místní plastické deformaci a tím ke snížení napětí.

2.4 Metody měření napětí v materiálu

Jelikož mají zbytková napětí vliv na životnost dané součásti, je velmi důležité správné zmapování a vyhodnocení těchto napětí. V současné době existuje celá řada metod pro vyhodnocení této problematiky. Jedná se o nepřímé metody, kterými se neměří přímo napětí, ale veličiny, jež jsou napětím ovlivněny. Z naměřených hodnot se následně stanoví charakter napjatosti v materiálu. Metody se dají dělit podle různých hledisek. Jedním ze základních typů rozdělení je dle toho, jak je při jejich realizaci poškozován testovaný vzorek. Dalším způsobem rozdělení je rozdělení podle fyzikální podstaty dané metody [8].

Rozdělení metod podle míry poškození vzorku:

- **Destruktivní** – Podstatou je postupné odebrání tenkých vrstev daného vzorku a následné měření vzniklých makrodeformací, z nichž se následně zjišťuje průběh napětí.

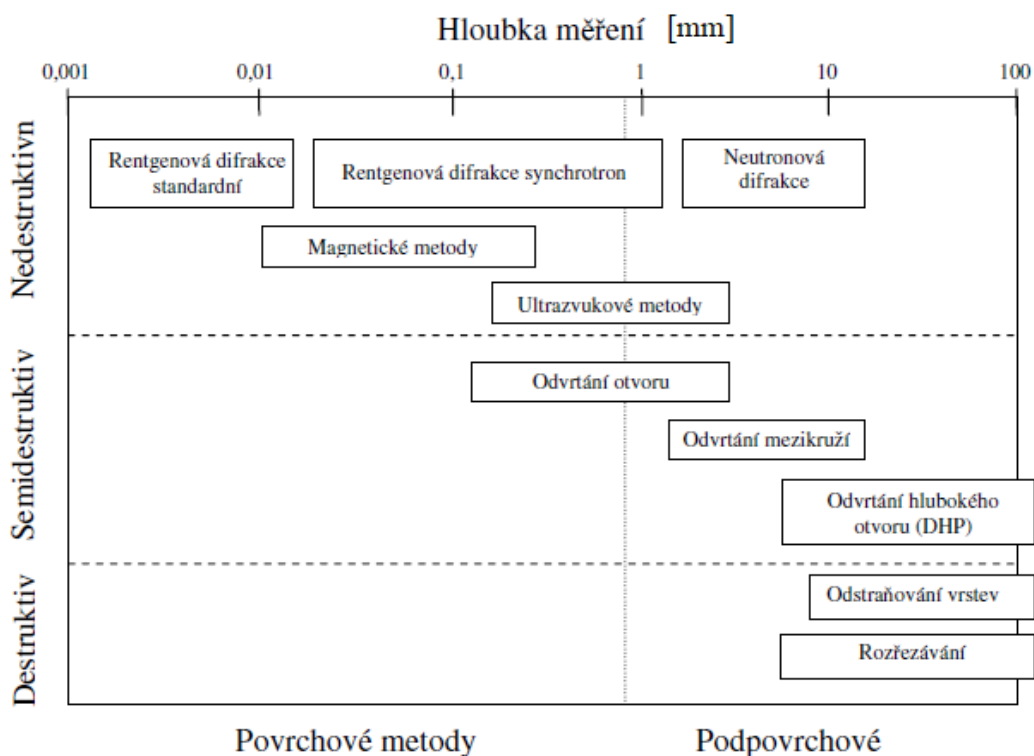


- **Semidestruktivní** – Metoda spočívá v měření deformace vzniklé přerozdělením napětí na povrchu vzorku, kde byl vyvrtán otvor. Deformace jsou snímány jako změny elektrického odporu, většinou pomocí tenzometrických růžic.
- **Nedestruktivní** – Při těchto metodách nedochází k poškození testovaného vzorku. Mezi nedestruktivní metody patří převážně difrakční analýzy [8].

Rozdělení podle fyzikální podstaty:

- **Mechanické, odvrtávací** – jsou založeny na měření deformací při změně napěťové rovnováhy po odebrání části vzorku
- **Magnetické** – jsou založeny na závislosti mezi napětím a magnetickými charakteristikami vzorku
- **Optické** – jsou založeny na principu úhlu odrazu tenkého světelného paprsku
- **Ultrazvukové** – jsou založeny na závislosti mezi napětím a rychlostí ultrazvukových vln.
- **Difrakční** – rentgenová a neutronová difrakce

Na obr. 2.4 jsou shrnuty metody měření zbytkových napětí a hloubka jejich zásahu do materiálu.



Obr. 2.4 Metody pro měření zbytkových napětí [7]

2.4.1 Popis vybraných metod pro stanovení zbytkové napjatosti

V této kapitole bude stručně vysvětlen princip vybraných metod pro stanovení hodnot zbytkových napětí v materiálu. Jelikož hlavním obsahem této práce je stanovení vnitřních napětí ve zkušebních vzorcích pomocí metody rentgenové difrakční analýzy bude tato metoda detailněji rozebrána až v kapitole 2.5.

Odvrtávací metoda

Jedná se o semidestruktivní metodu, která se v dnešní době řadí mezi ty nejpoužívanější. Principem metody je vyvrtání malého otvoru do povrchu vzorku. Odvrtaný otvor má většinou hloubku 1-2 mm. Tímto způsobem se uvolní zbytková napětí a s nimi spojené deformace v okolí otvoru. Deformace v okolí otvoru jsou snímány pomocí tenzometrických růžic. Je důležité, aby bylo vrtání prováděno za vysokých otáček, aby nedošlo k výraznému ovlivnění zbytkové napjatosti touto metodou. Nejčastěji jsou pro měření deformací používány tenzometry, ale jsou vyvíjeny i různé optické metody. Na základě vybraných teorií z pružnosti a pevnosti materiálu se následně z naměřených deformací vyhodnocuje charakter zbytkové napjatosti vzorku. Výhodami této metody je jednoduchost jejího provedení, možnost přenosu měřící techniky na různá místa, dále malé poškození vzorku a široké aplikační použití metody. Nevýhodou je destruktivní povaha techniky, v případě nehomogenních vlastností materiálu nebo nerovnoměrných napětí klesá i přesnost vyhodnocených výsledků. [9]

Difrakční metody

Difrakční metody patří mezi velmi rozšířené způsoby pro měření zbytkových napětí. Do této skupiny patří rentgenová difrakce (bude jí věnována kapitola 2.5) a dále neutronová, synchrotronová a elektronová difrakce. Základem všech metod je měření vnitřních deformací a zároveň pomocí lineárních vztahů elasticity jejich následný přepočet na vnitřní napětí. Vlastní měření se provádí pomocí částicového paprsku, kterým je ozařován vzorek. Na základě různě deformovaných krystalových mřížek dochází k odrazům paprsků do různých směrů. Různé úhly odrazu následně mapují deformace vzorku. Paprsek, jímž je vzorek ozařován, je tvořen buď rentgenovým zářením, proudem elektronů nebo proudem neutronů. Záleží na konkrétním druhu difrakční metody. Rozdíly mezi jednotlivými difrakčními metodami jsou převážně v hloubce měření. Pomocí rentgenové difrakce je mapována malá povrchová vrstva v hloubce 1-10 μm . Naopak pomocí neutronové difrakce lze mapovat vrstvy až 50 mm pod povrchem materiálu [2].



Magnetické metody

Základem těchto nedestruktivních metod je odezva materiálu na střídavě působící magnetické pole. Jednou z metod je tzv. metoda Barkhausenova šumu. Na základě magnetizace malých oblastí tzv. Weissových domén ve feromagnetickém materiálu, které jsou bez působení magnetických sil orientovány nahodile, dochází k jejich přeorientování do směru magnetického pole. Uvedený proces má za následek přibývání magnetizace malými skoky. Pomocí těchto skoků se v přiložené cívce indukují proudové nárazy tzv. elektrické pulsy. Na intenzitu pulsů mají vliv jak materiálová struktura, tak i přítomnost a rozložení elastických napětí. Právě tato napětí ovlivňují cestu Weissových domén ke správné orientaci ve směru magnetického pole. Výše uvedený jev je znám pod názvem magnetoelastická interakce. Následkem zmíněné interakce tlaková napětí intenzitu Barkhausenova šumu snižují a tahová napětí ji naopak zvyšují. Vlivem metalurgické struktury materiálu dochází také k ovlivnění intenzity měřeného šumu. Typickým příkladem je tvrdost materiálu. Čím větší je tvrdost dané struktury, tím je intenzita zaznamenaného signálu nižší. [11,12]

Ultrazvukové metody

Princip ultrazvukové metody spočívá v lineární změně rychlosti šíření zvuku v kovech v závislosti na namáhání. Jedná se o nedestruktivní metodu založenou na vysokofrekvenčním šíření akustických vln nad hranicí slyšitelnosti, které je možné v jakémkoli prostředí, což je velkou výhodou této metody. Pro měření se používají příčné nebo podélné ultrazvukové vlny. Hloubka pronikání vln je řízena frekvencí. Metoda je vhodná ke stanovení gradientu zbytkových napětí ve směru tloušťky materiálu. Velikost a směr napětí totiž přímo ovlivňuje změny v rychlosti šíření ultrazvukových vln.

2.5 Rentgenová difrakční analýza

Rentgenová difrakce je založena na rozptylu (difrakci) rentgenových paprsků na krystalové mřížce měřeného materiálu. Difrakcí rentgenových paprsků jsou měřeny změny vzdáleností mřížkových rovin, které byly způsobeny napětím v materiálu. Tyto změny vzdáleností se projeví změnou difrakčního úhlu θ . Změřené mřížkové deformace se následně přepočtou na napětí pomocí vztahů teorie elasticity. Při rozptylu rentgenových paprsků na sousedních mřížkových rovinách vzniká tzv. interferenční maximum ve směru úhlu θ . Tento úhel je dán tzv. Braggovou podmínkou (3):



$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (3)$$

Kde:

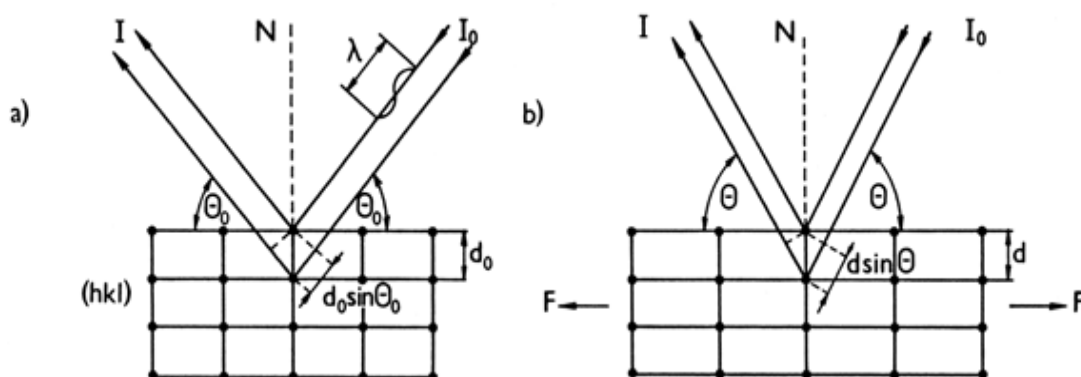
n – celé číslo (řád difrakce) [-]

λ – vlnová délka dopadajícího záření [mm]

d_{hkl} – vzdálenost sousedních rovin [mm]

θ – Braggův úhel [1]

Na obr. 2.5.1 je ukázáno, jak se projeví změna vzdálenosti mřížkových rovin, při zatížení silou F , na Braggově úhlu. Síla F může simulovat působící napětí. Při působení této síly se změní jak meziorovinná vzdálenost, tak i úhel θ .



Obr. 2.5.1 Deformace vzdáleností mřížkových rovin (hkl) a změny úhlové polohy interferenčního maxima; I_0 a I jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou F [1]

Po dosažení hodnot vzdáleností mřížkových rovin při zdeformovaném a klidovém stavu do rovnice pro mřížkovou deformaci je získán vztah (4):

$$\varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0} = -\cot g \theta_0 (\theta - \theta_0) \quad (4)$$

Kde:

ε – mřížková deformace [-]

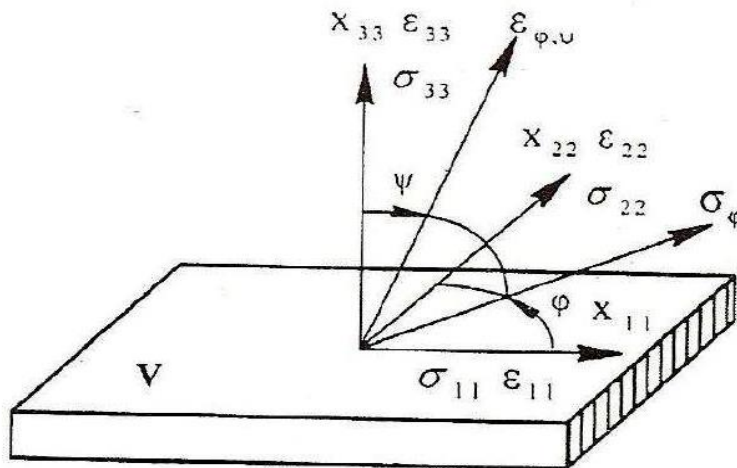
d – vzdálenost mezi sousedními rovinami ve zdeformovaném stavu [mm]

d_0 – vzdálenost mezi sousedními rovinami v klidovém stavu [mm]

θ_0 – Braggův úhel v klidovém stavu



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



Obr. 2.5.2 Systém souřadnic spojený se vzorkem V [1]

Při definování souřadného systému spojeného se vzorkem podle obr. 2.5.2 a splnění podmínky lineární teorie elasticity je možné mřížkovou deformaci $\epsilon_{\varphi\psi}$ v libovolném směru $\varphi\psi$ vyjádřit vztahem (5):

$$\begin{aligned} \epsilon_{\varphi\psi} = & \frac{\nu + 1}{E} (\sigma_{11} * \cos^2 \varphi + \sigma_{12} * \sin 2\varphi + \sigma_{22} * \sin^2 \varphi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi + \\ & + \frac{\nu + 1}{E} (\sigma_{13} * \cos \varphi + \sigma_{23} * \sin \varphi) \sin 2\psi + \frac{1}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \end{aligned} \quad (5)$$

Kde:

E – Youngův modul pružnosti [MPa]

ν – Poissonovo číslo [-]

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

$\epsilon_{\varphi\psi}$ – deformace ve směru $\varphi\psi$ [-]

Napětí σ_{φ} je dáno úhlem φ od osy x_{11} a deformace $\epsilon_{\varphi\psi}$ je určena úhlem ψ od normály k povrchu x_{33} . V případě dvojosého stavu napjatosti, kdy $\sigma_{13} = 0$ bude vztah pro σ_{φ} (6):

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi \quad (6)$$

Vztah mezi mřížkovou deformací a $\sin^2 \psi$ bude mít tedy následující tvar (7):

$$\epsilon_{\varphi\psi} = \frac{\nu + 1}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (7)$$

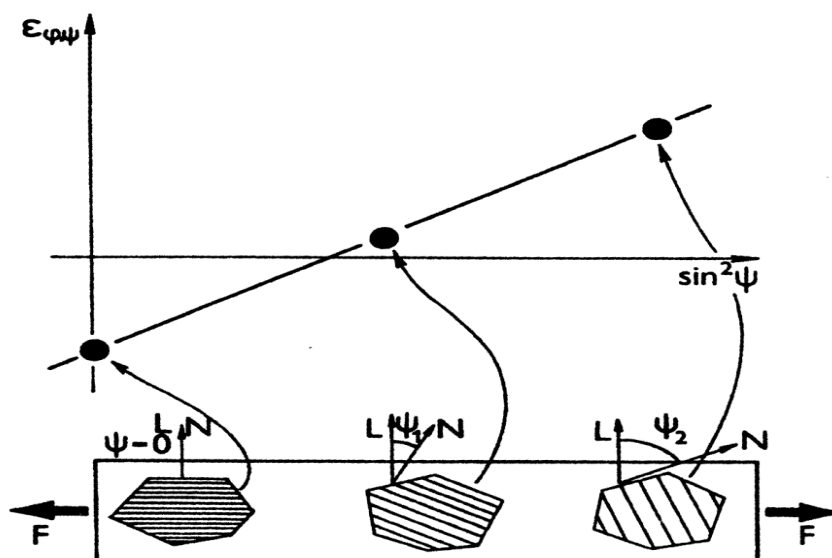
Následující krok je položení mřížkové deformace ε do rovnosti s deformací $\varepsilon_{\varphi\psi}$. Vzniklý vztah je základní rovnicí rentgenografického měření napětí podle tzv. metody „ $\sin^2\psi$ “ (8):

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = -\cotg\theta_0(\theta - \theta_0) = \frac{\nu+1}{E}\sigma_{\varphi}\sin^2\psi - \frac{\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (8)$$

Z výše zmíněných vztahů je získána finální rovnice pro výpočet složky napětí σ_{φ} (9):

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{\nu+1}\cotg\theta_0\frac{\partial\theta}{\partial\sin^2\psi} \quad (9)$$

Pro určení složky σ_{φ} metodou „ $\sin^2\psi$ “ je nutné dostatečně přesné určení úhlové polohy $\theta_{\varphi\psi}$ interferenčních linií, které jsou získány difrakcí na vhodných skupinách atomových mřížkových rovin $\{hkl\}$ v azimutální rovině $\varphi=\text{konst.}$ při různých hodnotách úhlu ψ . Na obr. 2.5.3 je znázorněn princip metody „ $\sin^2\psi$ “. [1]



Obr. 2.5.3 Princip měření napětí metodou „ $\sin^2\psi$ “ [1]

Měření zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakce má několik specifických rysů a výhod, kterými se odlišuje od ostatních metod. Jednou z nich je možnost měření deformací mezivrstevních vzdáleností v různých směrech vzhledem k normále od povrchu.

Další výhodou difrakční analýzy je možnost měření napětí v relativně tenké povrchové vrstvě a to 10^{-3} až 10^{-2} mm, jelikož rentgenové záření má jen určitou vlnovou délku. Pomocí rentgenové difrakce lze také oddělit napětí I. a II. druhu, protože mikroskopická napětí rozšiřují difrakční linie a makroskopická napětí mění polohu těchto difrakčních linií.

Při použití úzkého svazku paprsků, které dopadají na povrch vzorku lze měřit velmi malou plochu, a to i menší než 1 mm^2 . Tímto způsobem je možné měřit i velmi nehomogenní napěťová pole.

Nevýhodou rentgenové difrakce je možnost měření pouze krystalických nebo polykrystalických materiálů. S rostoucí velikostí krystalů v materiálu klesá přesnost a spolehlivost difrakčního měření. [1]

2.6 Teplotně-napěťový simulátor Gleeble 3500

Gleeble je dynamické testovací zařízení, kterým lze testovat velkou škálu tepelných, mechanických a metalurgických stavů materiálů. Výsledky z testů, jež jsou následně vyhodnoceny lze využít pro optimalizaci výrobních postupů a úpravu technologických parametrů nebo pro numerické simulace. Přístroj Gleeble je možné použít pro simulace svařovacích procesů, tepelného zpracování, pro simulace tváření a válcování za tepla, simulace kontinuálního lití, k výzkumu náchylnosti materiálů k trhlinám za tepla a pro mnoho dalších dějů. Velkou výhodou simulátoru je možnost simulace prakticky jakéhokoliv teplotně mechanického zatížení, které může reálně nastat během zpracování nebo v následných provozních podmínkách. [13]

Jelikož má systém Gleeble velmi rozsáhlou knihovnu, jež je vytvářena již více jak padesát let, lze tento přístroj využít jak pro výzkumné úkoly, tak pro kontrolu a vyhodnocení kvality produkce. V průběhu testů jsou zaznamenávány všechny potřebné a uživatelem specifikované veličiny, které se následně využívají i ke zpětnému řízení testů. [13]

Nejčastěji využívaným simulátorem je teplotně-napěťový simulátor Gleeble 3500. Lze ho využít ke zkoumání většiny dějů probíhajících v kovových materiálech za vyšších teplot. Zařízení umožňuje testování vzorků s různou geometrií a je konstruováno pro dosažení maximální síly v tahu nebo tlaku s hodnotou 100 kN. Do zařízení lze vkládat vzorky do průměru 20 mm, nebo vzorky s plochou průřezu do 400 mm². [13]

Přístroj Gleeble je se skládá ze třech hlavních jednotek, a to z ovládacího (řídícího) panelu, hlavní jednotky (s hydraulikou a transformátorem pro ohřev) a dále vlastního testovacího zařízení (obr. 2.6.1). Vzorky lze ohřívat nízkými i vysokými rychlostmi ohřevu. Maximální dosažitelná rychlost ohřevu vzorku je až 10000 °C·s⁻¹, při ochlazování lze pak u malých vzorků na povrchu dosáhnout rychlosti ochlazování až 6000 °C·s⁻¹. Maximální zdvih zařízení činí 100 mm a největší rychlost pohybu čelistí dosahuje hodnoty 1 m·s⁻¹. K ohřevu vzorků používá systém Gleeble elektrický odpor, díky kterému lze dosáhnout vysokých rychlostí ohřevu i přesné regulace teplotních cyklů. [13]



Upnutí vzorku je zajištěno pomocí vysokoteplotních upínacích čelistí, jež díky své tepelné vodivosti umožňují jak rychlý ohřev, tak i následné rychlé chlazení vzorku. Materiál a tvar použitých čelistí následně umožňuje vytváření rozdílného rozložení teplot v testovaném vzorku.



Obr. 2.6.1 Zařízení Gleeble 3500 1-ovládací panel, 2-hlavní jednotka, 3-testovací zařízení [14]

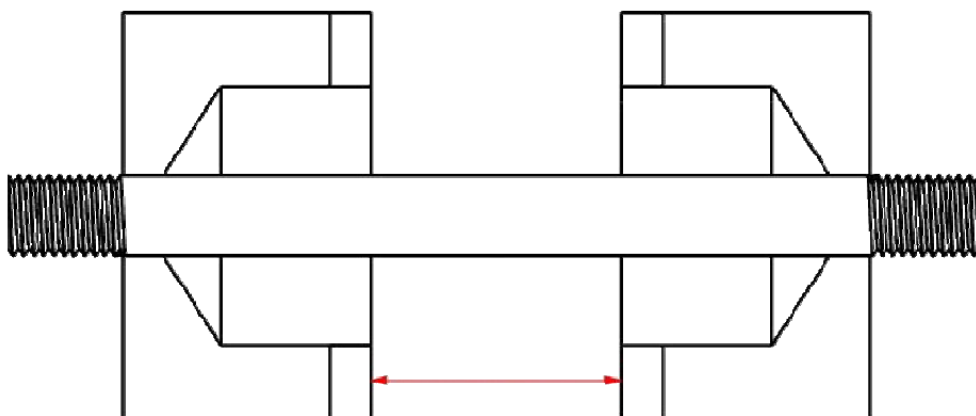
Měření teploty:

Ke správnému řízení teploty při ohřevu a ochlazování během teplotního cyklu je nutná okamžitá zpětná odezva. K tomu jsou využívány buď termočlánky nebo pyrometry pracující v infračerveném spektru. Přístroj obsahuje čtyři kanály pro měření teploty, kde na každý kanál může být připojen jeden termočlánek, nebo může být na jeden z těchto kanálů připojen pyrometr. Standardně se pro většinu aplikací využívají pouze termočlánky, protože mají mnohem rychlejší odezvu při měření a řízení teploty. To je velkou výhodou zejména u vysokých rychlostí ohřevu. Při připojení čtyřech termočlánků lze pouze jeden využít jako řídicí. Pozice řídicího termočlánku se během testu nesmí měnit. Nejčastěji se při měřeních používají termočlánky o průměru 0,2 mm. Termočlánek se přivaňuje doprostřed vzorku z důvodu gradientu teploty. Systém Gleeble může používat různé typy termočlánků. Nejčastěji je využíván termočlánek typu K a pro vyšší teploty termočlánek typu R. [13]

Teplotní gradienty ve vzorku:

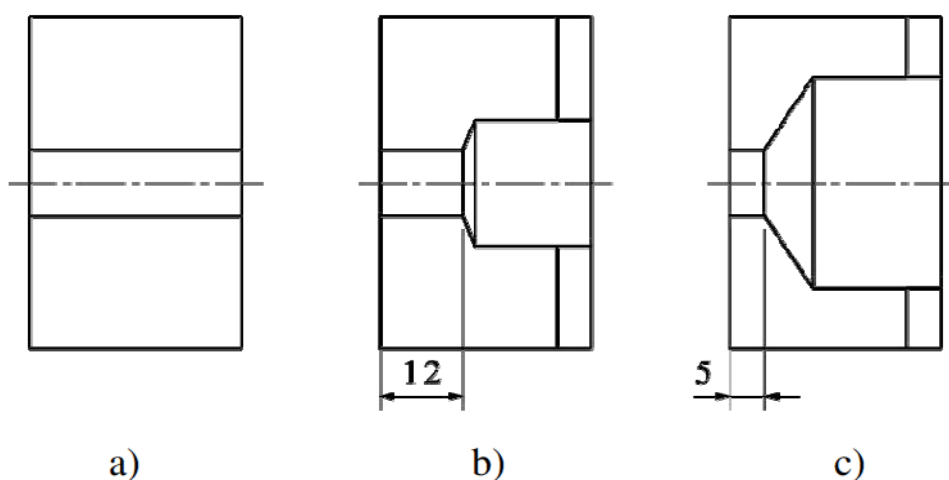
Jak již bylo uvedeno výše, přístroj Gleeble umožňuje částečně tvarovat teplotní gradienty v testovaných vzorcích. To, jak bude teplotní gradient vypadat závisí na různých parametrech, jako je například volná délka vzorku, druh testovaného materiálu, ale také materiál a tvar použitých vysokoteplotních čelistí. Volná délka vzorku je definována jako délka mezi okraji kontaktů s vysokoteplotními čelistmi, tak jak je schematicky naznačeno

na obrázku 2.6.2. Vysokoteplotní čelisti jsou chlazené, a proto je teplota vzorku v místě upnutí nižší než uprostřed volné délky vzorku. Proto se řídicí termočlánek, nebo pyrometr nacházejí vždy uprostřed volné délky vzorku. [13]



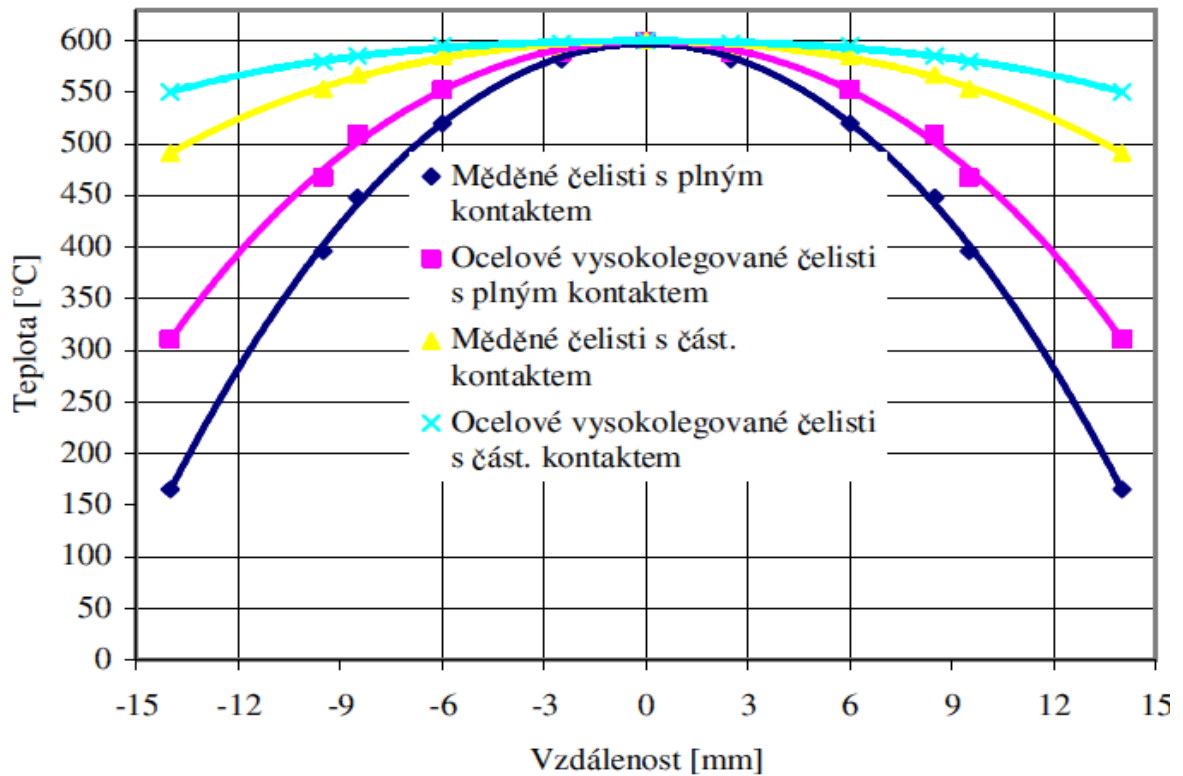
Obr. 2.6.2 Volná délka vzorku [15]

Z hlediska správné volby vysokoteplotních čelistí je důležité brát v úvahu fakt, že čím menší je kontakt mezi vzorkem a čelistmi, tím je teplotní gradient ve vzorku rovnoměrnější. Je však zároveň nutné konstatovat, že při zkracování dotyku čelistí se vzorkem se zároveň snižuje maximální rychlost ohřevu i následného ochlazování. Důležitý je také materiál, ze kterého jsou vysokoteplotní čelisti vyrobeny. Nejčastěji je používána měď nebo vysokolegovaná austenitická ocel (AISI 304). Jelikož mají tyto dva materiály velmi rozdílnou tepelnou vodivost, mění se ve vzorku také strmost teplotního gradientu. Na obr. 2.6.3 jsou znázorněny rozdílné typy konstrukce vysokoteplotních čelistí, a to buď s plným nebo částečným kontaktem. [13]



Obr. 2.6.3 Čelisti pro vzorek o průměru 10 mm a) S plným kontaktem, b, c) S částečným kontaktem [13]

Na obrázku 2.6.4 je znázorněn vliv tvaru a materiálu vysokoteplotních čelistí na teplotní gradient ve vzorku. Porovnávají jsou čelisti s plným a částečným kontaktem z mědi nebo austenitické oceli. Pro experiment byl použit vzorek s volnou délkou 30 mm.



Obr. 2.6.4 Rozložení teplot ve volné části vzorku z oceli S355J2 při teplotě 600 °C za použití různých čelistí [15]

3. Experimentální část

Cílem experimentální části práce bylo zjištění, jak se projeví aplikace teplotních cyklů při svařování a tepelném zpracování na tvar a velikost zbytkových napětí ve zkoušených vzorcích. Šlo o posouzení vlivu okrajových podmínek, jako je maximální teplota použitého cyklu, rychlost ochlazování, či počáteční stav testovaného materiálu. Kromě výše uvedených úkolů byla práce rozšířena o experimenty definující podmínky, při nichž dochází ke snížení, případně k eliminaci zbytkových napětí pomocí tepelného zpracování. Teplotně napěťové cykly byly na vzorky z jemnozrnné oceli S700MC aplikovány pomocí simulátoru Gleeble 3500. Zbytková napjatost ve vzorcích pak byla stanovena pomocí rentgenové difrakční analýzy a snížení zbytkových napětí bylo realizováno žiháním ve vakuové peci Reetz.

3.1 Návrh experimentálního programu

Materiálem použitým pro experimentální činnost byla ocel S700MC, patřící do skupiny tzv. HSLA (High Strength Low Alloy) ocelí. Jedná se o konstrukční, jemnozrnnou vysokopevnostní ocel s minimální zaručenou mezí kluzu 700 MPa, která je vhodná ke tváření za studena a lze ji svařovat. Ocel je termomechanicky válcovaná a mikrolegovaná. Legurami jsou převážně hliník, titan, niob a vanad. Uvedené prvky tvoří jemné karbidy, nitridy nebo karbonitridy přispívající ke zjemnění zrna a zpevnění matrice. Sekundární efekt zjemnění zrna je ve zvýšených hodnotách meze kluzu a meze pevnosti, ale zároveň také ve snížení hodnot tranzientní teploty i křehkolomových vlastností. Ocel si zachovává i relativně nízkou cenu, díky malému množství legur. Chemické složení oceli S700MC definované normou a stanovené experimentálně pomocí spektrometru Bruker Q4 TASMAN je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1. Chemické složení oceli S700MC

	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V
ČSN EN 10149-2	max. 0,12	max. 0,6	max. 2,2	max. 0,025	max. 0,010	min. 0,015	max. 0,09	max. 0,2
Experiment	0,051	0,197	1,916	0,006	0,006	0,038	0,063	0,072
	Ti	Mo	B	N	Ni	Cr	W	
ČSN EN 10149-2	max. 0,25	max. 1 -	max. 0,005	-	-	-	-	
Experiment	0,056	0,113	0	0,013	0,154	0,036	0,035	

Mechanické vlastnosti základního materiálu byly experimentálně zjištěny pomocí statické zkoušky tahem a jsou uvedeny v tabulce 2.



Tabulka 2. Mechanické vlastnosti základního materiálu oceli S700MC

Vzorek:	Průměr [mm]	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{20} [%]
1	6,52	759	851	10,97	23,91
2	6,53	758	852	12,33	25,22
3	6,50	741	849	10,72	23,62
Průměrná hodnota:		753 ± 8	851 ± 1	11,01 ± 0,71	24,25 ± 0,70

Ocel S700MC je využívána u staticky a dynamicky namáhaných součástí zejména v automobilovém průmyslu, při výrobě náprav a podvozků osobních a nákladních automobilů, ale také na komponenty jeřábů a dalších konstrukčních celků. Populární je zejména z důvodu snížení hmotnosti součásti při zachování stejných mechanických vlastností.

Plán experimentů byl sestaven na základě zadání bakalářské práce a následně rozšířen o podmínky snižování zbytkových napětí v materiálech. Skládal se z následujících bodů:

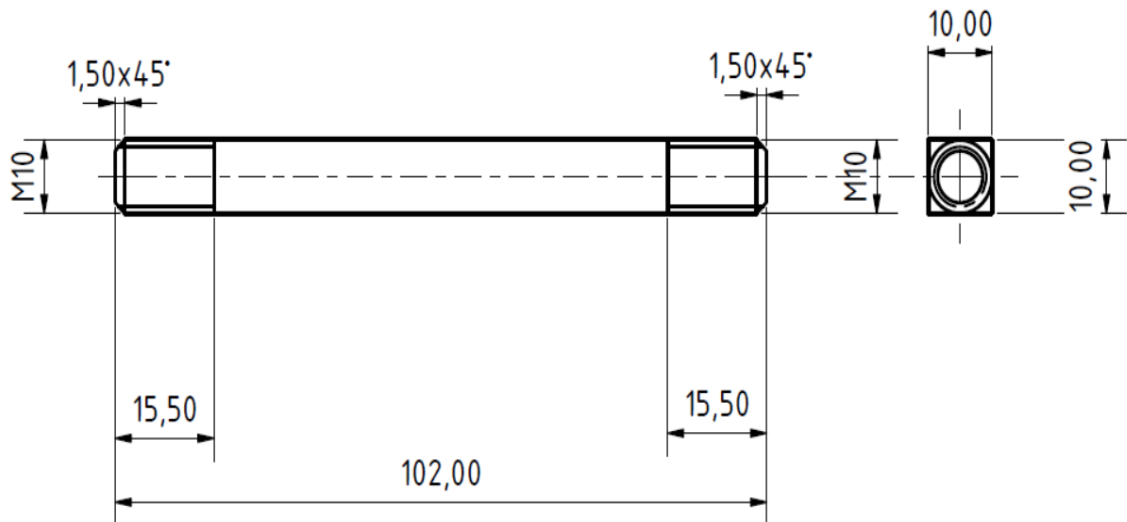
- 1) Aplikace teplotních cyklů v přístroji Gleeble 3500 s maximální teplotou cyklu 1080; 1200 a 1365 °C a rychlostí ochlazování odpovídající svařovacímu cyklu
- 2) Aplikace výše uvedených teplotních cyklů v přístroji Gleeble 3500 se zvýšenou rychlostí ochlazování
- 3) Stanovení podmínek snižování hodnot zbytkových napětí a kvantifikace hodnot pro jednotlivé teploty T_x a výdrže na těchto teplotách t_x . Bylo rozhodnuto provést experimenty při teplotách $T = 200, 300, 400, 500$ a 550 °C s dobou výdrže na teplotě $t = 2$ a 4 hodiny
- 4) Stanovení mechanických vlastností materiálu S700MC při aplikaci vybraných podmínek žíhání na snížení vnitřních napětí
- 5) Aplikace alespoň jednoho způsobu žíhání na snížení vnitřních napětí na vzorcích z přístroje Gleeble

3.2 Příprava vzorků pro experimenty v přístroji Gleeble 3500

Ocel S700MC byla dodána ve formě plechu o tloušťce 10 mm, ze kterého byly nařezány polotovary pro obrábění. Pro experiment byly vyrobeny vzorky čtvercového průřezu o straně 10 mm. Na koncích vzorků byly vyrobeny závity M10, sloužící k upevnění vzorků do čelistí simulátoru, tak jak je ukázáno na výkrese na obrázku 3.1.1 i na fotografii hotového



vzorku na obr 3.1.2. Čtvercový průřez byl zvolen proto, aby se při měření zbytkových napětí rentgenovou difrakcí nemusely provádět kompenzace tvaru povrchu vzorku, mající vliv na přesnost měření.

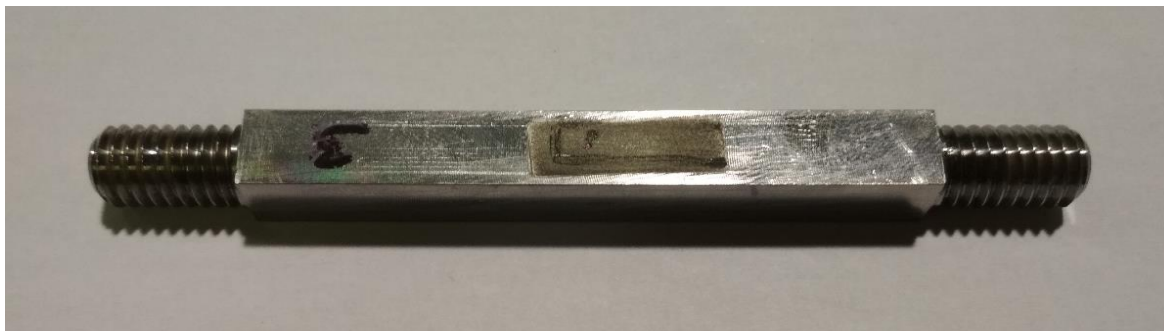


Obr. 3.1.1 Výkres vzorku pro simulaci teplotních cyklů



Obr. 3.1.2 Hotové vzorky pro simulaci teplotních cyklů

U hotových vzorků bylo třeba odstranit nežádoucí zbytková napětí v povrchové vrstvě vzniklá po obrábění. U části vzorků toho bylo docíleno žiháním ve vakuové peci při teplotě 650 °C po dobu 2 hodiny, což jsou parametry žihání běžně využívané v technické praxi, při tepelném zpracování svařovaných konstrukčních celků. U druhé skupiny vzorků byla povrchová vrstva odstraněna lokálním elektrolytickým odleptáním. Pro tento případ byla za pomoci 3D tisku vyrobena speciální silikonová hubice o rozměrech 7 x 15 mm, která kopírovala povrch vzorku a tím docházelo k rovnoměrnému odleptání. Tloušťka odleptané vrstvy činila 0,2 mm. Vzorek s odleptanou povrchovou vrstvou ukazuje na obr. 3.1.3.



Obr. 3.1.3 Naleptaný vzorek

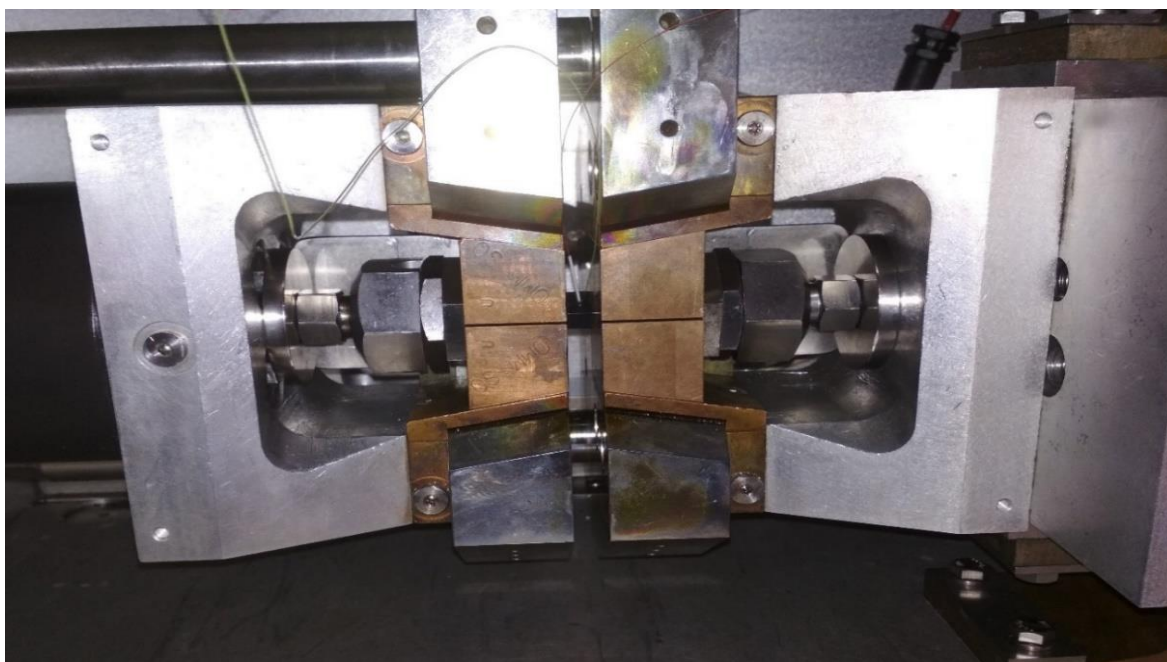
3.3 Simulace svařovacího cyklu

Vyrobené vzorky mohly být následně připraveny pro teplotní simulátor Gleeble 3500 tak, aby na ně mohly být aplikovány definované teplotní cykly za přesně definovaných okrajových podmínek. Nejprve byl na střed vzorku přivařen termočlánek pro řízení teploty ohřevu i ochlazování. Umístění na střed vzorku bylo zvoleno z důvodu teplotního gradientu ve vzorku. Přivaření termočlánu bylo provedeno pomocí kondenzátorové svářečky a k řízení byl použit termočlánek typu K. Dráty termočlánu byly navařeny co nejbližší k sobě a odizolované konce byly překryty keramickou izolací kvůli zamezení vzájemného dotyku drátů. Po navaření termočlánu byly na oba konce vzorku našroubovány dvě matice, jednak kvůli zajištění správného upnutí v teplotním simulátoru, ale hlavně proto, aby mohl být vzorek vystaven tahovým i tlakovým napětím. Nakonec byl vzorek vložen do vysokoteplotních měděných čelistí s plným kontaktem, jak je ukázáno na obr. 3.1.4, tak aby byl ve shodě s kapitolou 2.6 ve vzorku vytvořen teplotní gradient odpovídající podmínkám při reálném svařování. Z tohoto důvodu byla volná délka vzorku mezi čelistmi omezena na délku 10 mm.



Obr. 3.1.4 Připravený vzorek

Celá sestava byla vložena do pracovní komory simulátoru Gleeble 3500. Pro správný a dostatečný kontakt mezi vysokoteplotními čelistmi a upínacím systémem přístroje byl vzorek upevněn pomocí rozpěrných šroubů. Primárním důvodem tohoto kroku je zajištění dobrého přestupu proudu ohřívajícího vzorek a zajištění intenzivního odvodu tepla měděnými čelistmi. Sekundárním důvodem výše uvedeného postupu je zajištění vzorku proti pohybu tak, aby na něj mohla být aplikována tahová i tlaková napětí. Upnutý vzorek umístěný v pracovní komoře systému Gleeble je zobrazen na obr. 3.2.1. Dalším krokem bylo uzavření pracovní komory a její vakuování, a to na hodnotu $4 \cdot 10^{-3}$ Torr.

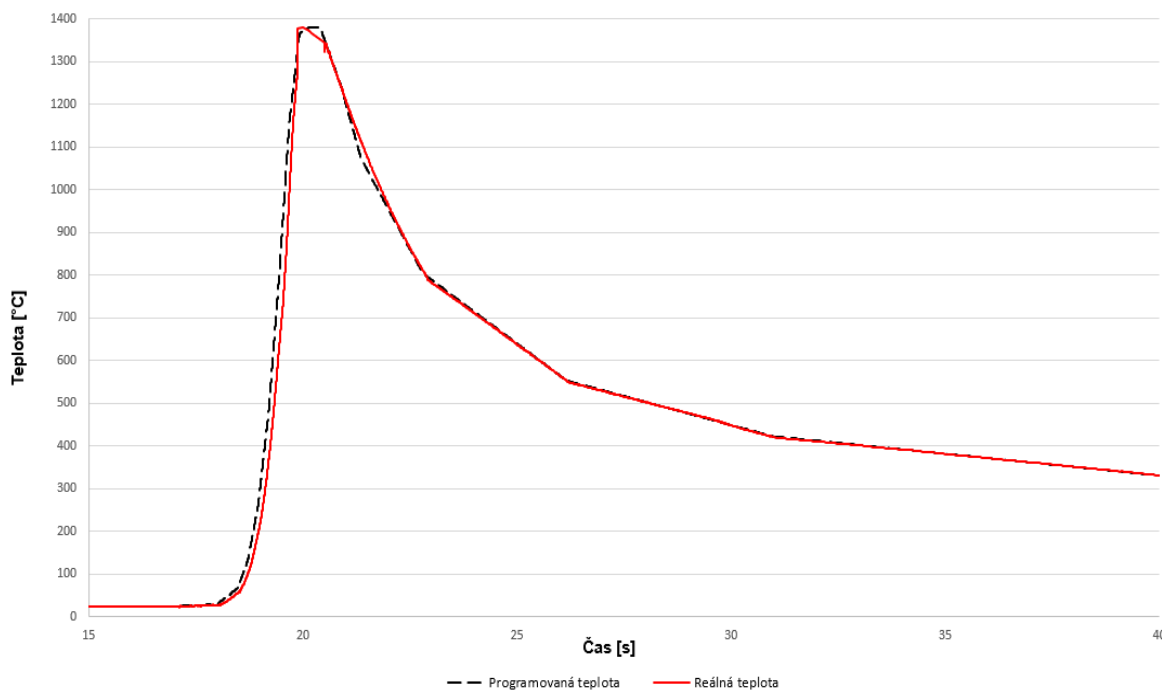


Obr. 3.2.1 Vzorek v pracovní komoře systému Gleeble

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.6, systém Gleeble 3500 umožňuje ohřevy rychlostí až $10\,000\text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$. Proto mohou být na vzorek aplikovány reálné svařovací cykly změřené termočlánky při obloukovém svařování. Na obrázku 3.2.2 je ukázán použitý teplotní cyklus, který byl změřen při svařování koutového svaru z oceli S700MC metodou MAG. Jedná se o teplotní cyklus s maximální teplotou 1365 °C .

Následovala tvorba simulovaných svařovacích cyklů. Tyto simulace jsou v přístroji Gleeble vytvářeny pomocí programu QuickSim2. Jedná se o tabulkový řídicí program, ve kterém je možné jednoduše zadávat údaje o teplotě a času definujících dílčí rychlosti ohřevu a ochlazování. Dále jsou pro každou dílčí část programu uváděny údaje o způsobu řízení, frekvenci snímání a dílčích komponentech pomáhajících při realizaci experimentu. V programu QuickSim2 byly naprogramovány tři teplotní cykly s různou maximální teplotou

a to 1080 °C, 1200 °C a 1365 °C. Tedy teplotní cykly odpovídající třem rozdílným místům v TOO.

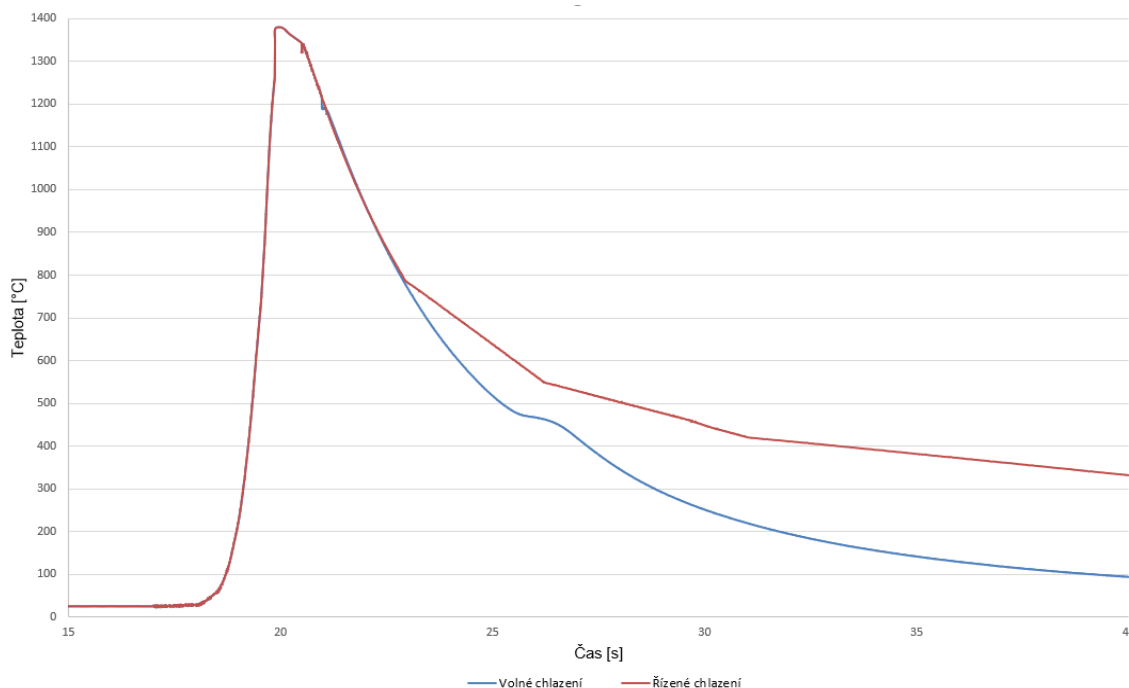


Obr. 3.2.2 Teplotní cyklus s maximální teplotou 1365 °C

Řízení teploty dle programu bylo realizováno pomocí termočlánku typ K připojeného k portu sběrnice s označením TC1. Dalším krokem bylo nastavení způsobu řízení programu. Systém Gleeble umožňuje několik způsobů řízení procesu, přičemž nejpoužívanější je řízení pomocí síly. V takovém případě řídicí systém umožňuje, díky zpětnovazebnímu řízení a siloměrné hlavě, aplikovat na vzorky v průběhu ohřevu a ochlazování definovanou sílu (respektive napětí), případně sílu nulovou. V takovém případě se čelisti posunují podle údajů ze siloměrné hlavy tak, aby ve vzorku nevznikala zbytková napětí, ani plastické deformace a vzorek tak nebyl ovlivněn. Při simulacích svařování se zpravidla používá řízení pomocí průtahoměru, kdy lze realizovat definovaný posun vzorku, případně nulové protažení vzorku. To simuluje tuhost upnutí vzorku, tak jak tomu je u reálných svarů. S rostoucí tloušťkou svařovaných materiálů roste vlastní tuhost celého systému. Proto se při simulacích svařování používá způsob řízení pomocí průtahoměru. Potom lze definovat, o kolik se vzorek při ohřevu může prodloužit, nebo lze při nulové možnosti prodloužení definovat dokonale tuhé upnutí vzorku. A právě tento způsob byl zvolen při aplikaci naprogramovaných teplotních cyklů na zkušební vzorky.

Kromě toho bylo testováno, zda a případně jak se projeví zvýšení rychlosti ochlazování na hodnotu zbytkových napětí ve vzorku. Proto byly použity jak teplotní cykly odpovídající

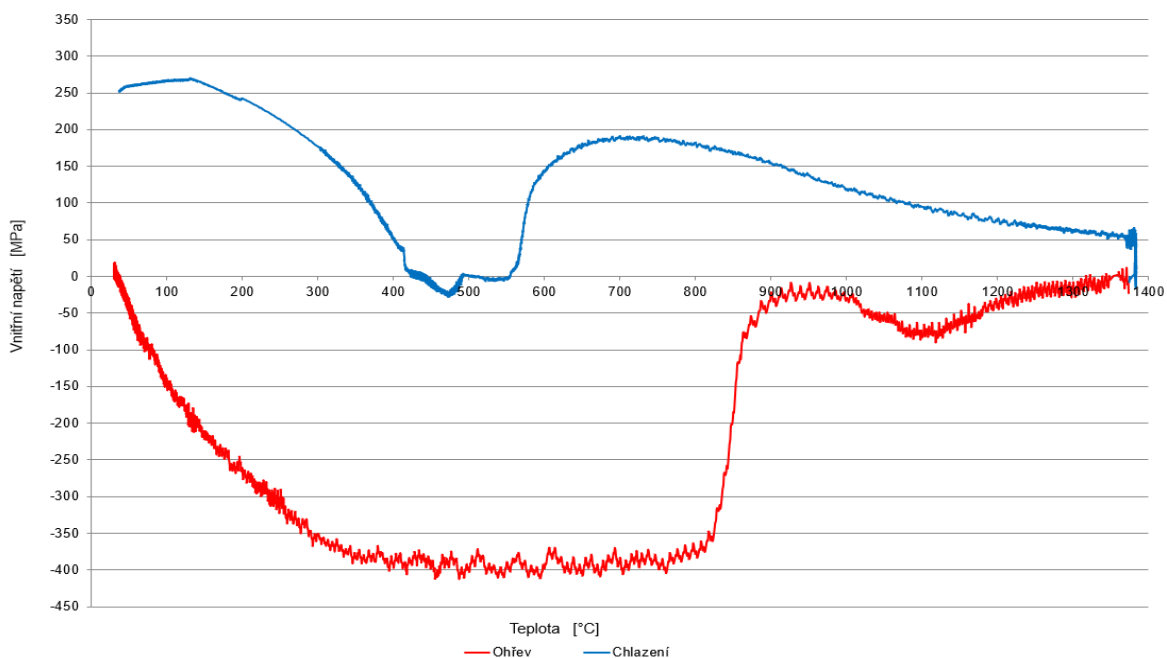
realitě, tak teplotní cykly s takzvaným volným chlazením, kdy je po dosažení maximální teploty vypnuto řízené dohřívání a vzorek je ochlazován jen za pomoci odvodu tepla přes vysokoteplotní čelisti s plným kontaktem. V takovém případě byl vzorek ochlazován přibližně 2,5krát rychleji oproti řízenému ochlazení. Porovnání obou použitých způsobů chlazení je ukázáno na obr. 3.2.3. U křivky volného chlazení je zřejmá prodleva na teplotě přibližně 480 °C, způsobená transformační přeměnou, při které se uvolňuje latentní teplo.



Obr. 3.2.3 Porovnání reálných cyklů s volným a řízeným chlazením

Po naprogramování teplotního cyklu a vyvakuování pracovní komory mohl být samotný test zahájen. Pro všechny vzorky se příprava a test opakovaly stejným způsobem, jen s rozdílem nastavené maximální teploty cyklu a výše zmíněného způsobu chlazení. Při experimentech byla měřena teplota, síla a napětí ve vzorku a bylo kontrolováno také případné prodloužení vzorku. Na obrázku 3.2.4 je ukázána závislost napětí vznikajícího ve vzorku na teplotě ohřevu vzorku. Je třeba si však uvědomit, že teplota ve vzorku není rovnoměrná (jedná se o teplotní gradient), a proto se každá část vzorku chová odlišně, stejně jako je tomu v TOO svarů. Z grafu na obrázku 3.2.4 je dále zřejmé, že po začátku ohřevu ve vzorku nejprve narůstají tlaková napětí, a to až po dosažení meze kluzu při teplotě cca 300 °C. Dále je vzorek deformován plasticky, proto se hodnota napětí ustálila kolem hodnoty 400 MPa a teplota dále narůstá. Po dosažení teploty cca 750 °C dochází k výraznému poklesu tlakových napětí, které je způsobeno transformační přeměnou materiálu na austenit. Po dosažení maximální teploty cyklu a začátku chladnutí dochází k přeměně tlakových napětí na tahová, jejichž hodnota během chlazení narůstá.

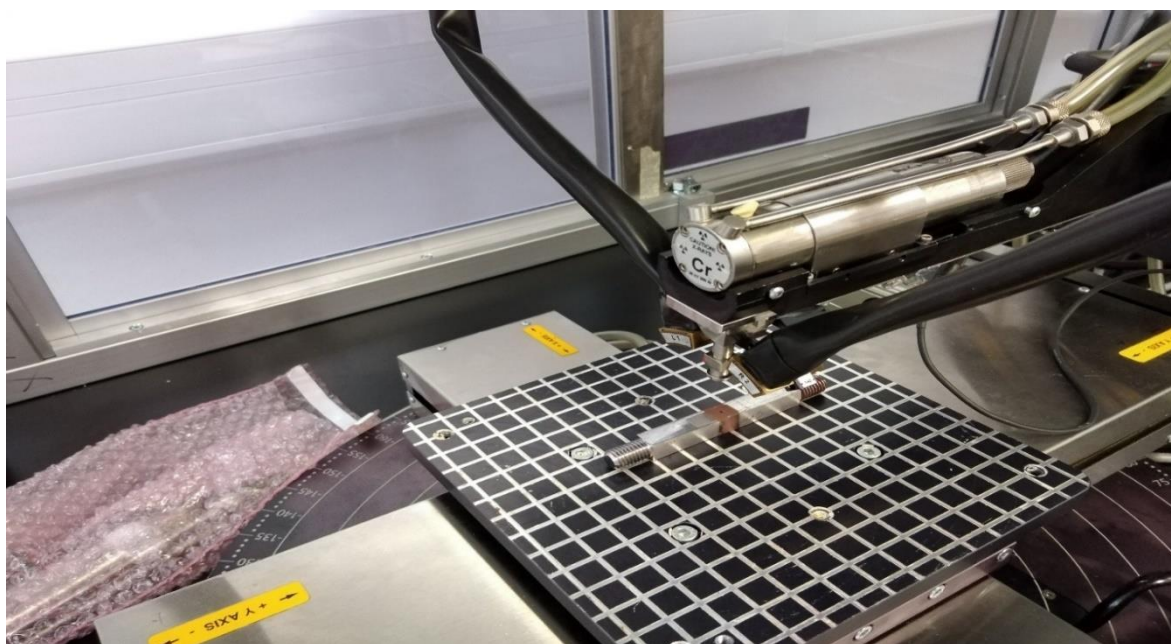
Při dosažení teploty transformační přeměny austenitu dochází k dalšímu výraznému snížení napětí. S dalším chladnutím tahová napětí dále rostou.



Obr. 3.2.4 Graf závislosti napětí vzorku na teplotě

3.4 Zbytková napětí po aplikaci svařovacích cyklů

Po aplikaci naprogramovaných teplotních cyklů na všechny vzorky bylo možné přistoupit k měření vnitřních zbytkových napětí. Měření bylo provedeno rentgenovou difrakční analýzou pomocí přístroje Proto iXRD combo s chromovou rentgenkou. Přístroj při měření napětí vzorku je zobrazen na obr. 3.4.1.



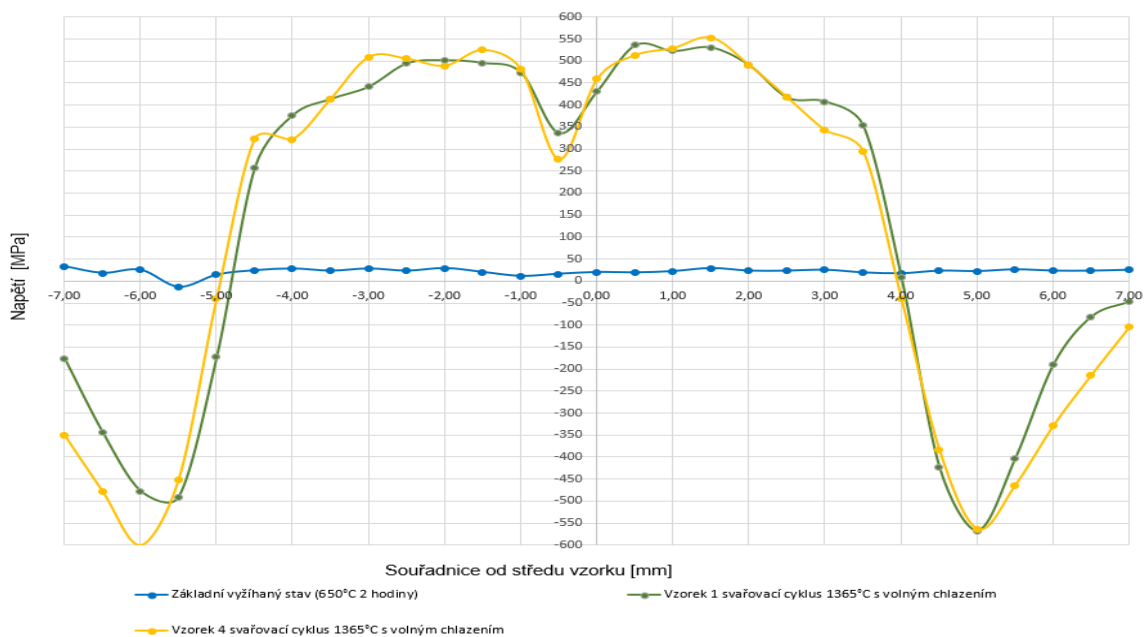
Obr. 3.4.1 Přístroj pro měření zbytkových napětí

Celkem bylo napětí měřeno u sedmi vzorků, rozdělených do tří skupin podle maximální teploty cyklu a to následovně:

Vzorky s maximální teplotou cyklu 1365 °C

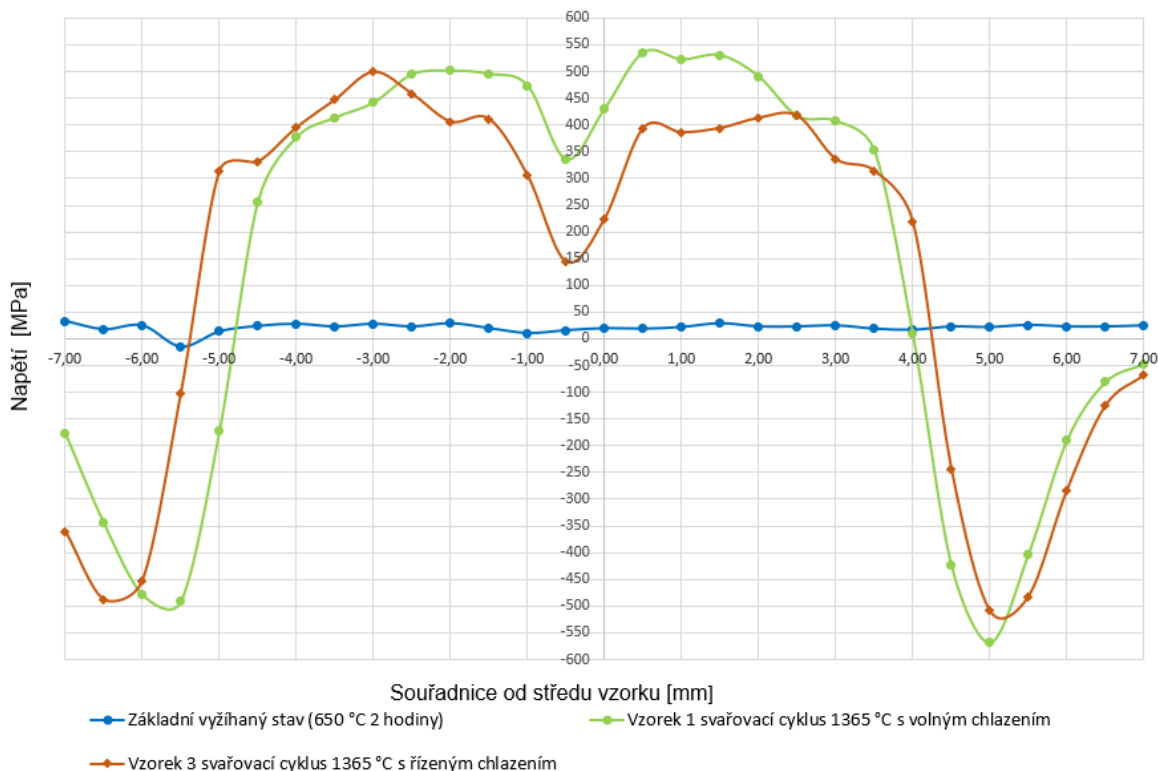
- Vzorek č. 1 – byl žíhán na snížení zbytkových napětí při teplotě 650 °C po dobu 2 hodiny. Následoval teplotní cyklus s maximální teplotou 1365 °C a volným chlazením.
- Vzorek č. 4 – byl žíhán na snížení zbytkových napětí při teplotě 650 °C po dobu 2 hodiny. Následoval teplotní cyklus s maximální teplotou 1365 °C a volným chlazením.
- Vzorek č. 3 – byl žíhán na snížení zbytkových napětí při teplotě 650 °C po dobu 2 hodiny. Následoval teplotní cyklus s maximální teplotou 1365 °C s řízeným chlazením.
- Vzorek č. 5 – byla odleptána povrchová vrstva 0,2 mm. Následoval teplotní cyklus s maximální teplotou 1365 °C s řízeným chlazením.

Průběhy napětí zjištěné u vzorků 1 a 4 jsou znázorněny na obr. 3.4.2. Důvodem, proč byly realizovány dva testy za naprosto identických podmínek, bylo posouzení opakovatelnosti experimentů, a tedy i relevantnosti získaných výsledků. Z obrázku je patrné, že naměřená napětí se u těchto dvou vzorků téměř shodují. Dá se tedy předpokládat opakovatelnost měření pro stejné okrajové podmínky experimentu. Proto, a také z důvodu vysoké časové a finanční náročnosti každého experimentu, bylo u dalších teplotních cyklů měření realizováno vždy jen pro jeden vzorek. Modře znázorněná čára na obrázku 3.4.2 značí počáteční stav napjatosti ve vzorku po žíhání na snížení zbytkových napětí (650 °C po dobu 2 hodiny).



Obr. 3.4.2 Vzorky s teplotním cyklem 1365 °C a volným chlazením

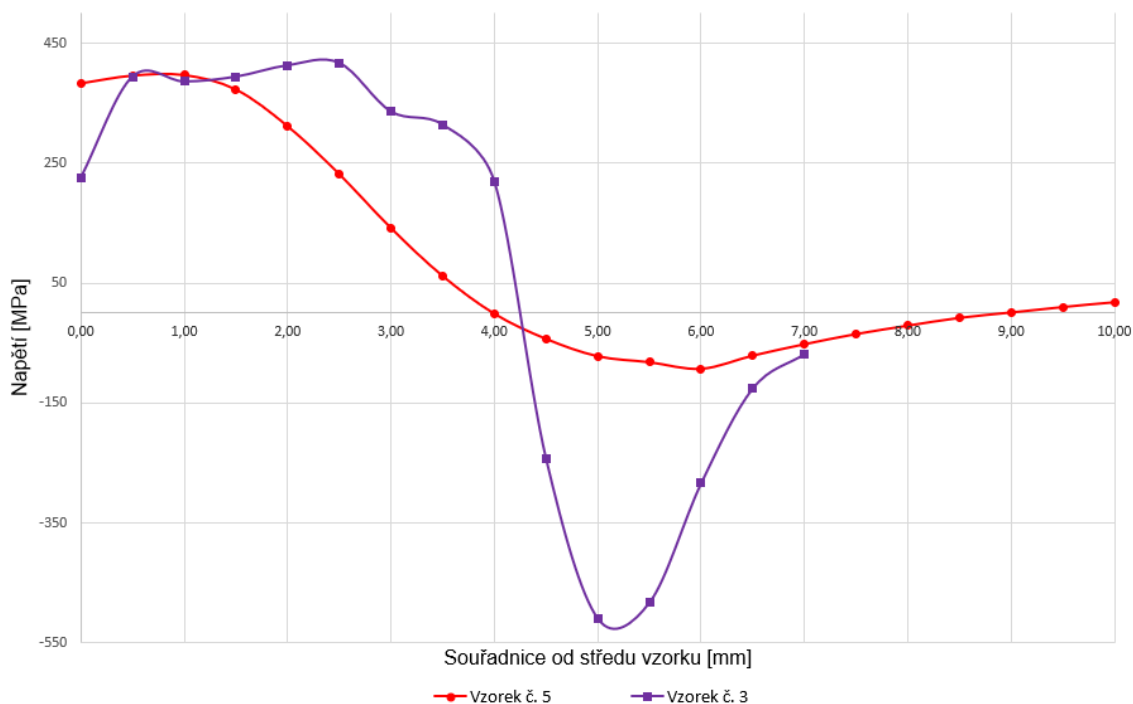
Porovnání vnitřních napětí mezi cykly s volným a řízeným chlazením podle teplotních cyklů znázorněných na obr. 3.2.3 je zobrazeno na obr. 3.4.3. Porovnávána jsou napětí vzorku č. 3 s řízeným chlazením (oranžová křivka) a vzorku č. 1, který byl chlazen volně (zelená křivka). Z grafu je zřejmé, že tahová napětí uprostřed vzorku dosahují při řízeném chlazení mnohem nižších hodnot než u volného chlazení. Důvodem je delší čas na kompenzaci zbytkových napětí plasticou deformací i o trochu delší čas na relaxaci napětí.



Obr. 3.4.3 Vzorek 3 svařovací cyklus 1365 °C a řízeným chlazením

Posledním typem testu s maximální teplotou 1365 °C byla realizace teplotních cyklů na vzorku č. 5, u kterého nebylo na počátku provedeno žíhání na snížení zbytkových napětí. U takového vzorku jsou po obrábění do povrchové vrstvy vneseny vysoké hodnoty zbytkových napětí sahající do hloubky cca 0,1 mm. Proto byla ovlivněná povrchová vrstva odleptána do hloubky 0,2 mm tak, aby byl měřen pouze neovlivněný základní materiál. Vnitřní napjatost po simulaci teplotního cyklu byla měřena pouze v jedné polovině vzorku. Důvodem bylo zachování stejných okrajových podmínek experimentu, jelikož velikost odleptávané plochy byla omezena rozměry leptací hubice na 7x15 mm. Z předchozích měření byla předpokládána symetričnost rozložení vnitřních napětí v pravé a levé polovině od středu vzorku. U vzorku č. 5 byla, na rozdíl od předchozích vzorků, vnitřní napětí doměřena dále do základního materiálu tak, aby bylo dosaženo ustáleného stavu.

Porovnání vnitřních napětí leptaného vzorku č. 5 s žíhaným vzorkem č. 3 je zobrazeno na obr. 3.4.4. V případě obou vzorků šlo o simulaci s řízeným chlazením. Z průběhu je zřejmé, že u leptaného vzorku se průběh vnitřních napětí nejvíce liší v oblasti tlakových napětí.



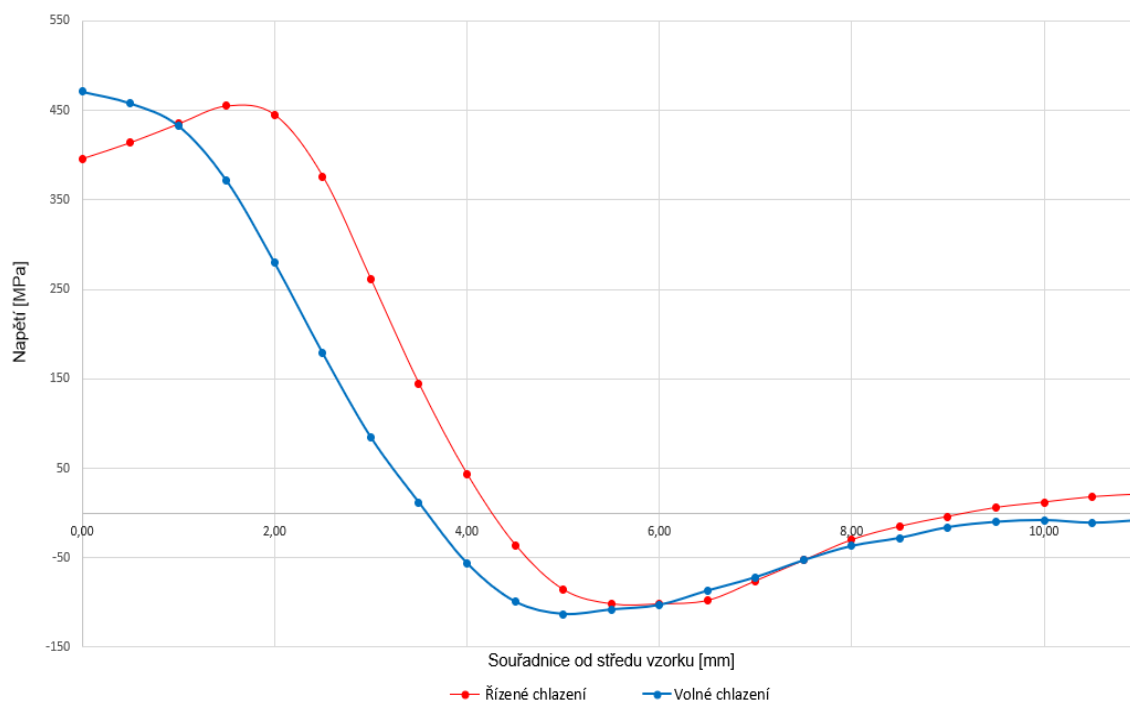
Obr. 3.4.4 Průběh vnitřních napětí u leptaného vzorku po svařovacím cyklu 1365 °C s řízeným chlazením

Vzorky s maximální teplotou cyklu 1200 °C

- Vzorek č. 6 – byla odleptána povrchová vrstva 0,2 mm. Následoval teplotní cyklus s maximální teplotou 1200 °C s řízeným chlazením.
- Vzorek č. 7 – byla odleptána povrchová vrstva 0,2 mm. Následoval teplotní cyklus s maximální teplotou 1200 °C a volným chlazením.

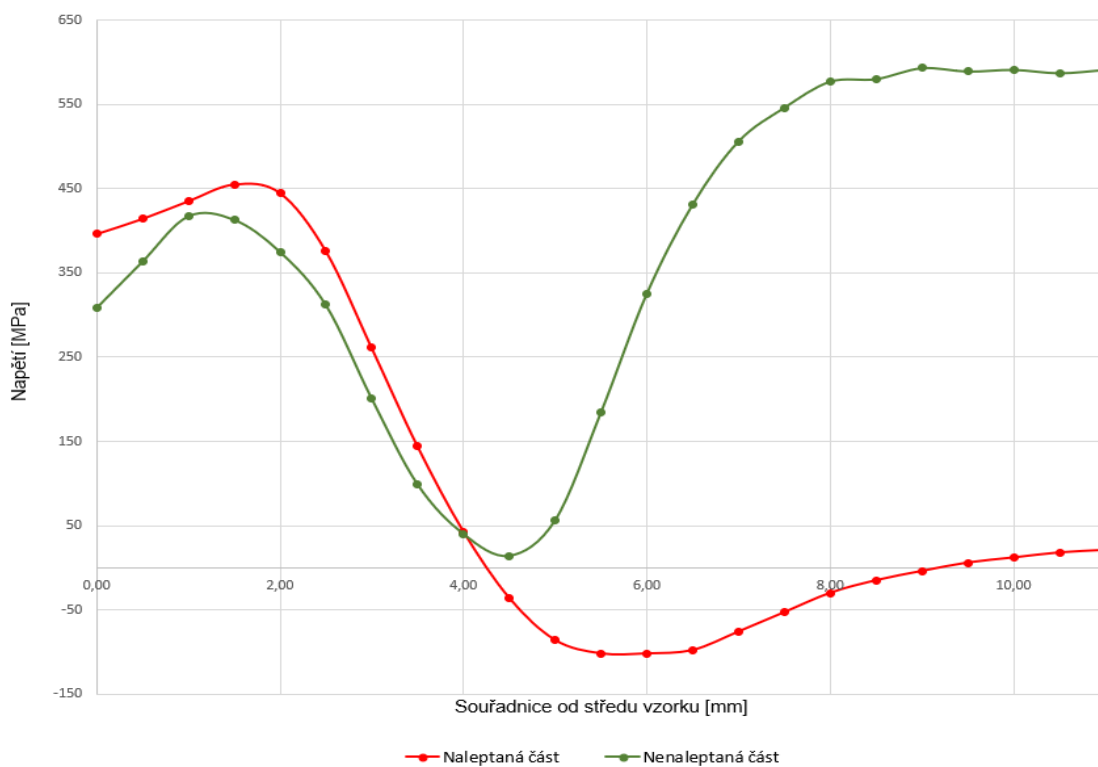
U teplotních cyklů s maximální teplotou 1200 °C byla realizována celkově tři měření na dvou vzorcích. Dvě měření byla provedena v odleptaném místě vzorku, třetí měření bylo provedeno na vzorku číslo 6 v místě které nebylo odleptáno tak, aby mohl být posouzen vliv zbytkových napětí po obrábění.

Stejně jako u vzorku č. 5 byla zbytková napětí měřena pouze na jedné polovině vzorku, z důvodu zachování stejných okrajových podmínek experimentu, a jsou znázorněna na obr. 3.4.5.



Obr. 3.4.5 Vnitřní napjatost u leptaných vzorků po svařovacím cyklu 1200 °C

Posouzení průběhu zbytkových napětí pro vzorek s definovaným způsobem ochlazování na vzorku č. 6 pro naleptanou a nenaleptanou část vzorku je ukázáno na obr. 3.4.6.



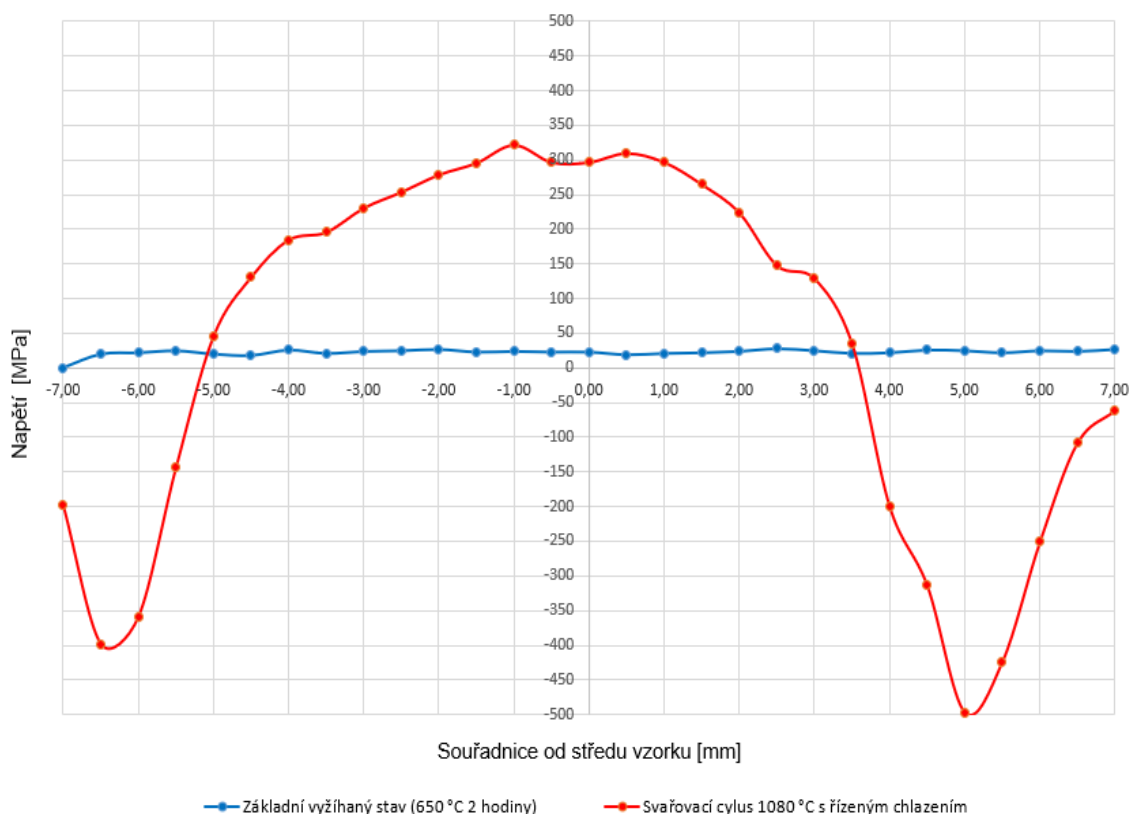
Obr. 3.4.6 Vnitřní napjatost naleptané i nenaleptané části vzorku č. 6 po svařovacím cyklu 1200 °C

Posledním typem experimentu byla aplikace teplotního cyklu s maximální teplotou 1080 °C. V tomto případě byl realizován pouze jeden typ experimentu.

Vzorek s maximální teplotou cyklu 1080 °C.

- Vzorek č. 2 – byl žián na snížení zbytkových napětí při teplotě 650 °C po dobu 2 hodiny. Následoval teplotní cyklus s maximální teplotou 1080 °C s řízeným chlazením.

Průběh zbytkových napětí napříč vzorkem byl po aplikaci tohoto cyklu značně odlišný od cyklu s maximální teplotou 1365 °C a 1200 °C. Průběh vnitřních napětí vzorku 2 je ukázán na obr. 3.4.6. Jelikož křivka ve středu vzorku neměla tendenci nějak významně klesat, nebyla pro tento cyklus prováděna simulace s volným chlazením.



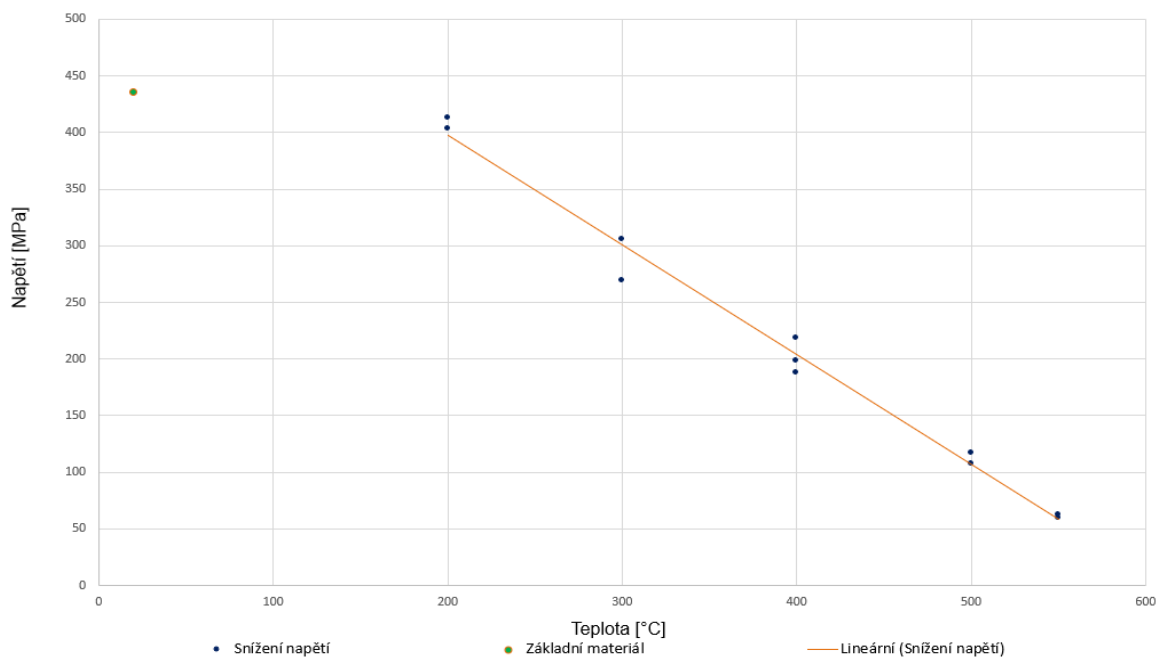
Obr. 3.4.6 Průběh vnitřních napětí u vzorku 2 po svařovacím cyklu 1080 °C s řízeným chlazením

3.5 Vliv žíhání na změnu velikosti zbytkových napětí

Pro posouzení vlivu žíhání na velikost zbytkových napětí v materiálu byly experimentálně sestaveny dva žíhací diagramy. Jeden s výdrží 2 hodiny a druhý s výdrží 4 hodiny na žíhací teplotě. Vzorky použité v tomto experimentu byly žíhány ve vakuové peci Reetz na teplotách 200, 300, 400, 500 a 550 °C. Po vyžhání všech vzorků byly pomocí rentgenové difrakční analýzy naměřeny hodnoty zbytkových napětí. Naměřené hodnoty zbytkových napětí po žíhání s výdrží na teplotě po dobu 2 hodiny jsou shrnuty v tabulce 3 a na obr. 3.5.1 je následně graficky znázorněno jejich lineární snižování v závislosti na teplotě. V tabulce 3 je uveden jednak počáteční stav napjatosti v daném bodě po termomechanickém válcování, tedy po způsobu výroby oceli S700MC, a potom následná hodnota zbytkové napjatosti po zvoleném teplotním cyklu žíhání na snížení zbytkových napětí. Aby mohla být změřena počáteční napjatost základního materiálu, byla z povrchu vzorku odleptána část materiálu do hloubky 0,2 mm. V tomto případě byl použit kruhový nástavec o průměru 12 mm.

Tabulka 3. Zbytková napětí po žíhání s výdrží 2 hodiny

Vzorek	Stav	Zbytková napětí [MPa]	Odchylka měření ±
1	Základní materiál	508	11
1	Žíhání 200 °C	413	10
2	Základní materiál	472	10
2	Žíhání 200 °C	403	7
3	Základní materiál	468	9
3	Žíhání 300 °C	306	8
4	Základní materiál	435	9
4	Žíhání 300 °C	269	6
5	Základní materiál	431	7
5	Žíhání 400 °C	218	5
6	Základní materiál	431	8
6	Žíhání 400 °C	198	5
7	Žíhání 400 °C	157	5
8	Žíhání 400 °C	188	4
9	Základní materiál	388	6
9	Žíhání 500 °C	107	4
10	Základní materiál	330	6
10	Žíhání 500 °C	117	4
11	Základní materiál	525	7
11	Žíhání 550 °C	62	4
12	Základní materiál	456	9
12	Žíhání 550 °C	59	4

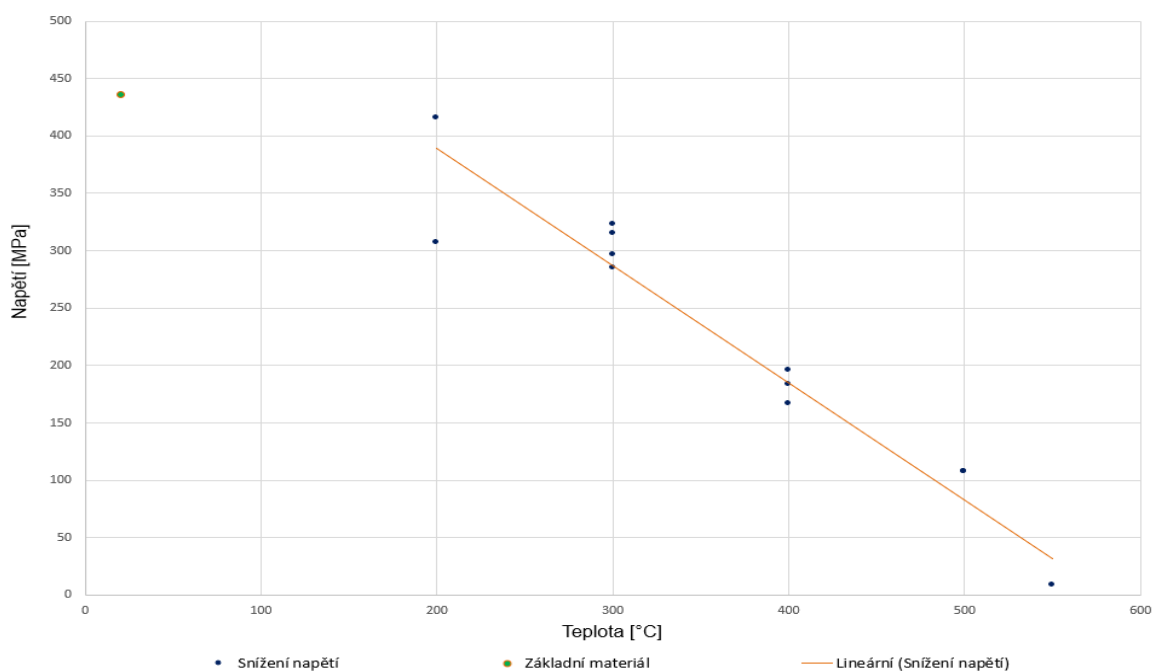


Obr. 3.5.1 Zbytková napětí po žihání při dané teplotě s výdrží 2 hodiny

Hodnoty zbytkových napětí po žihání s výdrží 4 hodiny jsou shrnuty v tabulce 4 a na obr. 3.5.2 je zobrazen jejich pokles v závislosti na teplotě.

Tabulka 4. Zbytková napětí po žihání s výdrží 4 hodiny

Vzorek	Stav	Zbytková napětí [MPa]	Odchylka měření ±
1	Základní materiál	499	11
1	Žihání 200 °C	416	10
2	Základní materiál	382	7
2	Žihání 200 °C	307	6
3	Základní materiál	545	11
3	Žihání 300 °C	323	6
4	Základní materiál	540	13
4	Žihání 300 °C	315	8
5	Základní materiál	339	5
5	Žihání 400 °C	184	5
6	Základní materiál	341	5
6	Žihání 400 °C	66	6
7	Žihání 400 °C	167	4
8	Žihání 400 °C	196	3
9	Základní materiál	538	8
9	Žihání 500 °C	108	6
10	Základní materiál	489	9
10	Žihání 500 °C	108	5
11	Základní materiál	500	9
11	Žihání 550 °C	9	4
12	Základní materiál	482	8
12	Žihání 550 °C	4	4



Obr. 3.5.2 Zbytková napětí po žíhání při dané teplotě s výdrží 4 hodiny

Stanovení mechanických vlastností po aplikaci žíhání

Pro úplnost měření byla u vybraných vyžíhaných vzorků provedena statická zkouška tahem. Z té byly stanoveny mechanické vlastnosti tepelně ovlivněných vzorků a porovnány s mechanickými vlastnostmi základního nevyžíhaného materiálu, které jsou uvedeny v tabulce 2. Nejprve byly měřeny dva vzorky vyžíhané při teplotě 450 °C po dobu 2 hodiny. Mechanické vlastnosti získané z tahové zkoušky při výše uvedených podmínkách jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5. Mechanické vlastnosti vzorku žíhaného při teplotě 450 °C po dobu 2 hodiny

Vzorek	D_0 [mm]	R_{eL} [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{40} [%]
1	6,49	724,39	743,5	807,42	9,36	21,21
2	6,52	744,01	773,54	825,36	9,38	20,88

Následně byla tahová zkouška provedena pro dva vzorky žíhané při teplotě 550 °C po dobu 4 hodiny. V tabulce 6 jsou uvedeny výsledné mechanické vlastnosti.

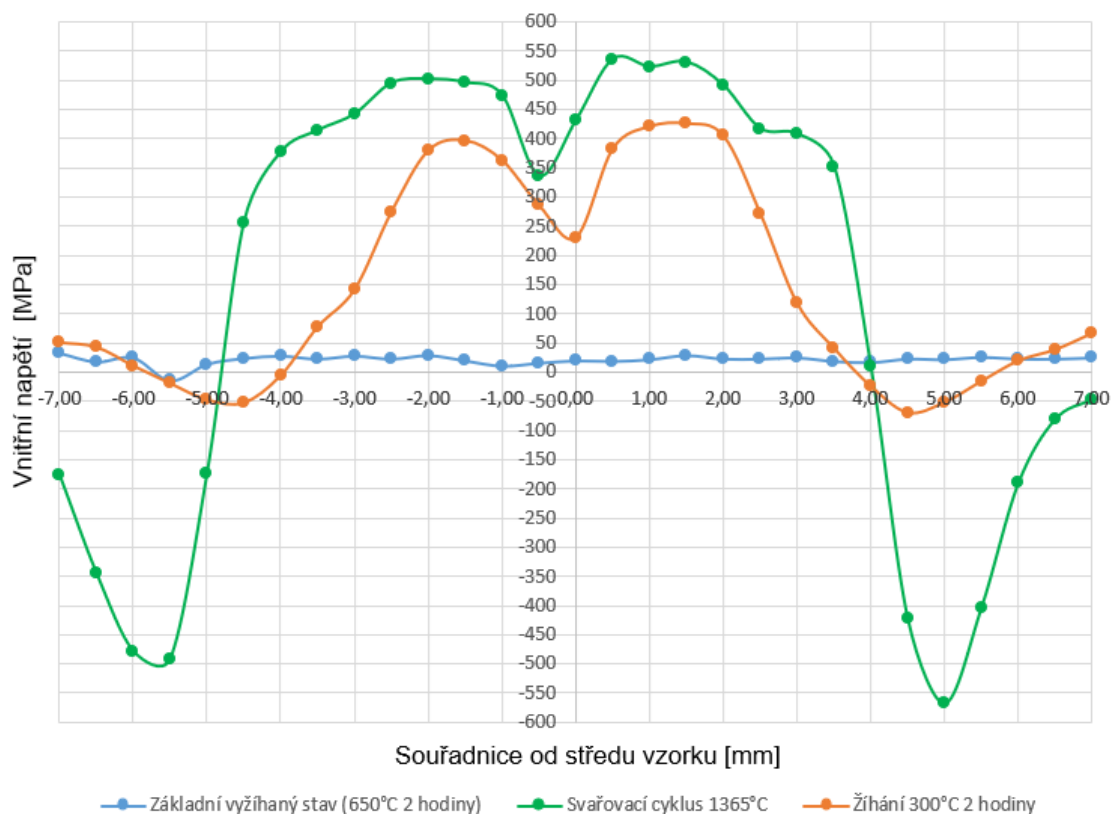
Tabulka 6. Mechanické vlastnosti vzorku žíhaného při teplotě 550 °C po dobu 4 hodiny

Vzorek	D ₀ [mm]	R _{eL} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _m [MPa]	A _g [%]	A ₄₀ [%]
1	6,49	722,66	745,38	784,61	9,51	20,93
2	6,49	721,04	742,98	786,19	9,77	21,35

Při porovnání mechanických vlastností před a po aplikaci žíhání je vidět, že se zvyšující se teplotou žíhání klesají kromě vnitřních napětí i mechanické vlastnosti materiálu. Tento fakt musí být brán v úvahu při předepisování postupu svařování a tvorbě WPS. Žíhací teplota by měla být volena tak, aby nedocházelo ke zdatelnému zhoršení mechanických vlastností.

3.6 Vliv žíhání na snížení zbytkových napětí po teplotních cyklech

Posledním plánovaným úkolem praktické části práce bylo posouzení vlivu teplotního cyklu při žíhání na snížení zbytkových napětí u vzorků, které prošly simulací svařovacího cyklu. Byl vybrán vzorek č. 1, jenž byl před simulací svařovacího cyklu nejprve žíhán při teplotě 650 °C po dobu 2 hodiny. Na vzorek byl aplikován svařovací cyklus s maximální teplotou 1365 °C. Po aplikaci teplotního cyklu a změření vnitřních napětí bylo přistoupeno k žíhání na snížení vnitřních napětí. Pro tento případ bylo zvoleno žíhání při teplotě 300 °C po dobu 2 hodiny. Po vyžíhání vzorku byla znovu ve stejných bodech změřena vnitřní napjatost pomocí rentgenové difrakční analýzy. Vnitřní napětí před a po aplikaci žíhání v závislosti na poloze od středu vzorku jsou graficky znázorněna na obr. 3.6.1. Modrá barva na obrázku 3.6.1 značí počáteční stav napjatosti ve vzorku po aplikaci žíhání na teplotě 650 °C po dobu 2 hodiny. Červená barva znázorňuje hodnotu zbytkových napětí po aplikaci teplotního cyklu s maximální teplotou 1365 °C a volným chlazením vzorku. Zelená barva ukazuje, jak se hodnota zbytkových napětí změnila po aplikaci žíhání při teplotě 300 °C po dobu 2 hodiny. Po žíhání došlo téměř k vymizení tlakových napětí a poklesu tahových napětí.



Obr. 3.6.1 Svařovací cyklus s maximální teplotou 1365 °C, který byl žihán při teplotě 300 °C po dobu 2 hodiny

Na druhý vzorek, označený číslem 4, který prošel naprosto stejnými podmínkami při aplikaci svařovacího cyklu (viz porovnání průběhu zbytkových napětí na obr. 3.4.2), bylo aplikováno žihání na snížení vnitřních napětí při teplotě 450 °C po dobu 2 hodiny. Bohužel z důvodu poruchy rentgenky bylo měření realizováno až po odevzdání bakalářské práce, a proto zde nemůže být průběh napětí uveden.

4. Diskuze výsledků

Cílem experimentální části práce bylo zjistit, jaký bude mít vliv aplikace teplotních cyklů na tvar a velikost zbytkových napětí ve zkoušených vzorcích. V první části experimentů byla posuzována tvorba vnitřních zbytkových napětí po simulaci svařovacích cyklů, realizovaných za různých podmínek. Posuzován byl vliv teplotních cyklů s maximálními teplotami ohřevu 1365, 1200 a 1080 °C, a to s rozdílnými způsoby chlazení vzorků. Navíc byly pro měření použity dva počáteční stavy vzorků. Zprvé vzorky vyžíhané na snížení vnitřních napětí na teplotě 650 °C po dobu 2 hodiny a zadruhé vzorky neovlivněného základního materiálu, u nichž musela být odleptána povrchová vrstva zpevněná obráběním při výrobě vzorku.

Z naměřených hodnot byla nejprve posouzena opakovatelnost měření u dvou vzorků s teplotním cyklem 1365 °C a volným chlazením (viz. obr. 3.4.2). Oba vzorky dosáhly po stejném svařovacím cyklu téměř totožné hodnoty vnitřních napětí, a to jak z hlediska tvaru rozložení, tak z hlediska velikosti. Tím byla potvrzena opakovatelnost měření pro navržený typ experimentů. Pro další vzorky tak mohl být z důvodu časové i cenové úspory prováděn již jen jeden experiment. Z dosažených výsledků měření lze konstatovat, že maximální teplota svařovacího cyklu má v intervalu teplot 1080 – 1365 °C poměrně značný vliv na velikost tahových napětí. U teplotního cyklu s maximální teplotou 1080 °C bylo dosaženo o 35 % nižších hodnot zbytkových napětí, než u teplotního cyklu s maximální teplotou 1365 °C.

Také intenzita ochlazování vzorku má na hodnotu zbytkových napětí značný vliv. Nejvíce se projevuje v místech nejvyšších teplot, jak je zřejmé například z obrázku 3.4.3. Delší čas setrvání na vysokých teplotách umožňuje intenzivnější kompenzaci zbytkových napětí plastickou deformací i delší čas na relaxaci napětí. To způsobí v místě maximální teploty (1365 °C) snížení zbytkových tahových napětí dokonce o 55 %. S klesající maximální teplotou cyklu se tento vliv snižuje a pod teplotou 1080 °C je téměř zanedbatelný.

Při zkoumání vlivu žíhání na velikost zbytkových napětí základního materiálu byly sestaveny dva žíhací diagramy. Jeden pro dobu výdrže na žíhací teplotě po dobu dvě hodiny a druhý s výdrží na teplotě po dobu čtyři hodiny. Z naměřených hodnot je zřejmé, že pro ocel S700MC, použitou v tomto experimentu nebyl rozdíl ve výdržích na žíhacích teplotách po dobu 2 a 4 hodiny nijak významný. Zbytková napětí se v obou případech pohybují v rozmezí stejných hodnot. Významný vliv má však použitá teplota žíhání. S vyšší



teplotou žíhání dochází k lineárnímu poklesu vnitřních napětí. Po žíhání na teplotě 550 °C se hodnoty vnitřních napětí již blížily k nule.

Na teplotě žíhání jsou ovšem závislé mechanické vlastnosti materiálu. Materiál S700MC je zpevněn především hranicemi zrn, ale výraznou složkou je i deformační zpevnění materiálu. Zatímco při teplotách do 650 °C by zhrubnutí zrna nemělo být pozorováno, u dislokačního zpevnění může docházet k výrazným změnám. Při žíhání materiál relaxuje a množství dislokací se snižuje. Byly provedeny experimenty aplikující na zkušební vzorky teplotní cykly s výdrží na teplotě 450 °C po dobu 2 hodiny a s výdrží na teplotě 550 °C po dobu 4 hodiny. Po vyžhání byly u vzorků provedeny statické zkoušky tahem, přičemž byly zjišťovány mechanické vlastnosti materiálu. Z výsledků tahových zkoušek je zřejmé, že po žíhání na teplotě 550 °C klesá mez pevnosti a homogenní tažnost materiálu. Pokles meze pevnosti materiálu činil 7,5 % a pokles homogenní tažnosti dosahoval hodnoty 12 % oproti mechanickým vlastnostem základního materiálu. Mez kluzu zůstala po žíhání obdobná jako u základního materiálu. Překvapivý je zejména pokles homogenní tažnosti, protože snížení mechanických vlastností bývá zpravidla doprovázeno zvýšením tažnosti.

Posledním cílem experimentální části práce bylo posouzení vlivu žhacího procesu na vzorek po simulaci svařovacího cyklu. Vzorek byl vyžhán na teplotě 300 °C po dobu dvou hodin. Z naměřených zbytkových napětí (viz. obr. 3.6.1) je patrný významný pokles tlakových napětí, která téměř vymizela. U tahových napětí došlo k poklesu o přibližně 20 %. Vzhledem k tomu, že tahová napětí jsou ve svařových spojích mnohem nebezpečnější, z důvodu možného praskání, bylo vhodné zvolit žhací cyklus s vyšší teplotou a posoudit následný pokles vnitřních napětí ve vzorku. Tento proces byl zrealizován pro vzorek po svařovacím cyklu 1365 °C a vyžhán byl na teplotě 400 °C po dobu dvou hodin. Z důvodu poruchy rentgenky a nutnosti nákupu nové, dovezené z Kanady, bylo měření zbytkových napětí realizováno až po odevzdání této bakalářské práce, a proto zde není možné vliv žhací teploty 400 °C popsat.



5. Závěr

Cílem této práce bylo posouzení vlivu svařování a tepelného zpracování na hodnoty a rozložení zbytkových napětí ve zkušebních vzorcích. Protože zbytková napětí v materiálu vznikají během každého technologického zpracování, je velmi důležité znát jejich hodnoty a možnosti jejich snižování. Nežádoucí tahová napětí totiž velmi negativně ovlivňují pevnost konstrukcí, proto je potřeba tato napětí eliminovat.

V experimentech bylo zjištěno, že zbytková napětí se dají eliminovat téměř na nulovou hodnotu, za pomoci žíhání na snížení vnitřních pnutí. Tento proces s sebou ovšem nese nevýhody ve smyslu snižování mechanických vlastností materiálu. Je tedy důležité zvolit vhodnou žíhací teplotu, při níž nedochází k výraznému snížení jeho mechanických vlastností, ale zároveň dochází k optimálnímu snížení vnitřních napětí. Při svařovacím cyklu za vyšších teplot (od 1200 °C) hodnoty vnitřních napětí významně ovlivňuje způsob ochlazování vzorků. V případě řízeného chlazení se hodnoty zbytkových napětí snižují a následným žíháním na snížení vnitřních napětí lze dosáhnout příznivějších hodnot zbytkové napjatosti.

Výsledky experimentů, které byly prováděny na vzorcích z jemnozrnné oceli S700MC, lze shrnout v následujících bodech:

1. Zbytková napětí vznikající během svařování jsou závislá na maximální teplotě cyklu, zejména v oblasti tahových napětí.
2. Zbytková napětí vznikající během svařování jsou závislá také na rychlosti ochlazování. S klesající rychlostí ochlazování dochází zároveň k intenzivnějšímu poklesu tahových napětí v místě nejvyšších teplot.
3. Hodnoty zbytkových napětí po žíhání jsou přímo závislé na žíhací teplotě, s rostoucí teplotou se zbytková napětí snižují, zároveň však klesají i mechanické vlastnosti materiálu.
4. Při žíhání na snížení vnitřních napětí u oceli S700MC není rozhodující doba výdrže, ale pouze teplota žíhání.
5. U žíhání při teplotě 300 °C po dobu 2 hodiny dochází u vzorků, na něž byl aplikován teplotní cyklus, k relaxaci téměř všech tlakových napětí a pouze k částečné relaxaci napětí tahových.



Seznam použité literatury

- [1] KRAUS, Ivo, Nikolaj, GANEV. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 171 s. ISBN 80-01-03099-7.
- [2] KRAUS, Ivo, Nikolaj, GANEV. *Difrakční analýza mechanických napětí*. Praha: ČVUT, 1995, 274 s. ISBN 80-01-01366-9.
- [3] GANEV, Nikolaj. *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí* [online]. 2002, Dostupné z: <http://www.xray.cz/ms/bul2002-2/ganev.pdf>
- [4] NEUMANN, Heinz. *Teorie svařování a pájení. Část 1, Tavné svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014, 167 s. ISBN 978-80-7494-171-9
- [5] MIKMEKOVÁ, Šárka. *Přímé zobrazení vnitřního napětí v krystalu pomocí pomalých elektronů*. Brno 2012. Diplomová práce. Masarykova Univerzita v Brně
- [6] MESSLER, Robert W. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999, 662 s. ISBN 04-712-5376-6.
- [7] VÁCLAVÍK, Jaroslav, Zbyněk BUNDA, Petr BOHDAN a Otakar WEINBERG. *Aplikace vybraných metod pro měření zbytkového napětí* [online]. Seč, 2012, 8 [cit. 2017-07-15]. Dostupné z: http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf
- [8] KOLAŘÍK, Kamil a Nikolaj GANEV. *Difrakční a tenzometrická analýza povrchů ocelí po nekonvenčních metodách obrábění* [online]. 2006, 4 [cit. 2017-07-15]. Dostupné z: <https://www.xray.cz/ms/bul2006-2/kolarik.pdf>
- [9] Západočeská univerzita v Plzni. *Měření napětí a zbytkových napětí*. 14. 2. 2020, Dostupné z: <http://ttp.zcu.cz/>
- [10] LU, Jian. *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Lilburn: Fairmont Press, 1996. ISBN 9780132557382.
- [11] OCHODEK, Vladislav. *Residual stress evaluation in spirally welded pipes for gas pipeline*. In. 6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, ICBM 6, 9-10 July 2007, Valenciennes, University of Valenciennes, France, ISBN 951-98400-7-9



[12] KLEMENT, Jiří, František, PLÁNIČKA, Miloš, VLK. *Modelová podobnost, elektrická odporová tenzometrie, experimentální určování zbytkových napětí, vyhodnocení experimentálně získaných dat*. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, 2004.

[13] MORAVEC, Jaromír a Josef BRADÁČ. *Možnosti a využití teplotně-napěťového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-138-2.

[14] Gleeble systems. In: Dynamic systems inc. [online]. © 2020 Dynamic systems inc. Dostupné z: <http://www.gleeble.com/>

[15] VRABEC, Zdeněk. *Vliv druhu materiálu a tvaru čelistí na teplotní gradient při ohřevu testovacího vzorku v přístroji Gleeble 3500*. Liberec, 2014. Diplomová práce. TUL.

