



## **Bakalářská práce**

# **Vliv teplotně-napěťových cyklů na hodnoty a rozložení zbytkových napětí v austenitických ocelích**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Petr Netušil**

*Vedoucí práce:*

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

*Konzultant práce:*

Ing. Šárka Bukovská  
Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Vliv teplotně-napěťových cyklů na hodnoty a rozložení zbytkových napětí v austenitických ocelích

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Petr Netušil</b>
<i>Osobní číslo:</i>	S19000092
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra strojírenské technologie
<i>Akademický rok:</i>	2021/2022

### 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 se způsoby stanovení hodnot vnitřních napětí ve vzorcích, zejména s podstatou rentgenové difrakce a způsobem vyhodnocení napětí.
3. Seznamte se s teplotně napěťovým simulátorem Gleeble 3500.
4. Navrhněte základní experimentální program pomocí simulací teplotních cyklů realizovaných v přístroji Gleeble 3500, s přesně definovanými okrajovými podmínkami.
5. Realizujte experimentální program v daném přístroji pro zvolenou austenitickou ocel a poté stanovte zbytková napětí ve vzorcích pomocí rentgenové difrakce.
6. Proveďte zhodnocení výsledků a jejich diskuzi.

*Rozsah grafických prací:* obrázky, tabulky, grafy  
*Rozsah pracovní zprávy:* cca 30 stran textu  
*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-napěťového 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. Strukturální 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. Šárka Bukovská  
Katedra strojírenské technologie

*Datum zadání práce:* 30. listopadu 2021

*Předpokládaný termín odevzdání:* 30. května 2023

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

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

V Liberci dne 30. listopadu 2021

## 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.

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá vlivem teplotně-napěťových cyklů simulujících svařování metodou TIG a analýzou zbytkových napětí ve vzorcích z oceli 1.4301. Svařovací cyklus byl na vzorky aplikován v teplotně napěťovém simulátoru Gleeble 3500. Zbytková napětí byla analyzována s využitím rentgenové difrakce na přístroji Proto XRD Combo. Dále bylo provedeno několik experimentů pro stanovení ideální teploty žihání ke snížení zbytkových napětí ve vakuové peci.

## **Klíčová slova**

zbytková napětí, austenitická ocel, ocel 1.4301, Gleeble 3500, rentgenová difrakce

## **Annotation**

The bachelor thesis deals with the influence of thermomechanical cycles simulating TIG welding on residual stresses in samples from 1.4301 steel. The welding cycle was applied on the samples in the thermomechanical simulator Gleeble 3500. Residual stresses were analyzed by the X-ray diffraction analysis on device PROTO XRD Combo. Furthermore, several experiments were carried out to determine the ideal annealing temperature to reduce residual stresses in the vacuum furnace.

## **Key words**

residual stresses, austenitic steel, 1.4301 steel, Gleeble 3500, X-ray diffraction

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu této bakalářské práce doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za odborné vedení práce a také Ing. Šárce Bukovské pomoc a trpělivost při zpracování celé práce. Dále chci poděkovat své rodině za podporu při studiu a rovněž kolegovi Bc. Jakobovi Šitinovi za pomoc v rámci celého studia.

## Obsah

Seznam použitých symbolů .....	8
1 Úvod .....	9
2 Teoretická část.....	10
2.1 Zbytková napětí a jejich rozdělení .....	10
2.1.1 Procesy vzniku zbytkových napětí.....	11
2.1.2 Napětí vznikající při svařování .....	12
2.1.3 Možnosti snižování zbytkových napětí .....	14
2.2 Stanovení zbytkových napětí .....	16
2.2.1 Destruktivní metody analýzy zbytkových napětí .....	17
2.2.2 Nedestruktivní metody .....	22
2.3 Rentgenová difrakční analýza .....	23
2.4 Teplotně napěťový simulátor Gleeble.....	26
2.4.1 Ohřev a chlazení vzorků.....	26
2.4.2 Upnutí vzorku.....	27
2.5 Analýza zbytkových napětí v austenitických ocelích.....	29
3 Experimentální část.....	30
3.1 Stanovení materiálových vlastností oceli 1.4301 .....	30
3.1.1 Chemické složení.....	30
3.1.2 Mechanické vlastnosti .....	31
3.2 Příprava vzorků .....	31
3.3 Stanovení zbytkových napětí .....	32
3.4 Aplikace teplotních cyklů .....	34
3.5 Stanovení zbytkových napětí po aplikaci teplotních cyklů.....	37
4 Diskuze výsledků .....	40
5 Závěr.....	43
Seznam použité literatury .....	44

## Seznam použitých zkratk

TIG	metoda svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře
XRD	rentgenová difrakční analýza
TOO	tepelně ovlivněná oblast
TC	teplotní cyklus

## Seznam použitých symbolů

$\Delta l$	celkové prodloužení	[mm]
$l_0$	počáteční délka	[mm]
$\alpha$	součinitel teplotní roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
T	konečná teplota tyče	[K]
$T_0$	počáteční teplota tyče	[K]
$\sigma$	napětí	[MPa]
E	Youngův modul	[MPa]
$\varepsilon$	poměrné prodloužení	[-]
$\lambda$	vlnová délka el. magnetického záření	[mm]
n	celočíselný násobek	[-]
d	vzdálenost mezi difrakčními rovinami	[mm]
$\theta$	Braggův úhel	[°]
$\varepsilon_m$	mřížková deformace	[-]
d	vzdálenost mezi sousedními mřížkovými rovinami ve zdeformovaném stavu	[mm]
$d_0$	vzdálenost mezi sousedními mřížkovými rovinami v poč. stavu	[mm]
$\theta_0$	Braggův úhel v počátečním stavu	[°]
v	Perssonovo číslo	[-]
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$	napětí ve směrech hlavních os	[MPa]
$\varepsilon_{\varphi\Psi}$	mřížková deformace ve směru $\varphi, \Psi$	[-]
$(\theta - \theta_0)$	úhlový posun interferenčního maxima	[°]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$A_g$	homogenní tažnost	[%]
$A_{80}$	celková tažnost	[%]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
$A_{c1}$	teplota eutektoidní transformace	[K]



# 1 Úvod

Téměř každý technologický proces má za následek vznik zbytkových napětí. Jejich efekt na výrobky může být jak kladný např. v podobě zpevnění povrchu, tak záporný v podobě zvýšení náchylnosti k lomu a únavě materiálu. S rozmachem průmyslu zejména v minulém století bylo postupně nutné prozkoumat všechny důsledky výrobních procesů a stanovení zbytkových napětí je proto nedílnou součástí procesu návrhu strojních součástí.

Při svařování v materiálu vznikají jak tlaková, tak i tahová zbytková napětí. To značným způsobem ovlivňuje mechanické vlastnosti daného materiálu. Pro jejich stanovení existuje mnoho metod. Nejčastěji se lze setkat s tzv. destruktivními metodami, kdy stanovení napětí je na základě porušení rovnováhy po odebrání části materiálu a následné deformaci materiálu. Dále existují difrakční metody, jejichž principem je analýza odražených paprsků. Počátky výzkumu měřících metod se datují již do 1. poloviny 20. stol. Většina destruktivních metod pro analýzu zbytkových napětí byla certifikována v 2. polovině 20. století. Poté nastal rozvoj difrakčních metod.

Austenitické nerezové oceli vynikají svou korozní odolností, houževnatostí a mají velmi dobrou svařitelnost. Jsou využívány napříč všemi průmyslovými odvětvími, zejména farmacií a chladírenstvím. Konkrétně ocel 1.4301 použitá pro experimenty je nejpoužívanější korozivzdornou ocelí. Jejich nevýhodou je ale nízká mez kluzu. V souladu s tím se dosud pro zlepšení mechanických vlastností používaly různé mechanismy zpevňování, jako je přidávání legujících prvků, deformační zpevnění a zjemňování velikosti zrn.

Teoretická část práce je rozdělena do několika kapitol. První část je věnována základnímu popisu a rozdělení zbytkových napětí. Dále se práce věnuje popisu procesu vzniku zbytkových napětí vznikajících při svařování. V další části je uvedena stručná charakteristika základních metod pro stanovení zbytkových napětí. Poslední částí teoretické části je rešerše studií zabývajících se analýzou zbytkových napětí v austenitických ocelích.

Experimentální část práce je věnována stanovení vlivu procesu svařování s využitím teplotně napěťového simulátoru Gleeble 3500 na vzorky z austenitické oceli, dále je provedena analýza možností následného snížení zbytkových napětí.

## 2 Teoretická část

Teoretická část bakalářské práce se zabývá základním popisem a rozdělením zbytkových napětí, metod využívaných pro jejich stanovení a způsoby jejich snižování. Dále je v této části práce uveden popis a způsob využití teplotně napěťového simulátoru Gleeble 3500 pro experimenty.

### 2.1 Zbytková napětí a jejich rozdělení

Zbytková napětí jsou taková napětí, která zůstávají v součástech i po odstranění všech vnějších zatížení a vznikají v průběhu téměř všech výrobních procesů, zejména při svařování, tváření a odlévání. Zbytková napětí ovlivňují materiálové vlastnosti, například mez únavy, houževnatost a odolnost proti korozi. Přítomnost zbytkových napětí je nedílnou součástí svařovaných konstrukcí a nelze tomu nijak zabránit. Jejich kombinace s dalšími nežádoucími faktory může vést až k destrukci součástí a konstrukcí. Na druhou stranu mohou být zbytková napětí úmyslně vnášena do součástí, a tím lze zajistit jejich lepší vlastnosti a delší životnost. Jedná se zejména o vyvození tlakových napětí v povrchové vrstvě, čehož lze dosáhnout například při nalisování či kuličkování [1, 2].

Rozdělení zbytkových napětí lze provést z několika hledisek. Nejčastěji používané je dělení dle oblasti působení. Z tohoto pohledu se jedná o tři základní druhy napětí:

- I. druhu – makroskopická.** Vyskytují se v makroskopických oblastech, které jsou v řádech mm, například v obráběných součástech. Vyrovnávají se v makroskopických objemech. Tato napětí vznikají například při makroskopické plastické deformaci, dále při válcování za studena, nebo při kalení vzorku. Předpokládá se, že tato zbytková napětí jsou homogenní [1, 2].
- II. druhu – mikroskopická.** Vznikají a vyrovnávají se v mikroskopických objemech. Vznikají následkem rozdílné teplotní roztažnosti zrn a změny se tedy neprojeví v celém objemu, ale pouze v menších oblastech (několik krystalů). Často se typ II a typ III označují souhrnně jako mikroskopická napětí [3].
- III. druhu – submikroskopická.** Napětí, která se vyskytují v atomárním měřítku v okolí dislokací a hranic zrn. Při porušení rovnováhy tělesa nedojde ke změnám jeho tvaru. Obvykle zahrnují napětí způsobená koherencí na rozhraních a dislokačních napěťových polích [3].

Výsledná hodnota napětí je dána superpozicí všech výše zmíněných druhů.

Další způsoby rozdělení:

- Aktivní – napětí vzniklá v oblasti svaru a jeho bezprostředním okolí
- Reaktivní – vznikají jako reakce na napětí aktivní [4]

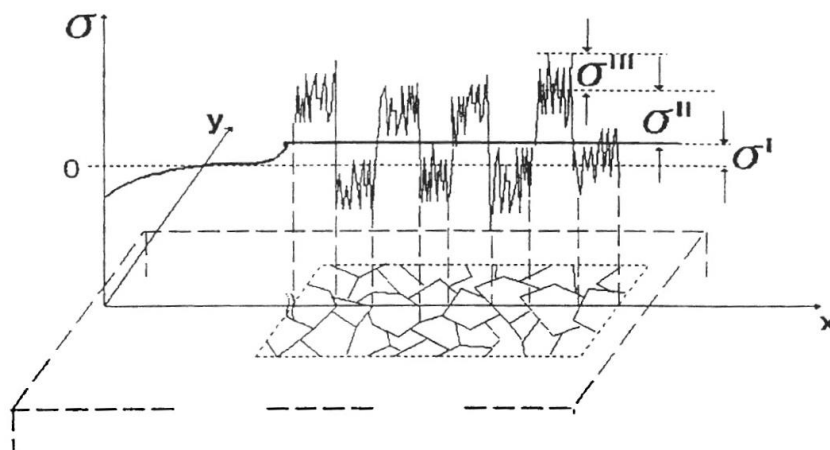
Podle směru působení vzhledem k ose svaru:

- Podélná
- Příčná
- Ve směru tloušťky svařovaného materiálu [4]

Podle doby existence:

- Dočasná – jsou přítomna pouze po dobu působení jejich zdroje
- Zbytková – Jsou přítomna i po skončení působení jejich zdroje [4]

Na *obr. 2.1* jsou zbytková napětí schematicky znázorněna podle jejich délkového měřítka.



**Obr. 2.1** Schematické znázornění rozdělení zbytkových napětí dle délkového měřítka [2]

Při porovnávání podstaty a výsledků z jednotlivých technik využívaných pro stanovení zbytkových napětí je třeba vzít v úvahu vzorkování a rozlišitelnost každé z metod ve vztahu k typu analyzovaných zbytkových napětí. Většina destruktivních metod umožňuje měřit pouze makroskopická napětí [2].

## 2.1.1 Procesy vzniku zbytkových napětí

### Mechanické procesy

Napětí zde vznikají důsledkem výrobních procesů, při kterých dochází k nerovnoměrné plastické deformaci materiálu. Mohou vznikat přirozeně v průběhu výrobního procesu, nebo být do součásti zaneseny záměrně. Hlavním zdrojem vzniku povrchových zbytkových napětí je obrábění. Při obrábění tenkostěnných dílů zbytková napětí způsobují deformaci a

rozměrovou nestabilitu. Zbytková napětí ve velké míře ovlivňují také únavovou životnost. Výzkum ukázal, že obrobené součásti s tlakovým zbytkovým napětím mají vyšší únavovou životnost než neobrobené součásti. Tahová zbytková napětí naopak způsobují únavové trhliny [5, 2].

Dalšími procesy generujícími zbytková napětí jsou např. tváření za studena, lisování, ohýbání, protahování či protlačování.

## **Chemicko-tepelné procesy**

Chemicko-tepelné procesy generují napětí vznikající v důsledku objemových změn spojených s chemicko-tepelnými reakcemi, jako jsou precipitace, sycení povrchu zvolenými prvky, nebo v případě tepelného zpracování v důsledku fázových transformací. Chemické úpravy povrchů a povlakování způsobují značná zbytková napětí, například nitridace způsobuje tlaková zbytková napětí v oblasti difuzní vrstvy. Tato napětí vznikají vlivem rozpínání krystalové mřížky, tedy v důsledku přesycení tuhého roztoku dusíkem. Podobný efekt způsobuje i nauhličování [2].

## **Teplotně-technologické procesy**

Vznik napětí je zapříčiněn nejčastěji nerovnoměrným ohřevem či ochlazováním, což může vést ke vzniku různých teplotních gradientů uvnitř součásti. Tento jev se týká zejména svařování a tepelného zpracování [2]. Při svařování materiálů malých tloušťek zbytková napětí pevnost konstrukce snižují, pokud zbytková napětí potlačí trvalá deformace. U cyklicky namáhaných konstrukcí může dojít k postupnému odbourání zbytkových napětí [4].

### **2.1.2 Napětí vznikající při svařování**

Svařování je spojování 2 a více nejčastěji kovových součástí v jeden nerozebíratelný celek. „Napětí a deformace vznikají v materiálech v průběhu jejich ohřevu a ochlazování vlivem dilatačních změn a metalurgických procesů“ [4]. „Zbytková napětí při svařování dosahují místně vysokých hodnot, srovnatelných s mezí kluzu“ [4]. Dochází zde tedy ke značnému ovlivnění zásob plasticity materiálu.

Při svařování mohou zbytková napětí vznikat dvěma způsoby. Strukturní heterogenitou, nebo nerovnoměrným rozložením plastických deformací.

Lokální ohřev v místě svaru a následné nerovnoměrné ochlazování vedou ke vzniku zbytkových napětí a dále i nežádoucích deformací. Materiál v místě ohřevu expanduje, ale jeho expanze je omezena okolním chladnějším materiálem, což způsobuje vznik elastických deformací. Tepelná napětí dosahují hodnoty meze kluzu, která se se zvyšující teplotou snižuje. V důsledku toho je oblast v místě svaru stlačena a po následném

ochlazení je zplastizovaný objem menší vůči nedeformovanému okolí. Tato oblast tedy vykazuje tahová zbytková napětí a okolní oblast vykazuje zbytková napětí tlaková [6].

Velikost zbytkových napětí ovlivňují teplotně-fyzikální vlastnosti materiálu, jako je lineární a objemová roztažnost a tepelná vodivost. To, jak moc se bude chtít materiál rozpínat, lze stanovit dle vztahu (2.1) [7].

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

kde:

$\Delta l$  – změna délky tyče [m]

$l_0$  – původní délka tyče [m]

$\alpha$  – součinitel teplotní roztažnosti [ $K^{-1}$ ]

$T$  – konečná teplota tyče [K]

$T_0$  – počáteční teplota tyče [K]

Při tuhém upnutí vzorku je zabráněno teplotní dilataci vzorku a vznikající napětí lze popsat za pomoci Hookova zákona vztahem (2.2). Záporné znaménko je použito proto, že ve vzorku vznikají tlaková napětí [4].

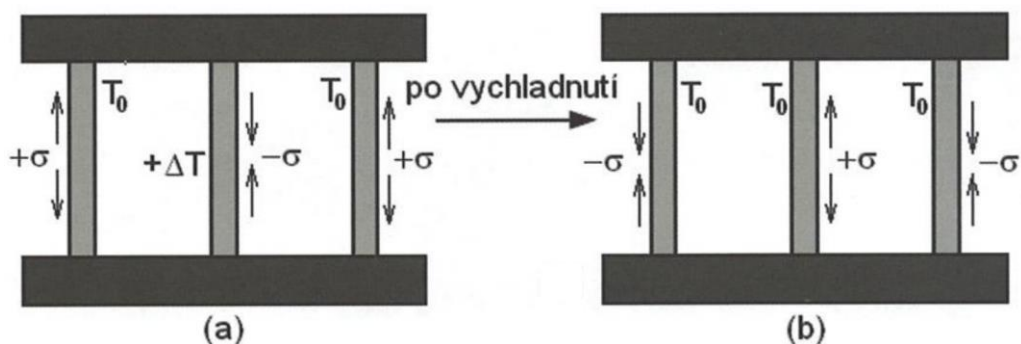
$$\sigma = -\varepsilon \cdot E = -\frac{\Delta l}{l_0} \cdot E = -\alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

kde:

$\sigma$  – napětí ve vzorku [MPa]

$E$  – Youngův modul [MPa]

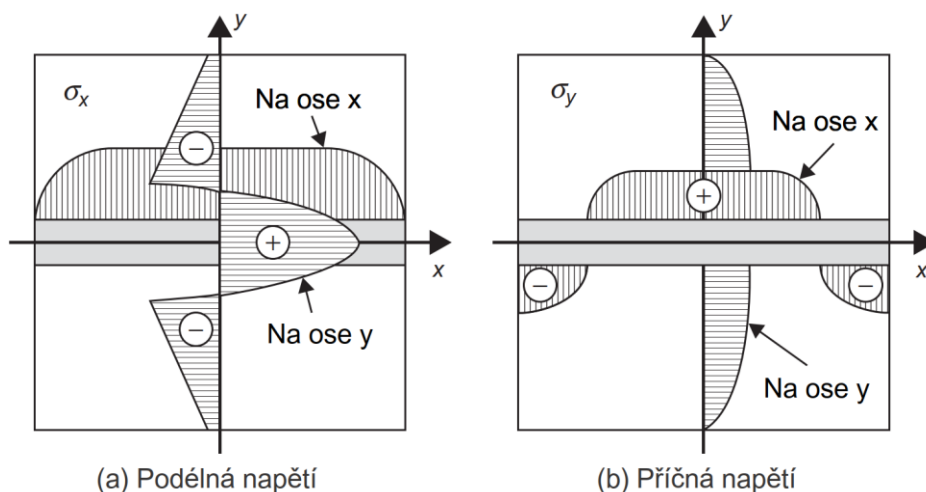
$\varepsilon$  – poměrné prodloužení [-]



**Obr. 2.2** Schematické znázornění vzniku zbytkových napětí [4]

Vznik zbytkových napětí lze jednoduše demonstrovat pomocí schematického obrázku, viz obr. 2.2. Jde o 3 tyče stejného průřezu, umístěné v pevném rámu. Při ohřevu prostřední tyče má daná tyč tendenci se roztahovat. Její teplotní dilataci ale pohltí krajní tyče, ve kterých vznikne tahové zbytkové napětí a v prostřední tyči naopak tlakové. Napětí vzniklé v krajních tyčích při ohřevu je rovno polovině napětí prostřední ohřívané tyče. Krajní tyče tedy zajišťují tuhé upnutí, i když v prostřední tyči už došlo k překročení meze kluzu, a tedy ke vzniku plastické deformace. Při procesu ochlazování se díky plastické deformaci tlaková napětí přemění velice rychle na napětí tahová. V krajních tyčích pak vzniknou napětí tlaková o poloviční velikosti [4].

Na obr. 2.3 jsou znázorněny typické průběhy rozložení podélných a příčných zbytkových napětí vznikajících v tupém svaru.



**Obr. 2.3** Typické rozložení zbytkových napětí v tupém svaru [8]

### 2.1.3 Možnosti snižování zbytkových napětí

Zbytková napětí v součástech jsou ve většině případů nežádoucí a snažíme se je eliminovat na co nejnižší hodnoty. Nejlepší možností je, pokud se povede požadovaný technologický proces optimalizovat tak, že ke vzniku zbytkových napětí bude docházet v co nejmenší míře, respektive hodnota zbytkových napětí bude nízká.

Opatření vedoucí k minimalizaci zbytkových napětí při svařování:

- Vhodně zvolený technologický postup svařování
- Optimalizace konstrukčního řešení svařence
- Tloušťka materiálu (vlastní tuhost svařence)
- Použitá metoda svařování
- Hodnota vneseného tepla na jednotku délky svaru
- Druh, počet a velikost svarů [4]

Existuje řada způsobů, jak snižovat zbytková napětí vznikající při svařování. Nejpoužívanější metodou je žihání na snížení vnitřních pnutí. Dalšími způsoby snižování zbytkových napětí ve svarových spojích jsou mechanické prokování svaru, vibrační stabilizace rozměrů svaru, nebo lokální zatížení ovlivněné oblasti [4]. Stávající zbytková napětí lze také snížit, použitím superpozice, kdy dojde k zatížení oblasti se zbytkovou napjatostí tak, že je lokálně překročena mez kluzu [6].

## **Žihání na snížení zbytkových napětí**

Jde o druh žihání, při němž dochází k pomalému ohřevu materiálu na teplotu blízkou teplotě  $A_{c1}$ , poté následuje výdrž na této teplotě. Doba výdrže činí přibližně 4 min na 1 mm největší tloušťky zpracovávaného dílu. Výdrž na teplotě by ale neměla být kratší než 20 minut. Následuje pomalé ochlazování v peci. Tímto způsobem dojde ke snížení zbytkových napětí jak mikro plastickou deformací, tak i relaxací napětí [4].

## **Mechanické prokování**

Při této metodě se nejčastěji za pomoci kladiva vytváří povrchová i podpovrchová deformace v počáteční fázi ochlazování svaru. Tento postup se využívá při svařování grafitických litin. Prokování svarových housenek výrazně omezí výskyt nežádoucích tahových zbytkových napětí, a snižuje tak náchylnost ke vzniku trhlin [4].

## **Válcování**

Tento proces funguje tak, že se v materiálu vyvolá pozitivní lokální plastická deformace ve směru svařování, která působí proti negativní plastické deformaci vznikající při svařování. Válcování po svařování se obvykle aplikuje na horní část svaru, a to pomocí jednoho válce. Tuto techniku lze použít i se dvěma válci vedle svarové housenky, což bylo použito ke snížení výskytu praskání při tuhnutí [9].

## **Vibrační způsob**

Ke snížení zbytkových napětí dochází vibrováním s několika různými rezonančními frekvencemi při postupném zvyšování frekvence kmitů. Tento proces trvá 10 až 30 minut. Tato metoda je méně využívána v praxi z důvodu její menší účinnosti. Metoda je vhodná pro konstrukce o hmotnosti do 10 tun a není vhodná pro oceli tvářené za studena, měď a její slitiny [4, 8].

## 2.2 Stanovení zbytkových napětí

Zbytková napětí výrazně ovlivňují životnost strojních součástí, proto je velmi důležité jejich stanovení. Pro analýzu zbytkových napětí lze využít širokou škálu metod, které jsou děleny podle účinku na měřený díl a podle místa měření.

- 1) Podle účinku na měřený díl se metody analýzy zbytkových napětí dělí na destruktivní a nedestruktivní.
- 2) Podle míst, v nichž jsou napětí stanovována, se metody dělí na povrchové (XRD a Barkhausenův šum) a objemové (neutronová difrakce a odvrtávací metoda).

**Destruktivní** – Podstatou těchto metod je zkoumání elastických deformací vznikajících při odebrání tenkých vrstev materiálu. Lineární závislost mezi deformací a uvolněným napětím, lze většinou získat analyticky, někdy je ale třeba využít metodu konečných prvků. Jde o univerzální, často používané metody. Obecně jsou destruktivní metody dražší [5].

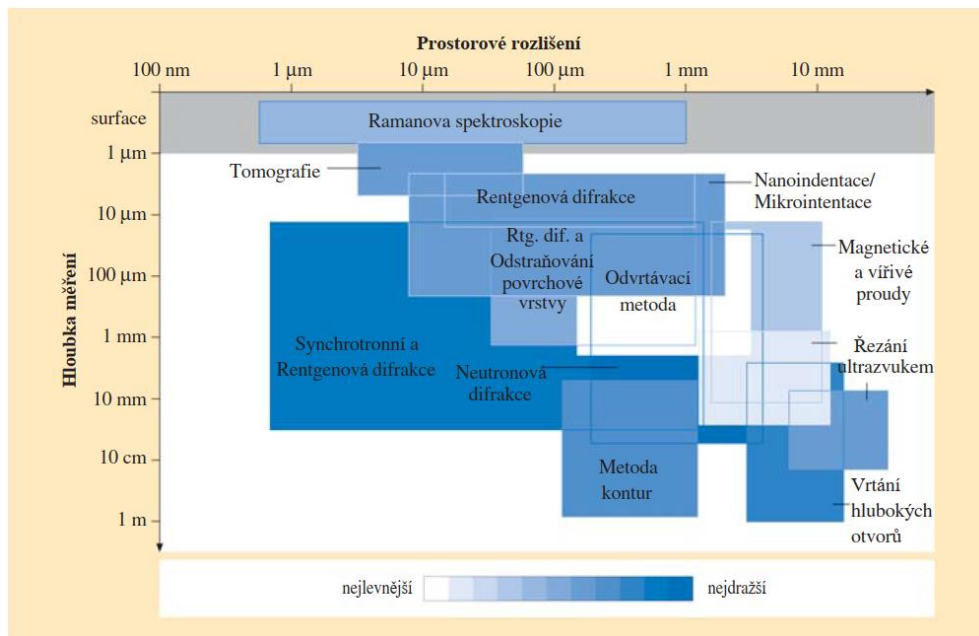
Většina technik odstraňování materiálu (např. vrtání otvorů, odstraňování vrstev) odstraňuje větší objemy materiálu, na kterém se napětí typu II a III zprůměrují na nulu. Lze tedy měřit pouze makroskopická zbytková napětí (typ I) [2].

**Semidestruktivní** – Do této kategorie je často zařazována odvrtávací metoda. Jde o inkrementální odvrtávací metodu, kde dochází k měření deformace vzniklé po odvrtání otvoru do vzorku, přesnost měření je ovlivněna především hloubkou otvoru [11].

**Nedestruktivní** – Tyto metody jsou využívány v případech, kdy je nežádoucí poškození vzorku. Pro měření vyžadují referenční hodnotu zbytkových napětí. Hlavními zástupci jsou rentgenová a neutronová difrakční analýza, dále magnetické či ultrazvukové metody. Difrakční metody jsou velmi citlivé na přípravu povrchu vzorku [11].



Na obr. 2.4 je uvedeno rozdělení metod stanovení zbytkových napětí v závislosti na hloubce měření a rozlišení. Z obrázku je patrné, že destruktivní metody jsou vhodné pro stanovení zbytkových napětí ve větších hloubkách materiálu. Pro stanovení povrchových napětí se používají především difrakční a optické metody.



**Obr. 2.4** Porovnání hloubky měření a rozlišení vybraných metod [11]

## 2.2.1 Destruktivní metody analýzy zbytkových napětí

Podstatou těchto metod je měření deformací vzniklých odebráním materiálu. Tyto metody jsou vhodné pro hodnocení poškození způsobených únavou materiálu. Při použití těchto metod je třeba brát zřetel na vliv plasticity materiálu [12].

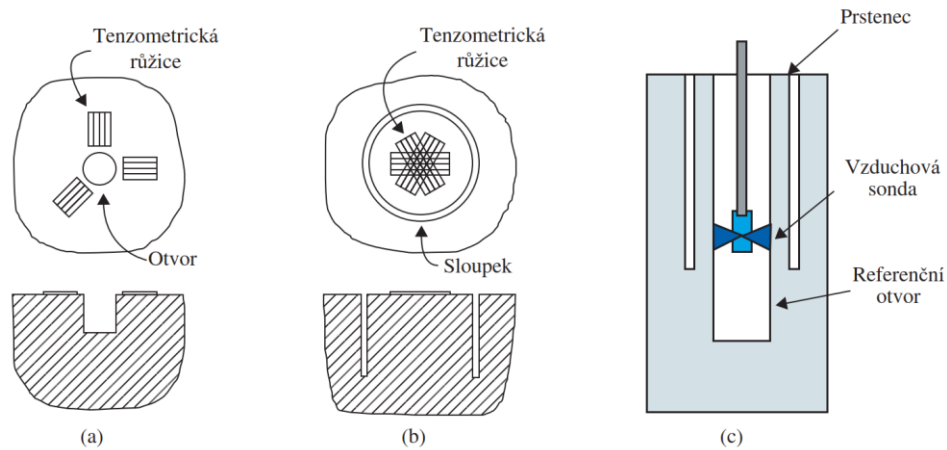
Mezi destruktivní metody patří:

- odvrtávací metody – konvenční odvrtávací metoda, metoda sloupku a odvrtávání hlubokých děr
- metoda odstraňování povrchové vrstvy
- dělicí metoda

Všechny výše uvedené metody budou níže podrobněji popsány.

## Odvrtávací metody

V praxi nejvíce používané odvrtávací metody lze rozdělit na 3 dílčí metody, které jsou zobrazeny na obr. 2.5.

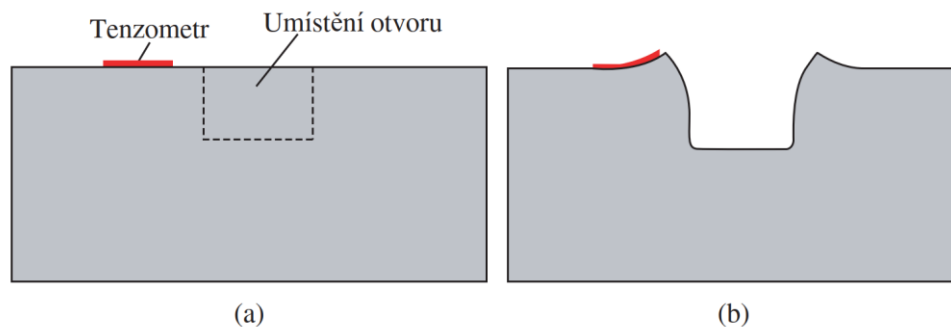


**Obr. 2.5** Schématické znázornění jednotlivých druhů odvrtávací metody  
(a) konvenční odvrtávací metoda, (b) metoda sloupku (c), odvrtání hlubokých děr [11]

### Konvenční odvrtávací metoda

Jedná se o nejpoužívanější destruktivní metodu analýzy zbytkových napětí. Schématické znázornění metody je uvedeno na obr. 2.5 (a). Podstatou metody je odvrtání malého otvoru ve vzorku a měření deformace okolního materiálu vzorku s využitím tenzometrů či optických metod. Poškození vzorku vzniká pouze v oblasti vrtaného otvoru, proto je často tato metoda označována jako semidestruktivní.

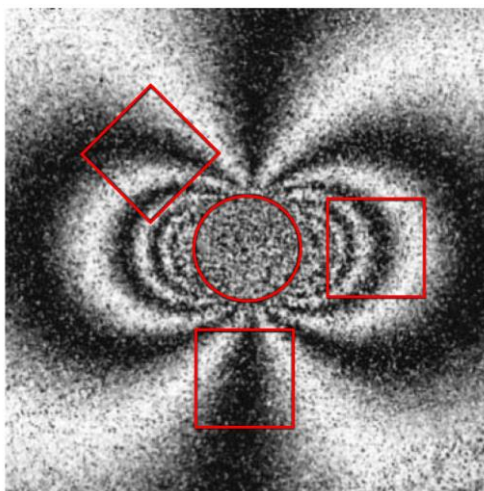
Na obr. 2.6 je znázorněno schéma vzorku obsahujícího zbytková tahová napětí před vrtáním a po odvrtání otvoru. Uvolnění napětí po dokončení operace způsobí pružný zpětný ráz, který mírně rozšíří okraj otvoru a dojde k lokálnímu zvýšení profilu povrchu v důsledku Poissonovy deformace [11].



**Obr. 2.6** Schéma řezu v okolí otvoru u vzorku obsahujícího tahová napětí.  
(a) Před odvrtáním (b) po odvrtání [11]

Jak již bylo zmíněno, pro měření deformací lze použít tenzometry, nebo optické metody. Tenzometry umožňují měření pouze ve třech směrech. Optické snímače poskytují mnohem větší soubor dat, což výrazně zvyšuje přesnost měření. Optické metody však vyžadují speciální podmínky, na rozdíl od tenzometrů, které jsou vhodné i pro použití v terénu. Mezi nepoužívanější optické metody pro získání celoplošných dat patří Moiré interferometrie, holografická interferometrie a digitální obrazové korelace [11].

Na obr. 2.7 je znázorněno porovnání rozsahu měření tenzometrů a celoplošných optických snímačů. Oblast dat získaná za pomoci tenzometrů je vyznačena červeně.



**Obr. 2.7** Porovnání rozsahu měření tenzometrických a optických snímačů [11]

Odvrtávací metoda poskytuje přesné a rychlé vyhodnocení výsledků. Je však třeba při použití této metody brát zřetel na přesnost vrtacího zařízení. Metoda se často využívá pro měření polymerních vzorků, nebo laminátů z kovových vláken [13]. Obecně lze tuto metodu použít pro tvarově členité vzorky a pro vzorky, jejichž tloušťka v analyzovaném průřezu přesahuje 100 mm [5]. Metoda má několik dalších podobných variant, které byly již výše zmíněné – metoda sloupku a vyvrtávání hlubokých děr.

### **Metoda sloupku**

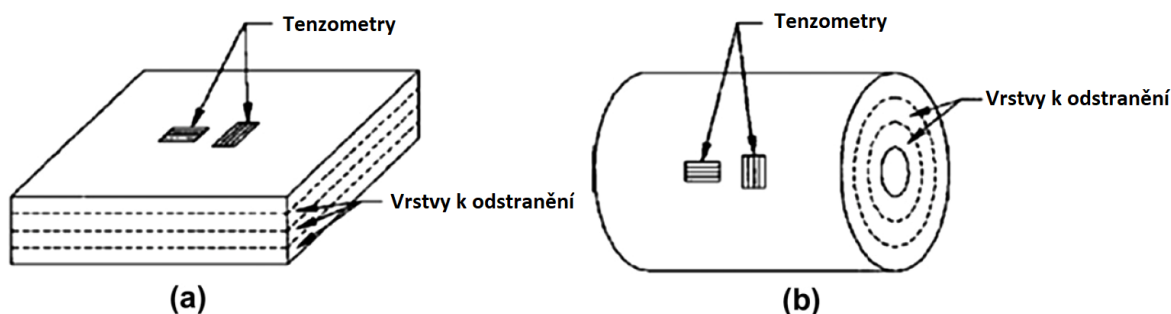
Je další variantou metody odvrtávání hlubokých otvorů. Je to metoda určená pro stanovení povrchových zbytkových napětí, kdy pro určení těchto napětí je nutné změřit deformace vzniklé na povrchu vzniklého „ostrova“. Ostrov vznikne tím, že je vytvořen sloupek, respektive prsteneček, viz obr. 2.5 (b), sloužící pro oddělení měřené oblasti a okolního materiálu. Pro vytvoření sloupku se využívá nejčastěji elektro-erozivní obrábění. Minimální praktický průměr sloupku pro použití tenzometrické růžice je 10 mm a hloubka otvoru musí být alespoň 12 mm [14]. Výhodou této metody oproti předchozí metodě je, že dokáže vytvořit mnohem větší deformace a lze tedy identifikovat větší zbytková napětí.

## Metoda odvrtávání hlubokých otvorů

Princip metody je zobrazen na *obr. 2.5(c)*. Jde o kombinaci klasické odvrtávací metody a metody sloupku. Liší se ale v tom, že měření deformace se provádí uvnitř otvoru, nikoliv na povrchu. Nejprve jsou na vzorek umístěna referenční pouzdra, poté je vytvořen otvor skrze vzorek i pouzdra. Následuje měření průměru otvoru po celé jeho délce. K měření průměru je využita vzduchová sonda, což je tenká tyč, jejíž konec je opatřen dvěma otvory, do kterých je přiveden stlačený vzduch. Změny průměru otvoru při pohybu sondy se projeví změnou tlaku vzduchu. Tyto změny jsou snímačem převedeny na elektrické napětí [15]. Dále jsou měřeny deformace v otvoru vzniklé při vrtání sloupku. Referenční otvor se přeměří opět po celé jeho délce a kolem jeho průměru. Změřené změny průměru otvoru slouží pro stanovení hodnoty zbytkových napětí. Pokud na vzorek nepůsobí žádná vnější zatížení, jsou tato napětí zbytková. Metoda se snaží stanovit rozložení napětí podél osy otvoru a referenčního otvoru [11]. Metoda je vhodná i pro vzorky velkých rozměrů např. odlitky o hmotnostech v řádu tun. Výhodou této metody je i standardizace tenzometrické rozety [5, 10].

## Metoda odstraňování povrchové vrstvy

Metoda spočívá v měření deformací vzniklých postupným odstraňováním vrstev materiálu a je využívána pro měření homogenních izotropních materiálů. Je vhodná pro ploché a válcové vzorky, kde se zbytková napětí mění postupně s hloubkou, ale jsou rovnoběžná s povrchem vzorku [11]. V případě dutého válcového vzorku může měření probíhat na vnitřní i vnější ploše vzorku [16].

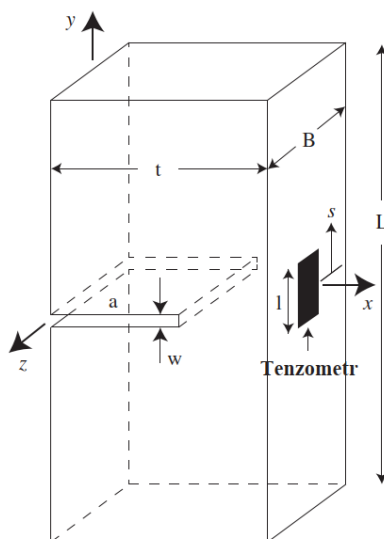


**Obr. 2.8** Schéma metody odstraňování povrchové vrstvy [16]

## Dělicí metoda

Poprvé se tato metoda objevila v roce 1971, běžně používaná je od roku 1987 [17]. Metoda je obdobou vyvrtávací metody, ale namísto kruhového otvoru je zde vytvořena dlouhá drážka [11]. Podstatou metody je tedy vytvoření drážky ve vzorku obsahujícím zbytková napětí. Drážka je vytvořena postupným řezáním a je řezána nejčastěji pomocí elektroerozivní metody, může být ale použita i fréza či tenká pila [10, 5].

Deformace, která vzniká v důsledku uvolnění zbytkových napětí, se měří jako funkce závislosti na rostoucí hloubce drážky a slouží k určení zbytkového napětí. Deformace se měří pomocí tenzometru z kovové fólie a indikátoru napětí můstkového typu. Tenzometry mohou být umístěny na přední, zadní či obou plochách vzorku. Na obr. 2.9 je zobrazena varianta umístění na zadní plochu. Zbytkové napětí se vypočítá z naměřených hodnot pomocí lineárního systému, který se nazývá matice poddajnosti. Ta se získává za pomoci metody konečných prvků [11].



**Obr. 2.9** Princip dělicí metody [11]

Při použití této metody je nutné brát v potaz plasticitu materiálu. Metoda je nejvhodnější pro měření napěťových polí, která se mění v hloubce roviny štěrbiny, ale nemění se v celé šířce roviny štěrbiny. Tato dělicí metoda má potenciální využití tam, kde se strojní součásti vyrábějí metodami nanášení vrstev, jako je navíjení vláken, nebo laserové plátování a je vhodná pro laboratorní účely z důvodu její jednoduchosti a dobré opakovatelnosti. Metoda je také vhodná pro stanovení zbytkových napětí široké škály materiálů, např. kovů, skla, křehkých materiálů a plastů a geometrií, jako jsou bloky, desky, trubky. Výhodou této metody je, že umožňuje vyhodnocení profilu napětí v celé hloubce vzorku. Lze ji ale použít pouze pro stanovení napětí, která leží v normálové rovině k rovině řezu [10, 5].

## 2.2.2 Nedestruktivní metody

Obecně lze říci, že použití těchto metod je nákladnější než použití destruktivních metod. Získané výsledky jsou však přesnější. Do této skupiny metod patří difrakční, magnetické a ultrazvukové metody.

### Barkhausenův šum

Barkhausenův šum neboli magnetická metoda je nedestruktivní metoda pro stanovení zbytkových napětí. Metoda zjišťuje počet náhlých magnetických změn ve vzorku z feromagnetického materiálu, během magnetické reverzace. Tyto změny jsou pozorovány jako pulzy s nepravidelnou amplitudou i periodou. Jak již bylo zmíněno, metoda je použitelná pouze pro feromagnetické materiály, typicky oceli, ale i některé keramické materiály. Rozsah metody je pouze  $\pm 300$  MPa a lze ji použít jen pro tloušťky v řádech milimetrů. Metoda je mnohem rychlejší než rentgenová difrakce [5, 10].

### Měření ultrazvukem

Přítomnost, orientace a velikost zbytkových napětí způsobuje změnu rychlosti ultrazvukových vln procházejících materiálem. Zbytková napětí tedy lze analyzovat na základě rychlosti průchodu vln oblastmi obsahujícími i neobsahujícími zbytková napětí. Ultrazvukové vlny jsou velmi citlivé na strukturní a teplotní změny v materiálu. Nevýhodou této metody je omezení jejího použití pro vzorky s dokonale opracovanými povrchy a také to, že umožňuje získat přesné výsledky až po kalibraci pro daný materiál [11].

### Difrakční metody

Jedná se o nedestruktivní metody měření využívající schopnost elektromagnetického záření. Základním principem všech difrakčních metod je měření vzdálenosti mezi atomárními plochami v krystalické struktuře. Měření se provádí pomocí paprsku, které dopadají na vzorek a následně jsou difraktovány v různých směrech. Úhly mezi vyzářenými paprsky jsou popsány Braggovým zákonem, viz vztah (2.3).

$$n \cdot \lambda = 2 d \cdot \sin \theta \quad (2.3)$$

kde:

$n$  – celočíselný násobek [-]

$\lambda$  – vlnová délka elektromagnetického záření [mm]

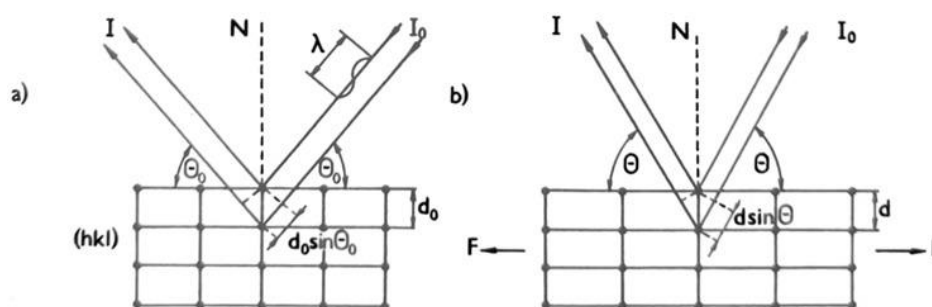
$d$  – vzdálenost mezi difrakčními rovinami [mm]

$\theta$  – Braggův úhel [°]

Paprsek dopadající na vzorek je tvořen buď proudem neutronů, proudem elektronů, nebo rentgenovým zářením záleží, o jakou metodu se jedná. Hlavním zástupcem difrakčních metod je tedy rentgenová difrakční analýza, dále do této kategorie spadá neutronová difrakce, či synchrotronová rentgenová analýza. Tyto metody se liší především v hloubce měření. Neutronovou difrakcí lze měřit až 50 mm pod povrchem vzorku, ale rentgenová difrakční analýza je schopna měřit pouze v povrchové vrstvě, přibližně 1–10  $\mu\text{m}$ . V rámci experimentů v této práci byla využita rentgenová difrakční analýza, a proto ji je věnována pozornost v následující kapitole, kde je podrobněji popsána [11].

## 2.3 Rentgenová difrakční analýza

Rentgenová difrakce je založena na rozptylu rentgenových paprsků v krystalové struktuře materiálu. Podstatou metody je měření změn vzdáleností mezi mřížkovými rovinami, způsobených napětím v krystalických a polykrystalických materiálech. Na obr. 2.10 je zobrazena deformace vzdáleností mřížkových rovin a změna polohy interferenčního maxima. Varianta „a“ je počáteční stav bez napětí, varianta „b“ je zobrazení po deformaci.



**Obr. 2.10** Deformace vzdáleností mřížkových rovin ( $hkl$ ) a změny úhlové polohy interferenčního maxima. (a) stav bez napětí, (b) zdeformovaný stav [18]

Působení mechanického napětí má vliv na mezi rovinnou vzdálenost  $d$  i na úhlovou polohu  $\theta$ .

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

kde:

$\epsilon_m$  – mřížková deformace [-]

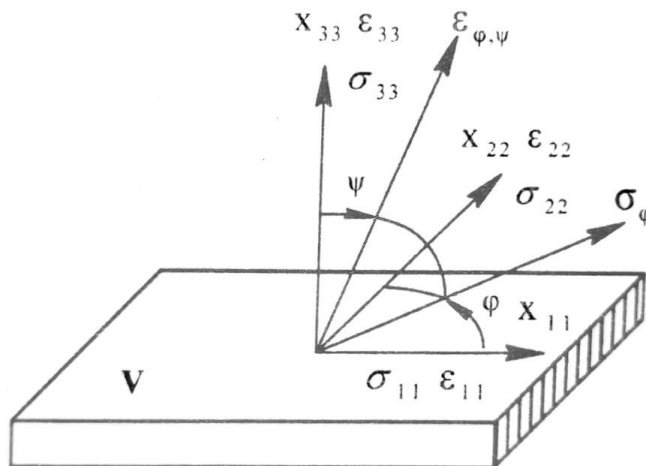
$d$  – vzdálenost mezi sousedními mřížkovými rovinami ve zdeformovaném stavu [mm]

$d_0$  – vzdálenost mezi sousedními mřížkovými rovinami v počátečním stavu [mm]

$\theta_0$  – Braggův úhel v počátečním stavu [°]

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

Pokud je souřadný systém spojen se vzorkem (viz obr. 2.11) a je splněna podmínka lineární teorie plasticity, lze mřížkovou deformaci vyjádřit vztahem (2.5) následovně:



**Obr. 2.11** Systém souřadnic spojený se vzorkem [18]

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

kde:

$E$  – Youngův modul [MPa]

$\nu$  – Poissonovo číslo [-]

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

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

$E$  a  $\nu$  jsou elastické konstanty zkoumaného materiálu. Úhel  $\varphi$  charakterizuje směr měření napětí  $\sigma_{\varphi}$  vzhledem k ose  $x_{11}$ ,  $\psi$  je úhel mezi osou  $x_{33}$  a směrem deformace  $\varepsilon_{\varphi\psi}$ .

Pro stav dvojosé napjatosti, kdy  $\sigma_{13} = 0$  lze vyjádřit  $\sigma_{\varphi}$  vztahem (2.6) takto:

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

Vztah lineární závislosti mezi mřížkovou deformací  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  a  $\sin^2\psi$  popisuje vztah (2.7):

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

Derivací podle  $\sin^2\psi$  získáme směrnici přímky  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  danou vztahem (2.8):

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



S využitím předpokladu, že  $\varepsilon = \varepsilon_{\varphi\psi}$  získáme základní rovnici rentgenografického měření metodou „ $\sin^2\psi$ “, viz vztah (2.9):

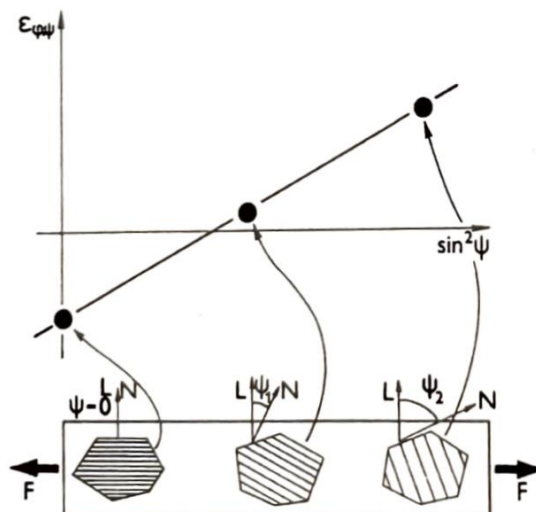
$$\varepsilon_{\varphi\psi} = -\cotg\theta_0 \cdot (\theta - \theta_0) = \frac{\nu + 1}{E} \cdot \sigma_{\varphi} \cdot \sin^2\psi - \frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (2.9)$$

Ze vztahů (2.3) a (2.8) získáme vztah (2.10) pro výpočet složky napětí  $\sigma_{\varphi}$ :

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{\nu + 1} \cdot \cotg\theta_0 \cdot \frac{\partial\theta}{\partial\sin^2\psi} \quad (2.10)$$

„Rentgenografické stanovení složky napětí  $\sigma_{\varphi}$  vyžaduje přesné určení úhlové polohy  $\theta_{\varphi\psi}$  interferenčních linií získaných difrakcí na vhodných systémech atomových mřížkových rovin (hkl) v azimutální rovině  $\varphi = \text{konst}$  při různých hodnotách úhlu  $\psi$ .“ [18]

Princip metody  $\sin^2\psi$  je zobrazen na obr. 2.12.



**Obr. 2.12** Princip měření napětí metodou „ $\sin^2\psi$ “ [18]

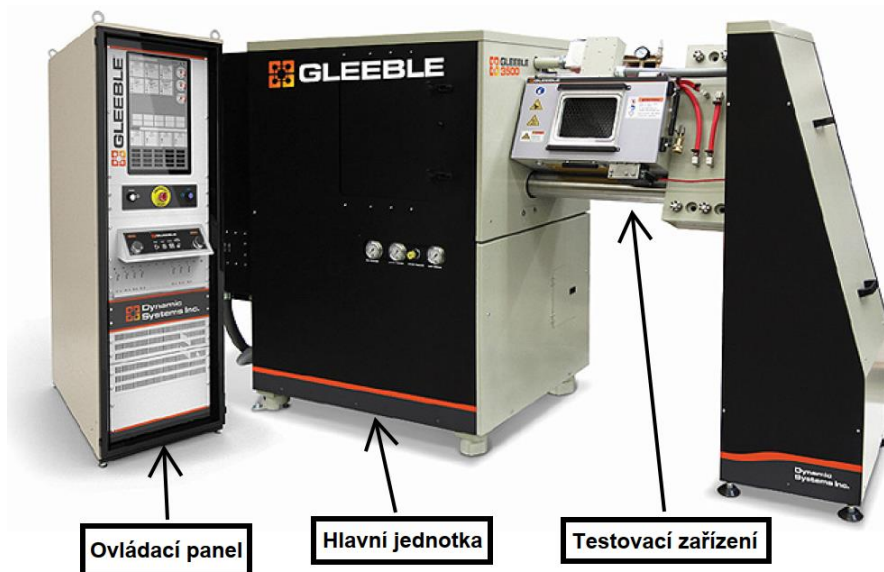
Rentgenová difrakce má několik specifických vlastností. Jde o nedestruktivní metodu, a to za předpokladu, že není odebírána povrchová vrstva vzorku. Po odstranění povrchové vrstvy s využitím leptání, leštění, nebo jemného obrábění lze provést analýzu ve větší hloubce pod povrchem, ale s nutností zavedení korekcí kompenzujících odstraněnou vrstvu materiálu [3].

Metoda umožňuje volbu různých směrů měření mezirovinných vzdáleností a lze stanovit napětí i bez znalosti struktury nenapjatého materiálu. Přesnost této metody klesá s rostoucí velikostí krystalů v materiálu a metodu lze využít pouze pro krystalické či polykrystalické materiály [18]. Nevýhodou této metody je, že tvar vzorku musí být zvolen tak, aby paprsky záření mohly dopadat a odrážet se zpět do snímače bez zasažení jakékoli

překážky [11]. Hlavním nedostatkem rentgenové difrakční analýzy zůstává neschopnost proniknout hluboko do typických krystalických materiálů používaných v průmyslu. Hloubka měření se pohybuje v řádu několika mikrometrů ( $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  mm). Difrakční metoda je tedy vhodná pro analýzu povrchových vrstev či tenkých dílů [11].

## 2.4 Teplotně napěťový simulátor Gleeble

Gleeble 3500 (viz obr. 2.13) je dynamické testovací zařízení umožňující plně integrované testování teplotně mechanických vlastností, stavů materiálů. Jde o tzv. fyzické simulace, tedy provedení experimentu simulujícího reálný proces z výroby v laboratorním měřítku. Fyzickou simulací lze získat data, která nelze získat z virtuálního modelu. Rovněž je fyzická simulace výrazně levnější a rychlejší než testování v reálné výrobě. Lze testovat například nové procesy pro výrobu, simulovat podmínky nových aplikací [19]. Systém Gleeble je tedy vhodný pro testování, popis vlastností nových materiálů a dále pro optimalizaci výrobních procesů. Umožňuje testovat reálné procesy, jako jsou svařovací cykly, tepelné zpracování, tváření a válcování [7].



Obr. 2.13 Teplotně napěťový simulátor Gleeble [19]

### 2.4.1 Ohřev a chlazení vzorků

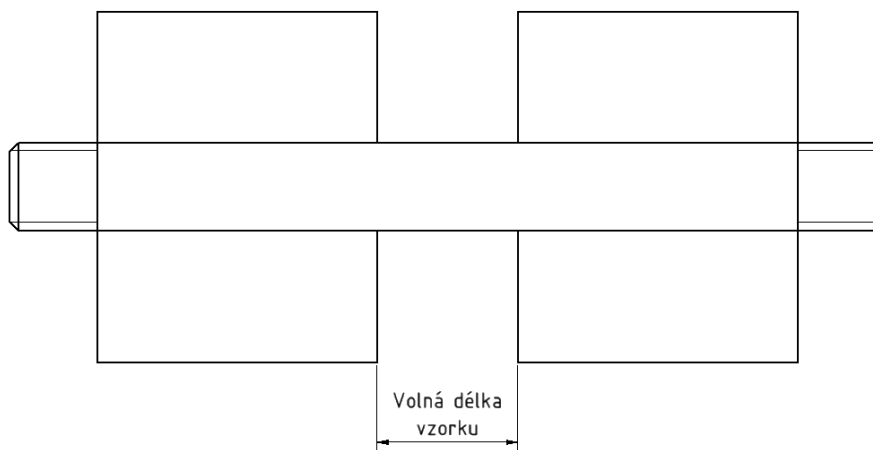
Systém Gleeble pro ohřev vzorků využívá přímý odporový ohřev. Princip ohřevu je založen na střídavém průchodu proudu vzorkem. Proud prochází vzorkem ve velice krátkých periodách a v okamžiku měření teploty je proud zastaven, proto ohřívací proud nemůže ovlivnit přesnost měření. Testovaný vzorek lze ohřívát rychlostí až  $10\,000\text{ °C/s}$  a vzorky malých průřezů je možno chladit rychlostí až  $6000\text{ °C/s}$ . Pro přesné řízení ohřevu a ochlazování je potřebná okamžitá zpětná informace o teplotě vzorku. Pro měření teploty systém Gleeble využívá infračervený pyrometr, nebo termočlánky (typ E, K, S, R, B).

Termočlánky mají mnohem rychlejší odezvu na změnu teploty oproti pyrometrům. Jednotlivé typy termočlánků se liší v jejich provozních rozsazích. Termočlánky jsou na vzorek navařeny a je zde riziko jejich odpadnutí při experimentu, proto je v některých případech vhodné použít pyrometr, který se hodí i v případech, kdy požadované teploty jsou na rozhraní pracovních rozsahů jednotlivých typů termočlánků [7].

System Gleeble udržuje izotermické plochy jednotné při rychlém ohřevu i chlazení, tím jsou zajištěné konstantní výsledky bez ohledu na velikost testovaného vzorku. Čelisti jsou schopny zajistit rovnoměrný ohřev i ochlazování v radiálním i axiálním směru. Chlazení vzorků může být řízené (programované), nebo neřízené (volné). Při neřízeném chlazení je vždy vypnutý transformátor a odvod tepla zajišťují čelisti. Rychlost neřízeného ochlazování ovlivňuje především materiál a tvar čelistí. Při ochlazování lze rovněž využít další média pro zvýšení jeho rychlosti, např. stlačený vzduch, inertní plyn, nebo vodu. Nejúčinnějšího ochlazování lze dosáhnout při použití směsi stlačeného vzduchu a vody [20, 19].

## 2.4.2 Upnutí vzorku

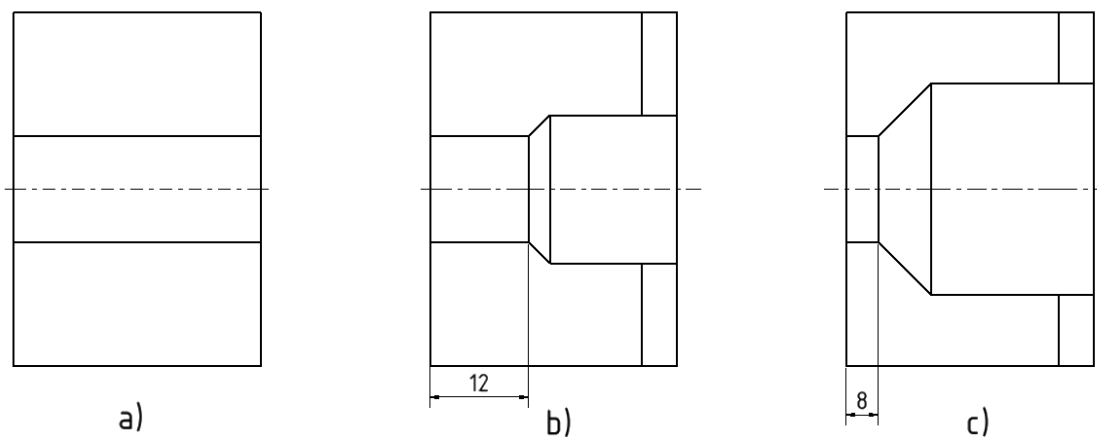
Vzorek je v komoře upnut vysokoteplotními čelistmi a zajištěn maticemi na jeho koncích. Dilataci vzorku zabraňují rozpěrky umístěné v pracovní komoře. Mezi čelistmi vzniká na vzorku tzv. volná délka, viz obr. 2.14.



**Obr. 2.14** Schéma upnutí vzorku čelistmi s plným kontaktem

Teplotní gradient má svou špičku uprostřed vzorku a je ovlivněn především tvarem a materiálem upínacích čelistí. Čím je kratší kontakt mezi čelistmi a vzorkem, tím je teplotní gradient ve vzorku rovnoměrnější. Na obr. 2.15 jsou znázorněny čelisti s plným i částečným kontaktem se vzorkem. Nejčastěji využívaným materiálem pro čelisti je měď, případně austenitická vysokolegovaná ocel, lze však využít téměř jakýkoli materiál [7]. Při volbě materiálu čelistí je nutné zohlednit tato kritéria [7]:

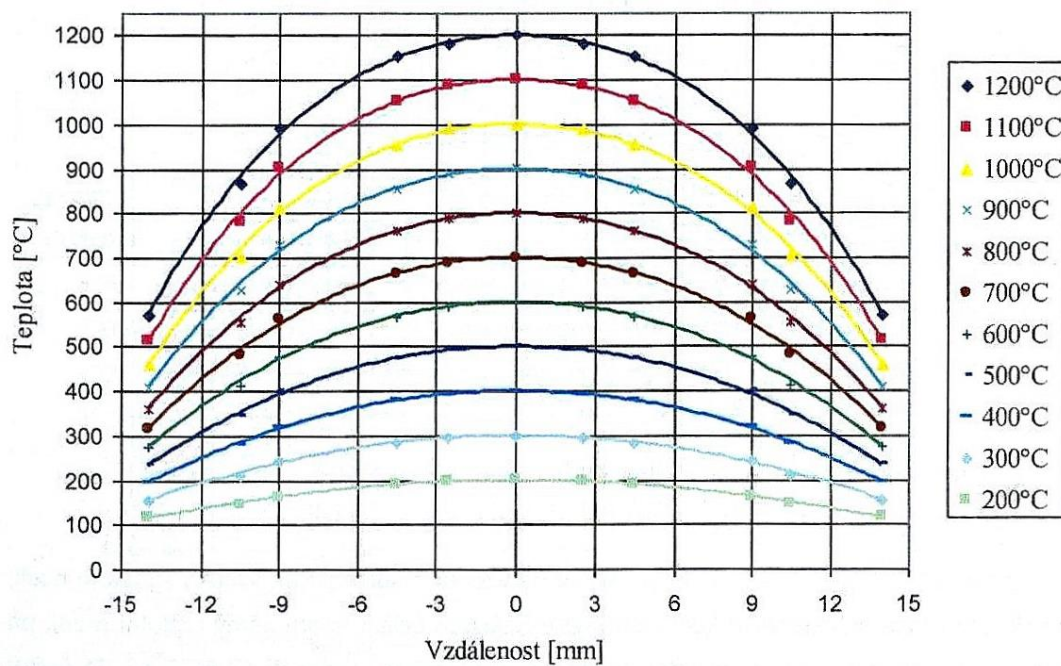
- Maximální teplota, pro kterou budou čelisti použity
- Maximální rychlost ohřevu
- Maximální předpokládaná zatěžující síla
- Geometrie vzorku
- Typ preferovaného teplotního gradientu ve vzorku



**Obr. 2.15** Čelisti pro vzorek kruhového průřezu o průměru 10 mm

a) S plným kontaktem; b, c) S částečným kontaktem [7]

Na obr. 2.16 jsou znázorněny jednotlivé teplotní gradienty pro čelisti s plným kontaktem s postupně zvyšující se teplotou.



**Obr. 2.16** Teplotní gradient na volné délce vzorku za použití čelistí s plným kontaktem pro rozmezí teplot 200 a ž 1200 °C [7]

## 2.5 Analýza zbytkových napětí v austenitických ocelích

Měření zbytkových napětí u tohoto typu ocelí není příliš běžné. Tato kapitola se zabývá rešerší provedených analýz zbytkových napětí v austenitických ocelích. Tyto informace byly dále použity pro tvorbu plánu experimentální části.

Cílem studie Yashara Javadiho [20] bylo vyhodnocení zbytkových napětí vznikajících při svařování plechů z nerezové oceli o tloušťce 10 mm. Testovaným materiálem byla austenitická ocel A240-TP304L ve formě dvou desek o rozměrech 600x250x10 mm. Desky byly jednorůchodově tupě svařeny bez kořenové mezery metodou pod tavidlem (SAW). Pro analýzu zbytkových napětí byla použita odvrtávací metoda, metoda konečných prvků a metoda ultrasonických vln.

S. Murugan et al. [21] se ve své studii zabývali analýzou rozložení teplotního gradientu a zbytkových napětí při víceprůchodovém obloukovém svařování vzorků z austenitické oceli AISI 304. Výsledky byly poté porovnány s nízkouhlíkovou ocelí. Pro analýzu zbytkových napětí byla použita rentgenová difrakční analýza.

P. Vsantharaja et al. [22] analyzovali zbytková napětí a deformace ve svarových spojích oceli AISI 316L, vznikajících při obloukovém svařování a svařování metodou TIG. Hodnoty zbytkových napětí byly také porovnány pro svařování metodami TIG a A-TIG. Pro analýzu zbytkových napětí byly použity odvrtávací a difrakční metody.

Studie M.J. Marquese [23] se zabývala analýzou zbytkových napětí plechů z nízko uhlíkové oceli válcované za tepla a rozměrech 500x500x250 mm, na které byly přivařeny 2 rozdílné vrstvy plechů z austenitické oceli (AISI 309L a AISI 312L). Vzorky byly rozděleny na čtvrtiny a byly podrobeny žíhání ke snížení vnitřních pnutí. Pro analýzu zbytkových napětí byla použita XRD metoda a odvrtávací metoda.

Ivan Nikitin [24] analyzoval uvolňování zbytkových napětí a deformací při ohřevu a izotermickou únavu za zvýšených teplot. Zkoumaným materiálem byla austenitická nerezová ocel AISI 304. Všechny analýzy zbytkových napětí byly provedeny pomocí standardní rentgenové difrakční metody  $\sin^2\psi$  a záření  $\text{Cr K}\alpha$ . Hloubkové profily byly získány postupným elektrolytickým odstraňováním materiálu.

### 3 Experimentální část

Cílem experimentální části práce bylo zjistit vliv teplotně-napěťových cyklů na zbytková napětí u plně austenitické oceli a dále posouzení vlivu tepelného zpracování na možné snížení vzniklých napětí. Teplotní cykly odpovídající průběhu svařování, byly aplikovány za pomoci přístroje Gleeble 3500 na testované vzorky z oceli 1.4301. Zbytková napětí byla analyzována pomocí rentgenové difrakce. Ke snížení zbytkové napjatosti ve vzorcích bylo využito žíhání ve vakuové peci.

Průběh experimentu byl sestaven dle zadání bakalářské práce a dle provedené rešerše následovně:

- 1) Měření chemického složení a stanovení mechanických vlastností materiálu.
- 2) Analýza zbytkových napětí základního materiálu, volba způsobu jejich snížení.
- 3) Aplikace teplotních cyklů v přístroji Gleeble 3500 s maximální teplotou 1350 °C.
- 4) Analýza zbytkových napětí po aplikaci teplotních cyklů.
- 5) Posouzení vlivu žíhání na velikost zbytkových napětí ve zkušebních vzorcích.

#### 3.1 Stanovení materiálových vlastností oceli 1.4301

Materiál použitý pro experiment byla ocel 1.4301 též označována jako X5CrNi 18-10. Jde o austenitickou, chrom-niklovou, ušlechtilou ocel se sníženým obsahem uhlíku. Vyniká svou odolností proti korozi v běžném prostředí bez chloridů a kyselin. Tato ocel je vhodná k tváření za studena, dále je velmi dobře svařitelná a je nemagnetická. Jedná se o nejvíce rozšířenou korozivzdornou ocel na trhu. Používá se především v potravinářském a farmaceutickém průmyslu.

##### 3.1.1 Chemické složení

Chemické složení bylo měřeno pomocí ručního rentgenového analyzátoru DELTA PROFESSIONAL od firmy BAS Rudice na dvou protilehlých stranách vzorku. Výsledky měření jsou uvedeny v *tab. 3.1* a pro porovnání je také v tabulce uvedeno chemické složení dle normy ČSN EN 10088-1.

**Tab. 3.1** Chemické složení oceli 1.4301

Prvek [hm. %]	Si	S	Cr	Mn	Ni	C
ČSN EN 10088-1 [25]	≤ 1	≤ 0,015	17-19,5	≤ 2	8-10,5	≤ 0,07
strana 1	0,22	0,016	18,17	1,69	8,13	-
strana 2	0,23	0,038	18,38	1,66	8,1	-

### 3.1.2 Mechanické vlastnosti

Pro zjištění mechanických vlastností ( $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A_g$  a  $A_{80}$ ) byla použita statická zkouška tahem, která byla zrealizována na zkušebním zařízení TIRA Test 2300. Výsledky jsou uvedeny v tab. 3.2, ale neodpovídají normovaným hodnotám. To může být způsobeno např. válcováním, při kterém došlo ke vzniku textury, což je mezistupeň uspořádání krystalitů neboli stav mezi polykrystalickým a monokrystalickým charakterem pevné látky. Mechanické vlastnosti byly měřeny jak pro dodaný materiál, tak pro stav vyžíhaný ve vakuové peci při 600 °C po dobu dvou hodin. Zkoušky byly realizovány při teplotě okolí.

**Tab. 3.2** Mechanické vlastnosti vzorků [26]

Základní materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{80}$ [%]
Vzorek 1	800,81	852,51	3,38	23,23
Vzorek 2	804,51	851,83	2,89	22,43
Vzorek 3	802,35	852,21	3,12	22,35
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>802,56 ± 1,52</b>	<b>852,18 ± 0,29</b>	<b>3,13 ± 0,20</b>	<b>22,67 ± 0,40</b>
600 °C_2 hodiny	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{80}$ [%]
Vzorek 1	715,60	844,46	14,49	27,64
Vzorek 2	718,18	846,25	13,98	27,34
Vzorek 3	717,11	845,32	13,10	27,42
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>716,96 ± 1,06</b>	<b>845,34 ± 0,73</b>	<b>13,86 ± 0,57</b>	<b>27,47 ± 0,13</b>
H <sup>3</sup> - (1), (2), (17)	210	520-720	–	45
ČSN EN 10263-5	–	Max 780	–	–

*Pozn. H<sup>3</sup> platí pro hodnoty mech. vlastností pásů válcovaných za tepla – stav po žíhání*

*(1): 10088-1,-2, -3; (2): 10028-7; (17): 10088-4,-5*

*ČSN 10263-5 [27] platí pro materiál v základním stavu*

### 3.2 Příprava vzorků

Jednotlivé vzorky (viz obr. 3.1), navržené pro aplikaci teplotních cyklů v simulátoru Gleeble 3500, byly vyrobeny z dodaného polotovaru, jímž byl válcovaný čtyřhranný profil o rozměrech 12x12 mm. Z profilu byly nařezány jednotlivé polotovary o délce 102 mm. Čtvercový průřez vzorku byl zvolen proto, aby se při rentgenové difrakci nemusela zavádět kompenzace tvaru povrchu. Ta by v případě válcové plochy měla vliv na přesnost měření. Na koncích vzorků byly vyrobeny závity M10, potřebné pro uchycení vzorků v pracovní komoře simulátoru Gleeble.



**Obr. 3.1** Připravené vzorky

Při obrábění dochází v povrchové vrstvě k pružně-plastické deformaci, což generuje zbytková napětí, která je však nutné eliminovat. Nejprve bylo ale nutné jejich stanovení a k tomu byla použita rentgenová difrakce. Pro jejich následné snížení připadaly v úvahu dvě metody. První uvažovanou metodou bylo elektrolytické odleptání povrchové vrstvy. To ale nakonec nebylo použito, protože leptání není rovnoměrné a odleptaná oblast má délku přibližně 20 mm a pro následnou rentgenovou difrakci byla uvažovaná délka 32 mm z důvodu rozvržení měřících bodů. Pro eliminaci zbytkových napětí bylo tedy použito žíhání ve vakuové peci. Teplota a doba výdrže byly zvoleny na základě předchozích zkušeností a po zkušebních ověřovacích experimentech.

### 3.3 Stanovení zbytkových napětí

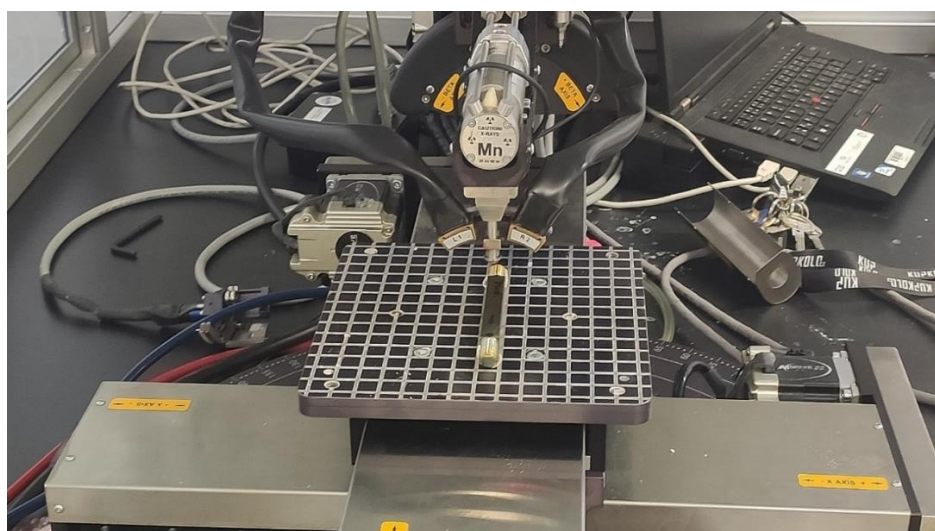
Po dokončení přípravy vzorků bylo dalším krokem stanovení hodnot zbytkových napětí v povrchové vrstvě, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole. Pro analýzu byla využita rentgenová difrakční analýza na přístroji Proto iXRD Combo a k vyhodnocení byl použit software XRD Win 2000. Testovaným materiálem byla austenitická ocel, proto byla použita manganová rentgenka. Pro přepočítání deformací na napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty  $S_1 = -1,20 \text{ TPa}^{-1}$  a  $\frac{1}{2} S_2 = 7,179 \text{ TPa}^{-1}$ . Hodnota difrakčního úhlu rovin  $\{311\}$   $\gamma$ -Fe materiálu v nezdeformovaném stavu  $152,80^\circ 2\theta$ . Tyto hodnoty byly použity z databáze softwaru XDR Win2000. Difrakční úhly byly určeny aproximací Gaussovou funkcí, metodou Absolute Peak. Algoritmus výpočtu zbytkových napětí byl  $\sin^2\psi$ . Parametry měření jsou uvedeny v *tab. 3.3*.



**Tab. 3.3** Parametry měření

Materiál rentgenky	Mangan
Doba expozice	1 s
Kolimátor	Ø 1 mm
Oscilace rentgenky	±5°
Počet náklonů úhlu $\beta$	11
Počet opakování expozice pro každé měřené difrakční maximum	15

S testovanými vzorky je při měření nutno zacházet velmi opatrně. Samotná analýza zbytkových napětí probíhá v povrchové vrstvě vzorku v hloubce několika mikrometrů, tudíž případný pád vzorku by výrazně ovlivnil výsledky měření. Vzorek byl umístěn na pracovní desku stroje a z důvodu oscilace celého stolu v průběhu měření, byla pro zajištění stálé polohy vzorku použita plastelína zamezující pohybu vzorku, viz obr. 3.2.



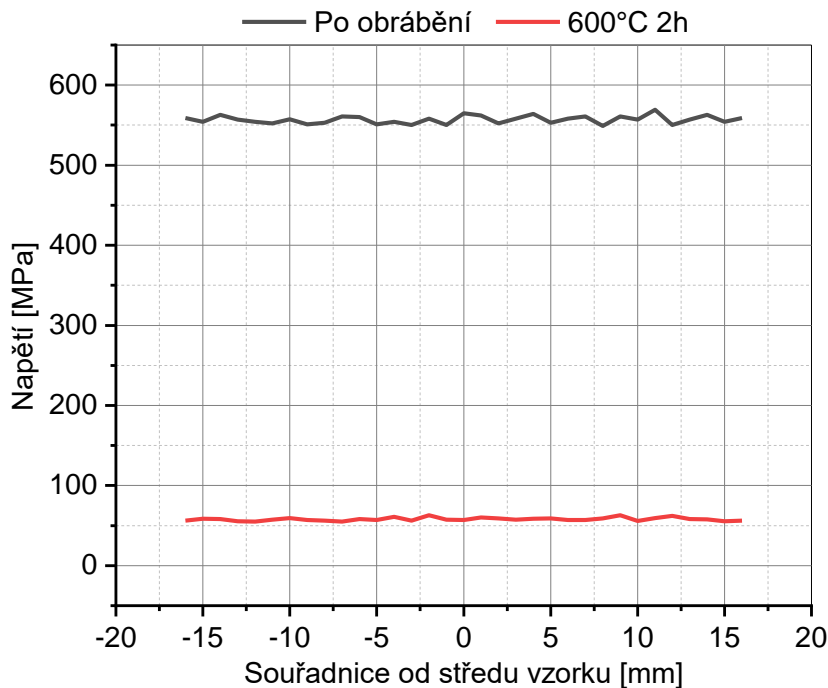
**Obr. 3.2** Umístění vzorku při měření zbytkových napětí

Schéma způsobu provedení analýzy vzhledem ke geometrii vzorku je zobrazeno na obr. 3.3.



**Obr. 3.3** Schéma analýzy

Na obr. 3.4 jsou v grafu uvedeny zjištěné průběhy napětí v základním obrobeném materiálu a ve vyžíhaném vzorku. Z grafu je zřejmé, že po obrábění byla v materiálu zbytková tahová napětí cca 550 MPa. Po tepelném zpracování vzorků hodnoty zbytkových napětí výrazně snížily, přibližně na 50 MPa. Tepelné zpracování bylo realizováno ve vakuové peci při teplotě 600 °C s dobou výdrže v délce 2 hodin. Tyto parametry byly optimalizovány na základě zkoušek s různými teplotami žíhání (450, 500, 550, 600 a 650 °C po dobu dvou hodin) a pozorování postupného snižování hodnot zbytkových napětí.

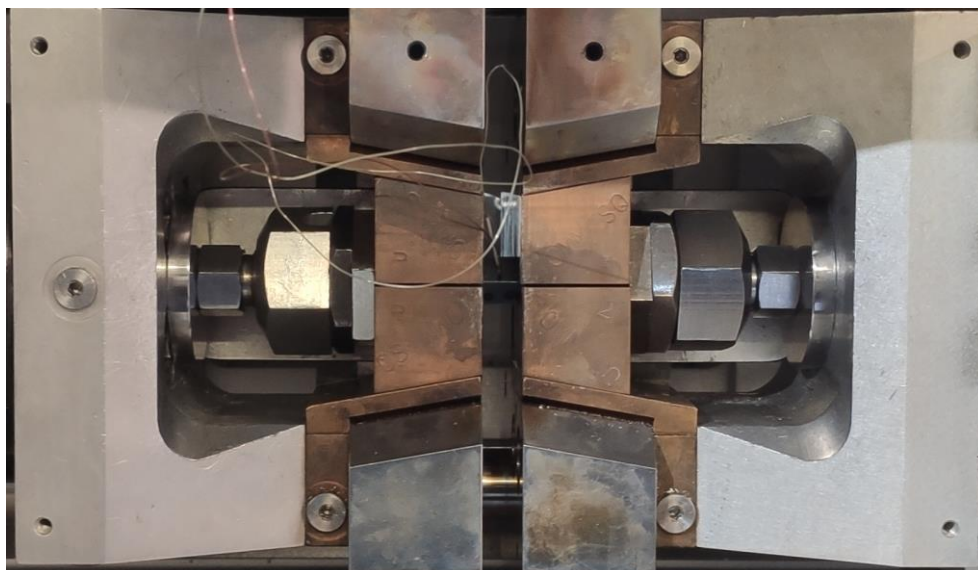


**Obr. 3.4** Zbytková napětí v základním a vyžíhaném materiálu

### 3.4 Aplikace teplotních cyklů

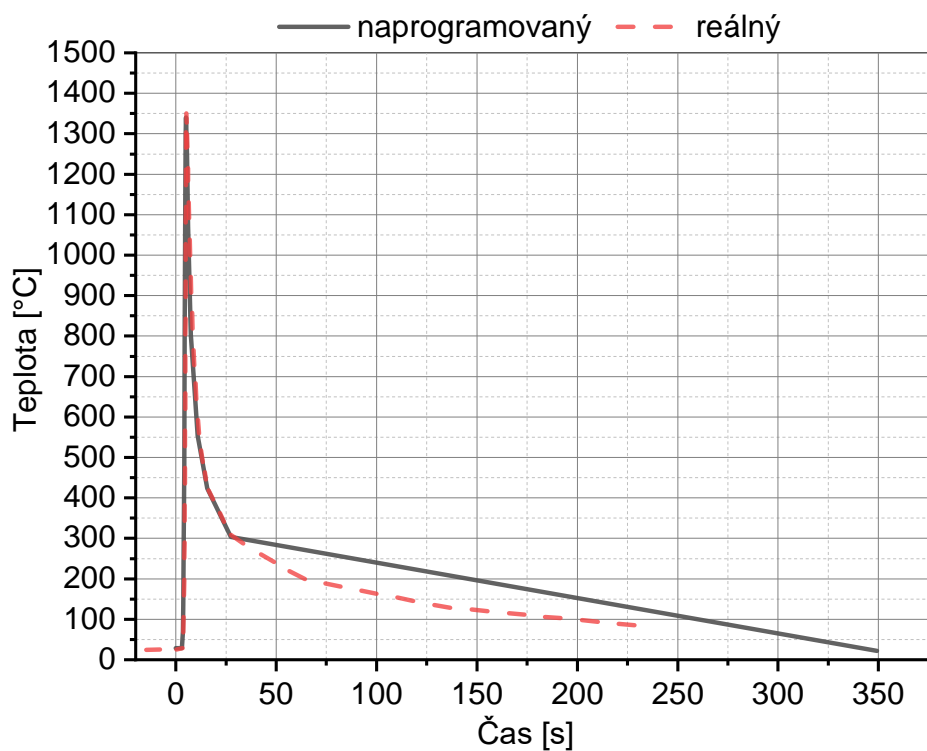
Vzorky se sníženou úrovní zbytkových napětí mohly být použity k aplikaci teplotních cyklů v teplotně napěťovém simulátoru Gleeble 3500. Před samotným teplotním cyklem bylo nutné na vzorky přivařit termočlánky, které zde sloužily k řízení teploty ohřevu. Pro experiment byly zvoleny termočlánky typu K a ty byly pomocí kondenzátorové svářečky přivařeny do středu vzorku, a to z důvodu vznikajících teplotních gradientů. Následně byly na každý konec vzorku našroubovány dvě matice, které sloužily pro upnutí vzorku v pracovní komoře simulátoru Gleeble tak, aby byl zamezen pohyb vzorku při působení tahových i tlakových napětí. Poté byl vzorek vložen do měděných čelistí, které sloužily jak pro upevnění, tak pro vytvoření teplotního gradientu ve vzorku.

Tím vznikla volná délka vzorku o délce 10 mm, jejíž malý rozměr je nezbytný pro dostatečně rychlé ochlazování vzorku odpovídající reálnému svařovacímu cyklu. Vzorek i s čelistmi byl vložen do pracovní komory simulátoru Gleeble, viz obr. 3.5.

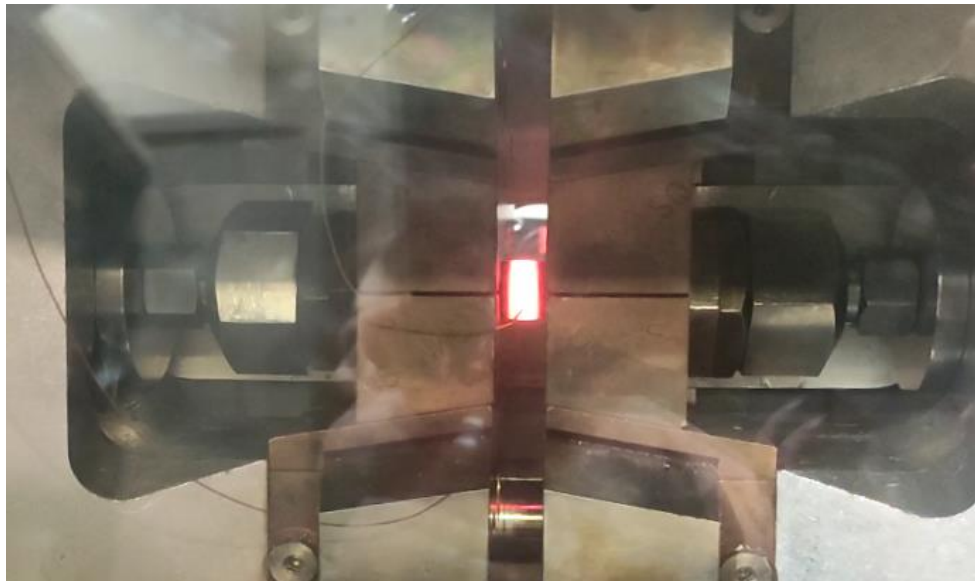


**Obr. 3.5** Připravená sestava k měření

Po uzavření komory bylo zahájeno vakuování na hodnotu  $4 \cdot 10^{-3}$  Torr. Po dosažení vakua lze spustit teplotní cyklus. Simulovaný teplotní cyklus vycházející z reálného svařování metodou TIG, byl vytvořen v programu QuickSim2, ve kterém lze přesně definovat rychlosti ohřevu a chlazení v průběhu času. Maximální teplota použitého cyklu byla  $1360\text{ }^{\circ}\text{C}$ , průměrná rychlost ohřevu byla cca  $900\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ . Průběhy naprogramovaného a reálně změřeného teplotního cyklu jsou uvedeny na obr. 3.6. Průběh experimentu v simulátoru Gleeble je zobrazen na obr. 3.7.

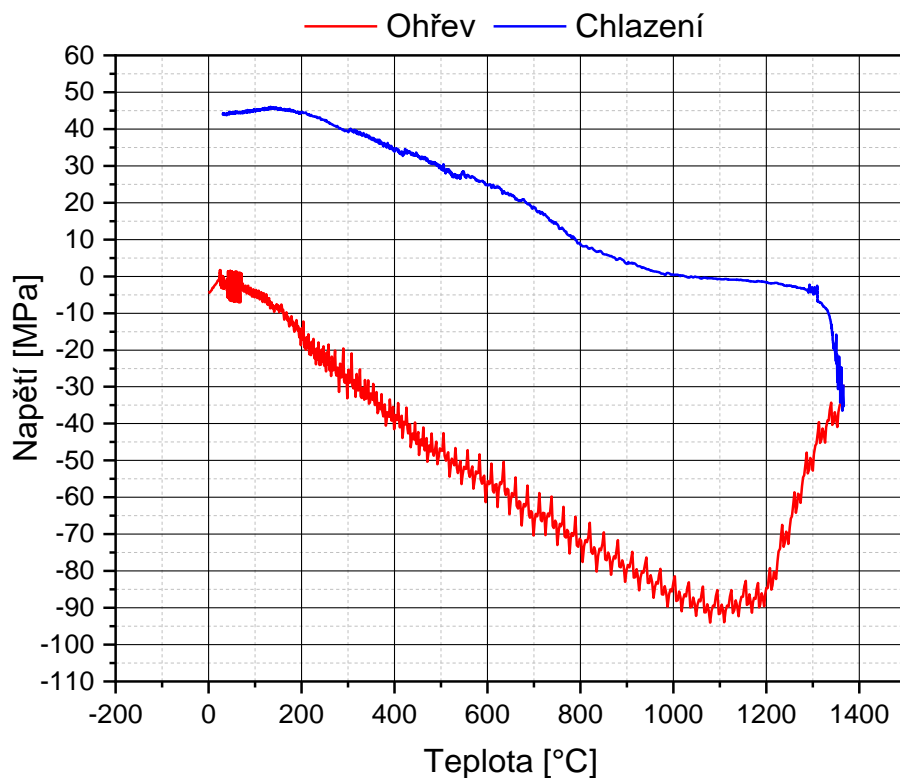


**Obr. 3.6** Průběhy teplotních cyklů



**Obr. 3.7** Aplikace teplotního cyklu na vzorek

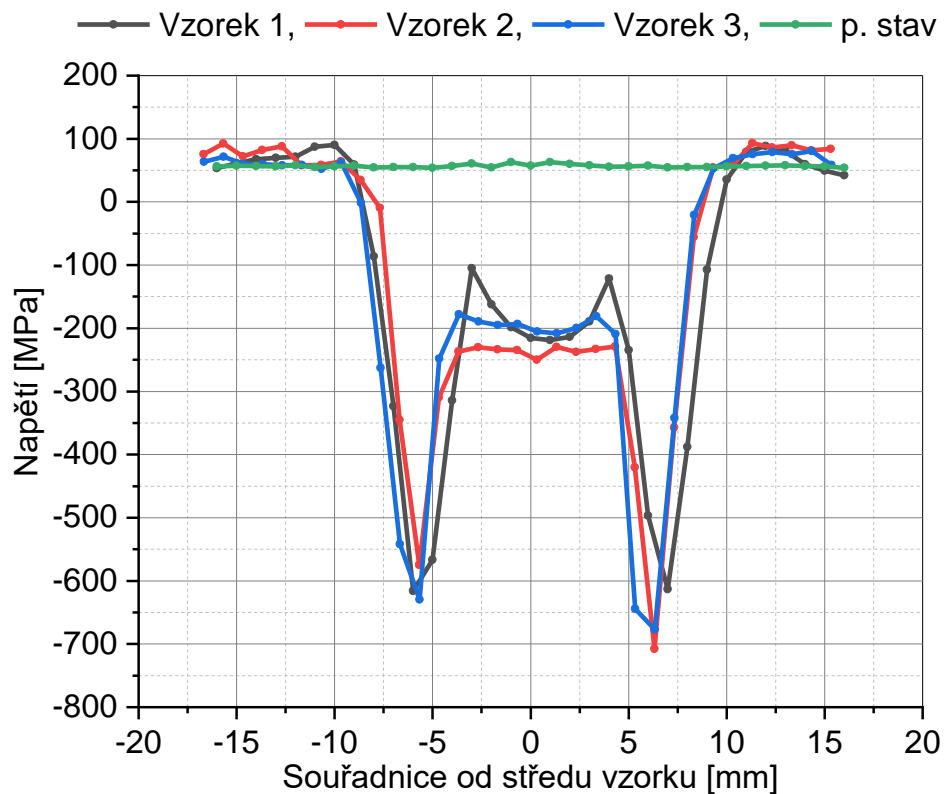
Dále bylo třeba správně zvolit okrajové podmínky týkající se tuhosti upnutí. Jelikož austenitické oceli mají oproti běžným konstrukčním ocelím nižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti a vyšší hodnoty součinitele lineární teplotní roztažnosti, je třeba při svařování počítat s velkými deformacemi, a proto se tyto oceli zpravidla svařují s dostatečně tuhým upnutím. Z toho důvodu byl celý teplotně-napěťový cyklus řízen pomocí průtahoměru, na kterém byla nastavena podmínka nulového pohybu vzorku. Jednalo se tak o tuhé upnutí, kdy jsou čelisti po celou dobu zafixovány v jedné poloze, a vzorek nemůže dilatovat. Při nulové dilataci vzorku vznikají napětí, která jsou kompenzována elastickou a po překročení hodnoty meze kluzu při příslušné teplotě, také plastickou deformací. Na obr. 3.8 je znázorněn průběh napětí v závislosti na teplotě při aplikaci teplotního cyklu v simulátoru Gleeble 3500. Hodnoty napětí odpovídají celému vzorku na rozdíl od rentgenové difrakce, kde jsou měřeny určité body vzorku.



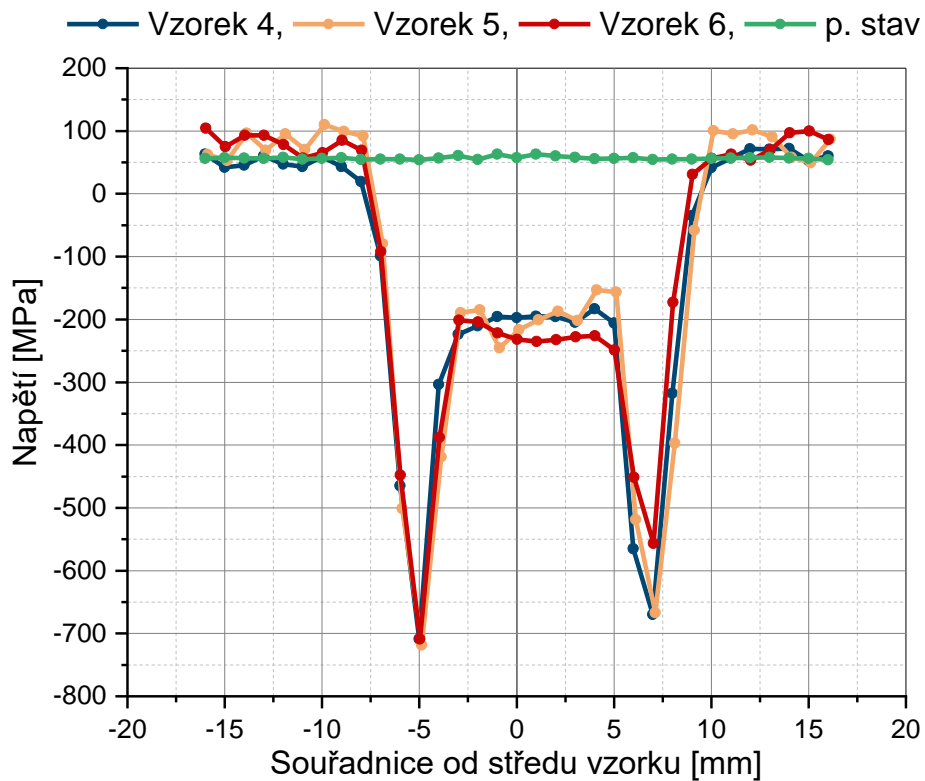
**Obr. 3.8** Průběh napětí v celém vzorku při aplikaci teplotního cyklu

### 3.5 Stanovení zbytkových napětí po aplikaci teplotních cyklů

Další částí experimentu byla analýza zbytkových napětí po aplikaci teplotních cyklů a následné posouzení vlivu žíhání na velikost zbytkových napětí. K měření byla opět použita rentgenová difrakční analýza na přístroji iXRD combo s manganovou rentgenkou. Nejprve byla tedy provedena analýza napětí vzniklých po aplikaci teplotního cyklu. Měřeno bylo celkem 6 vzorků a to z důvodu posouzení opakovatelnosti měření. Na každém vzorku byla vytvořena mapa s body rozmístěnými po 1 mm od středu vzorku na obě strany, a to do vzdálenosti 16 mm. Vzorky byly měřeny po trojicích, protože software XRD Win 2000 může uložit maximálně 100 bodů. V průběhu aplikace teplotního cyklu došlo k deformaci vzorku v tepelně ovlivněné oblasti. Z tohoto důvodu bylo nutné při tvorbě mapy bodů korigovat souřadnice v ose „z“, po vytvoření mapy. Na *obr. 3.9* a *obr. 3.10* jsou znázorněny průběhy zbytkových napětí u vzorků 1 až 3, respektive 4 až 6, po aplikaci teplotního cyklu.

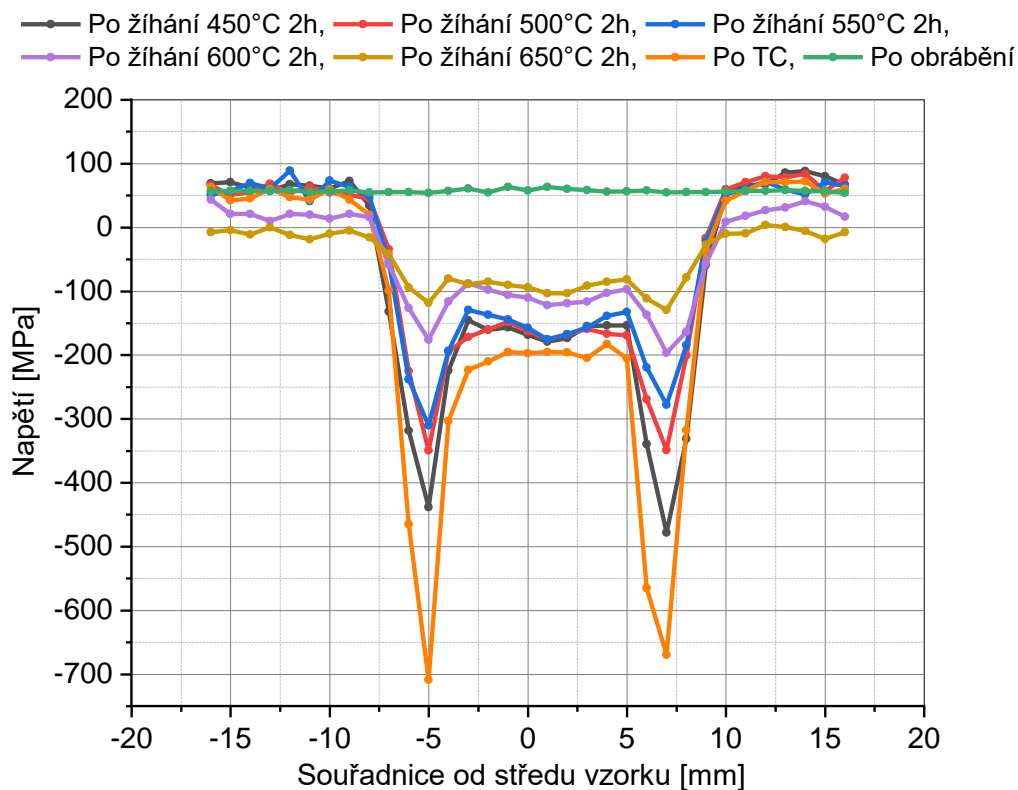


**Obr. 3.9** Průběh zbytkových napětí vzorků 1 až 3 po TC



**Obr. 3.10** Průběh zbytkových napětí vzorků 4 až 6 po TC

Další částí experimentu bylo již zmíněné posouzení vlivu žíhání na velikost zbytkových napětí způsobených teplotním cyklem. Jednotlivé vzorky byly žíhány za teplot 450, 500, 550, 600, 650 °C, vždy s výdrží o délce 2 hodiny. Výsledná zbytková napětí byla opět analyzována pomocí rentgenové difrakce s využitím stejného postupu, jako tomu bylo u měření po aplikaci teplotního cyklu. Průběhy zjištěných zbytkových napětí jsou zobrazeny na obr. 3.11. Z důvodu velké časové náročnosti byl měřen jeden vzorek pro každou teplotu žíhání.



**Obr. 3.11** Průběh zbytkových napětí po žíhání

## 4 Diskuze výsledků

Cílem experimentální části této práce bylo stanovení vlivu aplikace teplotních cyklů na velikost a tvar zbytkových napětí u vzorků z austenitické oceli a dále pak zjištění možnosti jejich snížení za pomoci žíhání. Nejprve byly stanoveny mechanické vlastnosti a reálné chemické složení materiálu 1.4301. Dále byla v první části experimentu analyzována zbytková napětí vzniklá při obrábění vzorků a byla zvolena vhodná teplota žíhání ve vakuové peci k jejich eliminaci. Vzorky byly podrobeny žíhání na snížení zbytkových napětí při teplotě 600 °C po dobu 2 hodin. Z výsledků je patrné, že po obrábění se v povrchové vrstvě vzorku vyskytovala tahová zbytková napětí o velikosti cca 550 MPa. Po aplikaci tepelného zpracování tato napětí významně poklesla přibližně k hodnotám 50 MPa, což bylo výchozí hladinou zbytkových napětí.

Po vyhodnocení vlivu žíhání na snížení zbytkových napětí po obrábění byl v teplotně napěťovém simulátoru Gleeble na vzorky aplikován teplotní cyklus s maximální teplotou 1360 °C, odpovídající skutečnému svařování metodou TIG. Byly také stanoveny jednoznačné okrajové podmínky experimentu tak, aby byla zaručena opakovatelnost experimentů. Následovalo stanovení zbytkových napětí po aplikaci teplotního cyklu. Ze získaných výsledků (*obr. 3.9* a *obr. 3.10*) analýzy zbytkových napětí u šesti vzorků byla posouzena opakovatelnost měření. Průběhy zbytkových napětí ve všech vzorcích vyšly velmi podobné, a to jak z hlediska velikosti zbytkových napětí, tak z hlediska jejich tvaru. Měření potvrdilo správnost návrhu experimentu, a tedy i opakovatelnost. Tímto došlo zejména k časové úspoře, protože tepelné zpracování vzorků i analýza zbytkových napětí jsou procesy s vysokou časovou náročností. Z *obr. 3.9* a *obr. 3.10* je patrné, že teplotní cykly aplikované na vzorky způsobují zbytková napětí, která dosahovala hranice až 700 MPa v tlaku. Tahová napětí se pohybují v úrovni zbytkových napětí v původním vzorku.

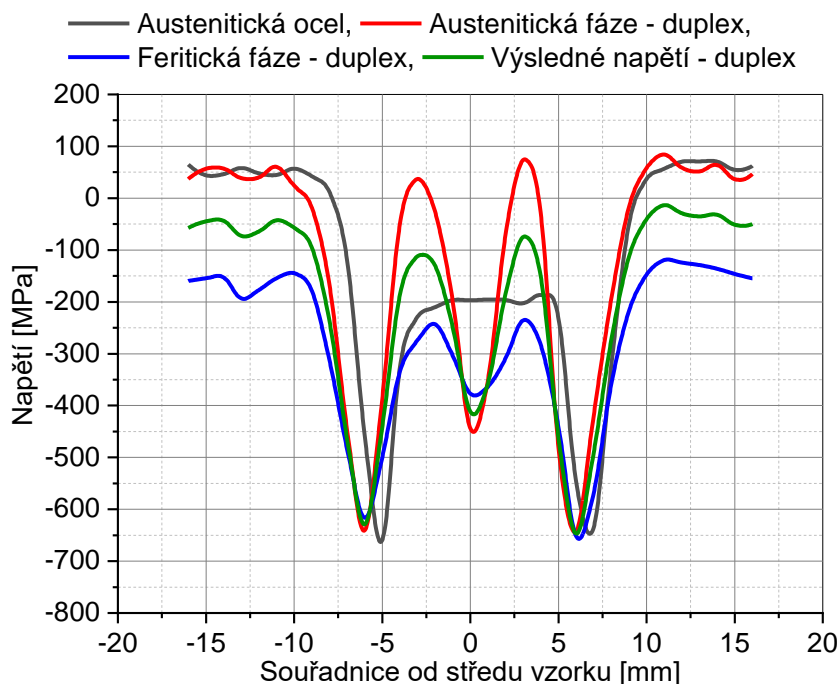
Naměřené průběhy zbytkových napětí odpovídají svým tvarem a rozložením předpokladům o průběhu příčných napětí ve svarovém spoji. Obecně jsou u svarových spojů konstrukčních ocelí ve větších vzdálenostech od hranice ztavení (tedy mimo TOO) výrazné tlakové napěťové špičky. Tato napětí začnou v TOO přecházet do tahu, přičemž v oblasti maximálních teplot dochází k určitému poklesu tahových napětí. Těchto výsledků bylo dosaženo už při realizovaných experimentech v rámci jiných závěrečných prací [28], [29] při testování feriticko-perlitických a duplexních ocelí. Přesně takový tvar a rozložení zbytkových napětí byl získán i při fyzických simulacích svařování na oceli X5CrNi18-10. Veškerá zjištěná zbytková napětí však byla tlaková.



Obecně lze říci, že vznik zbytkového napětí v ocelových dílech je ovlivněn interakčními účinky bráněného smršťování během ochlazování a bráněné objemové expanze. U běžných konstrukčních ocelí vznikají vysoká zbytková napětí v tahu na špičce svaru a lze je očekávat v případech, kdy je rychlost ochlazování relativně nízká, a geometrická omezení jsou vysoká. V případě experimentu v rámci této bakalářské práce, byly vysoké rychlosti ochlazování, a to mohlo být důvodem, proč zbytková napětí v celém rozsahu vyšla tlaková.

V porovnání s duplexní ocelí (viz *obr. 4.1*) je patrný odlišný průběh i hodnoty zbytkových napětí. Pro porovnání byl u duplexních ocelí vybrán průběh zbytkových napětí ve směru Y, tedy ve směru válcování, protože u austenitických ocelí také probíhalo měření ve směru válcování. U duplexních ocelí dochází v austenitické fázi k výraznému poklesu zbytkových napětí v oblasti nejvyšších teplot (nulový bod měřené oblasti – viz *obr. 4.1*). Naopak v tepelně ovlivněné oblasti dochází k výraznému nárůstu napětí až do oblasti kladných tahových napětí. Z uvedených výsledků je patrné, že austenit v duplexních ocelích se nechová jako samostatná fáze, ale je třeba ho posuzovat jako kompozit.

Z průběhů je zřejmé, že při stejném tvaru vzorků a stejně široké TOO jsou tlakové napěťové špičky ve stejných místech vzorku, bez ohledu na typ materiálu. K výrazným změnám v rozložení a hodnotě zbytkových napětí ale dochází v TOO. U austenitické oceli X5CrNi18-10 je téměř v celé TOO dosaženo konstantní hodnoty tlakových napětí 200 MPa. U duplexní oceli X2CrMnNiN21-5-1 jsou v celé TOO dosažena také tlaková napětí, průběh je ale výrazně odlišný. Na okrajích TOO jsou výrazná lokální minima (–600 MPa) a uprostřed vzorku, v místě největších teplot je pak tlakové napětí přes 400 MPa.



**Obr. 4.1** Porovnání průběhů zbytkových napětí v austenitické oceli a jednotlivých fázích duplexní oceli získaných při analýze vzorků stejné geometrie [29]

Posledním krokem experimentu bylo posouzení vlivu žíhání na snížení velikosti zbytkových napětí. Z obr. 3.11 je patrné, že žíháním došlo k významnému snížení jejich hodnot. Nejvyšší vliv na snížení hodnot napětí, mělo žíhání při teplotě 650 °C s výdrží 2 hodin, zde bylo dosaženo v místech napěťových špiček, snížení hodnot zbytkových napětí přibližně o 85 %. Při žíhání za teploty 650 °C dochází ke snižování hodnot zbytkových napětí i v základním neovlivněném materiálu, tedy v místech dále od středu a tím pádem zbytková napětí vůbec nepřechází do oblasti tahu a jsou zde pouze tlaková zbytková napětí, která jsou žádoucí. Je však nutné říci, že čím vyšší je teplota žíhání, tím víc jsou ovlivněny mechanické vlastnosti materiálu. Jako optimální teplota pro snižování hodnot zbytkových napětí proto byla zvolena teplota 600 °C s časem výdrže 2 hodiny, protože při této teplotě dochází k významnému poklesu zbytkových napětí a zároveň nedojde k tak významnému poklesu mechanických vlastností. Žíháním při teplotě 600 °C došlo ke snížení hodnoty meze kluzu  $R_e$  o 11 %, ale mez pevnosti se téměř nesnížila. Navíc došlo k růstu homogenní tažnosti  $A_g$ .

## 5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo posouzení vlivu teplotně napěťového cyklu, simulujícího proces svařování a tepelného zpracování na hodnoty a rozložení zbytkových napětí ve vzorcích z austenitické oceli. Cílem práce bylo také získané výsledky porovnat s obdobnými pracemi, například s duplexní ocelí, která také obsahuje austenitickou fázi.

Výsledky experimentů provedených na vzorcích z oceli 1.4301 lze shrnout následovně:

1. Pomocí fyzických simulací lze podrobně studovat děje, k nimž dochází v TOO při aplikaci teplotně-napěťových cyklů. Navržená metodika aplikace fyzických simulací umožňuje detailnější hodnocení dílčích oblastí (hodnocení zbytkových napětí).
2. V rámci bakalářské práce se podařilo dokázat funkčnost, a především opakovatelnost navržené metodiky při zachování okrajových podmínek. Z provedených analýz na 6 vzorcích je zřejmá vysoká shoda v rozložení a ve velikosti zbytkových napětí.
3. Analýzou zbytkových napětí po aplikaci teplotních cyklů, byly zjištěny lokální napěťové špičky mimo TOO, stejně jako v případě duplexních ocelí. V oblasti TOO je však průběh zbytkových napětí u austenitické oceli X5CrNi18-10 odlišný. Důvodem jsou především rozdílné materiálové vlastnosti – tepelná vodivost a objemová roztažnost.
4. Žiháním na snížení zbytkových napětí lze eliminovat napěťové špičky. S rostoucí teplotou tepelného zpracování se snižuje velikost napěťových špiček, jejich rozložení po celé délce vzorku však zůstává téměř totožné. Při žihání ( $T = 650\text{ °C}$ ;  $t = 2\text{ hodiny}$ ) napěťové špičky zcela zmizí. V ovlivněném materiálu pak zůstávají tlaková zbytková napětí o velikosti cca 100 MPa.
5. Optimální žihací teplota pro eliminaci zbytkových napětí s ohledem na snižování mechanických vlastností s rostoucí teplotou byla zvolena 600 °C po dobu 2 hodin.

## Seznam použité literatury

- [1] MESSLER, Robert W. *Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy*. 1st ed. New York: John Wiley, 1999. ISBN 978-0-471-25376-1.
- [2] KANDIL, F., D LORD a Antony FRY. *A review of residual stress measurement methods A guide to technique selection*. 2001.
- [3] *Introduction to the characterization of residual stress by neutron*. Place of publication not identified: CRC Press, 2019. ISBN 978-0-367-39326-7.
- [4] NEUMANN, Heinz, TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, a STROJNÍ FAKULTA. *Teorie svařování a pájení. Část 1: Tavné svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-171-9.
- [5] TABATABAEIAN, Ali, Ahmad Reza GHASEMI, Mahmood M. SHOKRIEH, Bahareh MARZBANRAD, Mohammad BARAHENI a Mohammad FOTOUHI. *Residual Stress in Engineering Materials: A Review*. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2022, **24**(3), 2100786. ISSN 1438-1656, 1527-2648. Dostupné z: doi:10.1002/adem.202100786
- [6] RADAJ, Dieter. *Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion ; with 265 figures*. Berlin: Springer, 1992. ISBN 978-3-642-48642-5.
- [7] MORAVEC, Jaromír. a Josef BRADÁČ. *Možnosti a využití teplotně-napětového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-138-2.
- [8] UEDA, Yukio, Hidekazu MURAKAWA a Ninshu MA. *Introduction to Welding Mechanics*. In: *Welding Deformation and Residual Stress Prevention* [online]. B.m.: Elsevier, 2012 [vid. 2022-09-15], s. 1–34. ISBN 978-0-12-394804-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-394804-5.00001-3
- [9] COZZOLINO, Luis D., Harry E. COULES, Paul A. COLEGROVE a Shuwen WEN. *Investigation of post-weld rolling methods to reduce residual stress and distortion*. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **247**, 243–256. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.04.018
- [10] SAMARDŽIĆ, Ivan, Tomaz VUHERER, Dejan MARIC a Pejo KONJATIĆ. *Influence of vibrations on residual stresses distribution in welded joints*. *Metalurgija*. 2015, **54**, 527–530.
- [11] SCHAJER, Gary S., ed. *Practical residual stress measurement methods*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-40282-5.
- [12] ROSSINI, N.S., M. DASSISTI, K.Y. BENYOUNIS a A.G. OLABI. *Methods of measuring residual stresses in components*. *Materials & Design* [online]. 2012, **35**, 572–588. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2011.08.022

- [13] WITHERS, P.J. a H.K.D.H. BHADSHIA. Residual stress. Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology* [online]. 2001, **17**(4), 355–365. ISSN 0267-0836, 1743-2847. Dostupné z: doi:10.1179/026708301101509980
- [14] PROCTER, E. a E.M. BEANEY. THE TREPAN OR RING CORE METHOD, CENTRE-HOLE METHOD, SACH'S METHOD, BLIND HOLE METHODS, DEEP HOLE TECHNIQUE. In: *Residual Stresses* [online]. B.m.: Elsevier, 1987 [vid. 2022-10-07], s. 165–198. ISBN 978-0-08-034062-3. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-034062-3.50019-7
- [15] LEGGATT, R H, D J SMITH, S D SMITH a F FAURE. Development and experimental validation of the deep hole method for residual stress measurement. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* [online]. 1996, **31**(3), 177–186. ISSN 0309-3247. Dostupné z: doi:10.1243/03093247V313177
- [16] *Methods of measuring residual stresses in components / Elsevier Enhanced Reader* [online]. [vid. 2022-09-14]. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2011.08.022
- [17] CHENG, Weili a Iain FINNIE. *Residual stress measurement and the slitting method*. New York, NY: Springer, 2007. Mechanical engineering series. ISBN 978-0-387-37065-1.
- [18] KRAUS, Ivo a Nikolaj GANEV. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Praha: Vydavatelství CVUT, 2004. ISBN 978-80-01-03099-8.
- [19] *Gleeble* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.leeble.com>
- [20] *Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates / Elsevier Enhanced Reader* [online]. [vid. 2022-11-09]. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2012.09.038
- [21] MURUGAN, S, Sanjai K RAI, P. V KUMAR, T JAYAKUMAR, Baldev RAJ a M. S. C BOSE. Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2001, **78**(4), 307–317. ISSN 0308-0161. Dostupné z: doi:10.1016/S0308-0161(01)00047-3
- [22] VASANTHARAJA, P., V. MADUARIMUTHU, M. VASUDEVAN a P. PALANICHAMY. Assessment of Residual Stresses and Distortion in Stainless Steel Weld Joints. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 2012, **27**(12), 1376–1381. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426914.2012.663135
- [23] MARQUES, M. J., A. RAMASAMY, A. C. BATISTA, J. P. NOBRE a A. LOUREIRO. Effect of heat treatment on microstructure and residual stress fields of a weld multilayer austenitic steel clad. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2015, **222**, 52–60. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.03.004
- [24] NIKITIN, I. a M. BESEL. Residual stress relaxation of deep-rolled austenitic steel. *Scripta Materialia* [online]. 2008, **58**(3), 239–242. ISSN 1359-6462. Dostupné z: doi:10.1016/j.scriptamat.2007.09.045

- [25] ČSN EN 10088-1. *Korozivzdorné oceli - Část 1: Přehled korozivzdorných ocelí* [online]. 2015. vyd. Praha: Český normalizační institut, nedatováno. Třídící znak 420927. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-10088-1-420927-203658.html>
- [26] *Cr-Ni Austenitická ocel odolná korozi 1.4301* [online]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLnzl00RA9x7p75N8MGgz73w](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLnzl00RA9x7p75N8MGgz73w)
- [27] ČSN EN 10263-5 (421079) *Ocelové dráty válcované, tyče a dráty tažené pro přechování a protlačování za studena - Část 5: Technické dodací podmínky pro korozivzdorné oceli* [online]. 2019. vyd. Praha: Český normalizační institut, nedatováno. Třídící znak 421079. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-10263-5-421079-203917.html#>
- [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.
- [29] BUKOVSKÁ, Šárka. *Možnosti měření zbytkových napětí u duplexních ocelí*. Liberec, 2021. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.