



Difúzní svařování heterogenních svarů v kombinaci vysokolegovaná ocel a titan

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Michal Novák**
Vedoucí práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal Novák**

Osobní číslo: **S12000151**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Difúzní svařování heterogenních svarů v kombinaci
vysokolegovaná ocel a titan**

Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se teoreticky s principem a podstatou difúzního svařování.
2. Provedte rešerši o podstatě difúze a možnostech difúzního svařování.
3. Seznamte se s materiálovými vlastnostmi vysokolegovaných ocelí a titanu.
4. Seznamte se s možnostmi a obsluhou teplotně-napětového simulátoru Gleeble.
5. Navrhněte a realizujte experimentální program pro difúzní svařování navržené kombinace materiálů.
6. Provedte vyhodnocení experimentů s ohledem na pevnost svarového spoje.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] **Kolektiv autorů.** *Technologie svařování a zařízení.* ISBN 80-85771-81-0. ZEROSS.
[2] **MORAVEC, J., BRADÁČ, J.** *Možnosti a využití teplotně-napěťového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů.* 1. vyd. Technická univerzita v Liberci, 2014.
[3] *AWS Welding Handbook: Welding Science and Technology.* 9th Ed., Vol.1, 2001.

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

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. ledna 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, 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 (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Název bakalářské práce

Difúzní svařování heterogenních svarů v kombinaci vysokolegovaná ocel a titan

Bachelor thesis title

Diffusion bonding of heterogeneous welds in combination with high-alloy steel and titanium

Abstrakt

Hlavním cílem této bakalářské práce je nalezení vhodných svařovacích podmínek pro difúzní svaření vysokolegované oceli 316L a Titanu Grade 2. V teoretické části této práce je rozebrána problematika difúzního svařování včetně popisu správného určení svařovacích podmínek a využití difúzního svařování ve světě, včetně příkladů. Dále je zde popsán teplotně-napěťový simulátor Gleeble 3500 a jeho využití pro výzkum technologie zpracování materiálů. V experimentální části této bakalářské práce jsou představeny použité materiály pro difúzní svařování, dále návrh svařovacích podmínek a realizace experimentu. V závěrečné části práce se pak nachází mechanické a metalografické zkoušky a celkové vyhodnocení experimentu.

Klíčová slova: difúzní svařování, procesní parametry, Gleeble 3500, titan, ocel 316L

Abstract

The main aim of this bachelor thesis is finding suitable welding conditions for diffusion bonding of with high-alloy steel 316L and Titan Grade 2. In the theoretical part of this work there is analyzed the problem of diffusion welding including a description of the correct identification of bonding conditions and using of diffusion bonding in the world, including examples. In next step there is disclosed a thermal-mechanical simulator Gleeble 3500 and its using for research material-handling technology. In the experimental part of this work there are presented the materials which are using for the diffusion bonding, a proposal bonding conditions and the execution of the experiment. In the final part there are a mechanical and metallographic testing and overall evaluation of the experiment.

Key words: diffusion bonding, process parameters, Gleeble 3500, titanium, steel 316L

Poděkování

Rád bych poděkovala Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za jeho poskytnuté materiály, odborné vedení, cenné rady a připomínky při zpracování této bakalářské práce a zároveň bych rád poděkoval Ing. Michaela Kolnerové, Ph.D. za kontrolu formálních chyb.

Obsah

1. Úvod.....	- 12 -
2. Teoretická část	- 14 -
2.1. Fyzikální princip difúze	- 14 -
2.2. Mechanismus vzniku spoje	- 15 -
2.3. Princip technologie a parametry svařování	- 17 -
2.3.1. Hlavní technologické parametry	- 17 -
2.3.2. Vliv čistoty a drsnosti povrchu	- 19 -
2.4. Druhy zařízení pro difúzní svařování.....	- 21 -
2.4.1. Dělení zařízení podle vakua.....	- 22 -
2.4.2. Dělení podle tepelného zdroje a způsobu ohřevu	- 23 -
2.4.3. Dělení podle druhu silové soustavy	- 24 -
2.4.4. Ostatní dělení	- 25 -
2.5. Kontrola kvality spoje	- 25 -
2.6. Příklady použití difúzního svařování ve světě	- 26 -
3. Difúzní svařování na simulátoru Gleeble	- 31 -
3.1. Simulátor Gleeble 3500.....	- 31 -
3.2. Základní součásti systému Gleeble	- 32 -
3.3. Systémy přístroje Gleeble 3500	- 33 -
3.3.1. Teplotní systém.....	- 34 -
3.3.2. Mechanický systém.....	- 35 -
3.3.3. Teplotní gradient a vysokoteplotní čelisti.....	- 35 -
4. Experimentální část.....	- 38 -
4.1. Titan Grade 2.....	- 38 -
4.2. Ocel AISI 316L (X2CrNiMo17-12-2)	- 40 -

5.	Difúzní svaření Titanu Grade 2 s ocelí 316L.....	- 42 -
5.1.	Příprava vzorku	- 42 -
5.2.	Návrh a realizace první fáze experimentu.....	- 43 -
5.2.1.	Realizace experimentu.....	- 44 -
5.3.	Realizace druhé fáze experimentu	- 49 -
5.3.1.	Mechanické zkoušky difúzních spojů.....	- 50 -
5.3.2.	Metalografické vyhodnocení vzorků	- 52 -
5.4.	Realizace třetí fáze experimentu	- 56 -
6.	Závěr	- 60 -
7.	Seznam použitých zdrojů.....	- 62 -
8.	Seznam příloh	- 65 -

Seznam použitých symbolů a zkratek

316L	-	Označení oceli	[-]
T_T	-	Teplota tavení	[°C]
T_{sv}	-	Teplota svařování	[°C]
p_{sv}	-	Svařovací tlak	[MPa]
t_{sv}	-	Svařovací čas	[min]
Cr	-	Chrom	[-]
Al	-	Hliník	[-]
Cu	-	Měď	[-]
Si	-	Křemík	[-]
C	-	Uhlík	[-]
Ni	-	Nikl	[-]
Mo	-	Molybden	[-]
Nb	-	Niob	[-]
W	-	Wolfram	[-]
Mg	-	Mangan	[-]
Ti	-	Titan	[-]
Ta	-	Tantal	[-]
Sn	-	Cín	[-]
Al-Si12	-	Slitina hliníku a křemíku	[-]
AlMg6	-	Slitina hliníku a manganu	[-]
TiC	-	Karbid titanu	[-]
ZrC	-	Karbid zirkonia	[-]
NbC	-	Karbid niobu	[-]
TaC	-	Karbid tantalu	[-]
Mo ₂ C	-	Karbid molybdenu	[-]

MoC	-	Karbid molybdenu	[-]
WC	-	Karbid wolframu	[-]
BaCl ₂	-	Chlorid barnatý	[-]
NaCl	-	Chlorid sodný	[-]
Ba ₂ O ₃	-	Oxid barya	[-]
KCl	-	Chlorid draselný	[-]
Na ₂ CO ₃	-	Uhličitan sodný	[-]
SiC	-	Karbid křemíku	[-]
BaF ₂	-	Fluorid barnatý	[-]
KNO ₃	-	Dusičnan draselný	[-]
NaNO ₃	-	Dusičnan sodný	[-]
NaOH	-	Hydroxid sodný	[-]
ČSN	-	Česká státní norma	[-]
R _{p0.2}	-	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R _m	-	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
σ _o	-	Mez pevnosti v ohybu	[MPa]
IJERST	-	International Journal of Engineering Research and Science & Technology	[-]
Ti-6Al-4V	-	Slitina titanu	[-]
V	-	Vanad	[-]
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	-	Slitina titanu	[-]
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	-	Slitina titanu	[-]
Zr	-	Zirkonium	[-]
304L	-	Označení oceli	[-]
PH SS	-	Tvrzená kalená nerezová ocel	[-]
cp Ti	-	Komerčně čistý titan	[-]

Pt	-	Platina	[-]
Rh	-	Rhodium	[-]
X5CrNi18-8	-	Označení oceli	[-]
S35J2	-	Označení oceli	[-]
FeTiO ₃	-	Ilmenit (železnato-titaničitý oxid)	[-]
TiCl ₄	-	Chlorid titaničitý	[-]
TiSi ₂	-	Silicid titanu	[-]
WIG	-	Wolfram–Inertgasschweißen	[-]
MIG	-	Metal Inert Gas	[-]
O	-	Kyslík	[-]
N	-	Dusík	[-]
H	-	Vodík	[-]
Fe	-	Železo	[-]
1.4404	-	Označení oceli	[-]
X2CrNiMo17-12-2	-	Označení oceli	[-]
ČSN 17349	-	Označení oceli	[-]
AKV Extra 2.	-	Označení oceli	[-]
P	-	Fosfor	[-]
S	-	Síra	[-]
l	-	Délka	[mm]
d	-	Průměr	[mm]
R _a	-	Drsnost	[μm]
HV	-	Tvrdost podle Vickerse	[-]
D ₀	-	Průměr vzorku v testované části	[mm]
A _g	-	Tažnost na mezi pevnosti	[%]
A ₂₀	-	Celkově hodnocená tažnost	[%]

1. Úvod

Difúzní svařování je proces, při kterém dochází ke spojení materiálů na atomární úrovni. Spojované součásti jsou v těsném kontaktu ohřáty na danou teplotu, za kontrolovaného tlaku a po předem určený čas. Mezi plochami, které jsou v těsném kontaktu, dochází k difúzi v povrchových vrstvách spojovaného materiálu vlivem lokální plastické deformace a k vytvoření stejně pevného spoje jako základního materiálu. Pro takovéto svařování je vhodné použití ochranné atmosféry nebo vakua, díky čemuž vznikne spoj s minimálním obsahem škodlivých příměsí i u aktivních kovů.

Difúzní svařování se uplatňuje pro spojování obtížně svařitelných materiálů nebo v případech, kdy nemohou být použity běžné způsoby tavného svařování. Není třeba drahých pájek, tavidel nebo elektrod. Netvoří se okuje, součásti se nedeformují a vlastnosti svařovaných materiálů mají v oblasti spoje stále stejné vlastnosti. Jde o metodu, která se dá lehce automatizovat a umožňuje spojit mnoho součástí do složitých sestav během jedno cyklu. Tato technologie svařování je velice šetrná z hlediska ekologie a ochrany člověka.

Difúzním svařováním se svařují materiály např. žárupevné, těžko tavitelné, super tvrdé, materiály s vysokou afinitou ke kyslíku apod. Metody se využívá též ke svařování kombinovaných materiálů, a to jak vzájemně kovů, tak i kovů s nekovy, jako keramika s ocelí, keramika s barevnými a lehkými kovy, sklo s kovy, titan a grafit, měď a wolfram, bronz a ocel, titan a nikl, nebo spojování součástí o malých tloušťkách s velkorozměrnými konstrukčními díly.

Cílem této práce bylo nalezení vhodných pracovních podmínek pro difúzní svaření vysokolegované oceli 316L a Titanu Grade 2 na simulátoru Gleeble 3500, který se nachází na Technické univerzitě v Liberci, a následné vyhodnocení výsledků s ohledem na pevnost svarového spoje.

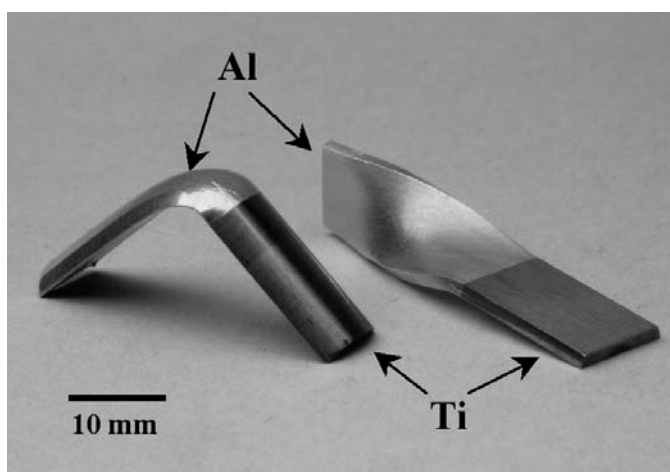
Způsob difúzního svařování objevil v roce 1953 profesor N. F. Kazakov z Moskevského technologického institutu. V následujících letech bylo difúzní svařování patentováno ještě v jiných zemích, ale všechny patenty byly přiznány profesorovi Kazakovovi.

První zařízení na difúzní svařování ve vakuu vyrobil Moskevský kombinát tvrdých slitin v roce 1957 pod názvem SDVU-1 a SDVU-2. K sériové výrobě dochází

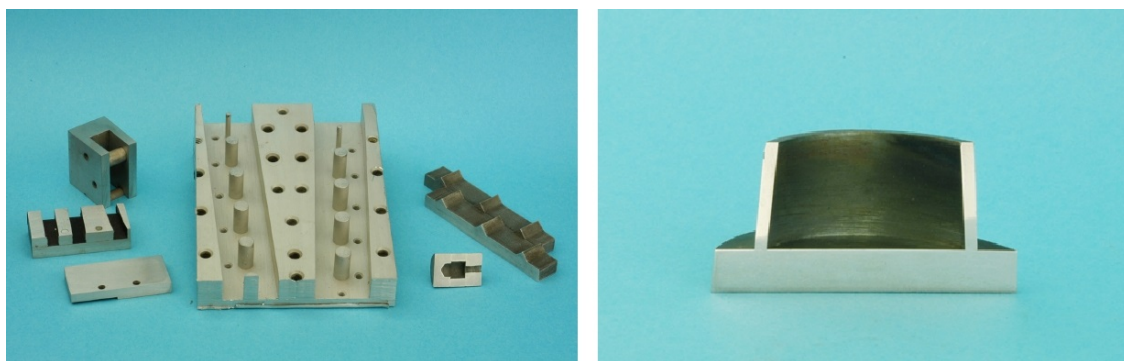
v šedesátých letech v Rusku. V Sovětském svazu a následně Rusku je v průmyslu a výzkumu přes tisíce zařízení v různých provedeních s různými zdroji ohřevu, s různými intenzitami vakua nebo různými druhy atmosfér. [1]

V České republice se bohužel tato metoda svařování moc nevyužívá a ani výzkumu v této oblasti se téměř nikdo nevěnuje. Např. zařízení Gleeble, na kterém byly prováděny experimenty této bakalářské práce, se nachází v České republice pouze ve dvou exemplářích, na Technické univerzitě v Liberci a na Technické univerzitě v Ostravě.

Difúzní svařování je poměrně mladá technologie, ovšem našla rychle uplatnění a stále více se objevuje v mnoha průmyslových odvětvích jako je elektrotechnický, automobilový, letecký a raketový průmysl. Příklady výrobků můžeme vidět na obrázcích 1.1, 1.2 a 1.3.



Obrázek 1.1: Difúzní svarový spoj hliníkového a titanového plechu [2]



Obrázek 1.2 a Obrázek 1.3: Konkrétní difúzně svařované díly [2]

2. Teoretická část

2.1. Fyzikální princip difúze

Difúze je proces, při kterém dochází k přemístění molekul látky základním materiálem a to většinou z látky o větší koncentraci do látky s menší koncentrací ve směru koncentračního spádu. Jde o proces, který je samovolný a nevratný, možné je jej pouze tepelně aktivovat nebo urychlit. Každá látka se snaží o dosažení rovnovážného stavu, tedy i rovnováhy koncentrací. Proces difúze lze rozdělit na dva druhy a to na samodifúzi a heterodifúzi.

Samodifúze – při samodifúzi dochází k uložení atomů do základní mřížky materiálu a kromě gradientu teploty a napětí vzniká především při gradientu koncentrace. Tyto koncentrační gradienty lze vyjádřit pomocí Fickových zákonů, kdy „první Fickův zákon (2.1) udává změnu koncentrace prvku A ve směru x za jednotku času při přechodu ze vzorku 1 do vzorku 2. Difúzní tok J_A atomů prvku A je za jednotku času ve směru osy a přes jednotku plochy úměrný koncentračnímu gradientu“.

$$J_A = -D \cdot \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (2.1)$$

V případě, že se jedná o nestacionární difúzi v závislosti na čase, pak je možno odvodit vztah (2.2) nazývaný jako druhý Fickův zákon.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial C_A}{\partial x} \right) \quad (2.2)$$

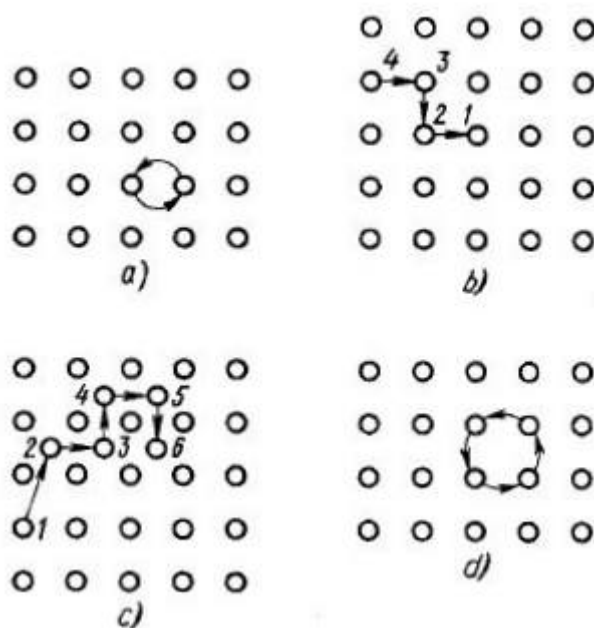
kde

J_A	-	Difúzní tok	$[\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
D	-	Koeficient difúze	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
C_A	-	Koncentrace prvku A	$[\text{mol m}^{-3}]$
x	-	Směr změny koncentrace difúze	$[\text{m}]$
t	-	Čas změny koncentrace	$[\text{s}]$

Heterodifúze – tento druh difúze probíhá mezi dvěma fázemi materiálu. Je složitější a možný pouze za předpokladu, že bude mít atom dostatečné množství energie. Při pohybu atomu v krystalové mřížce vzniká na jeho místě „díra“ – vakance. Atomy se

přemísťují postupně a to na vzdálenosti kolem 10^{-11} μm a přemísťují se skoky z jedné polohy do druhé. Na obrázku 2.1 jsou ukázány různé mechanismy pohybu atomu v krystalické mřížce. Obrázek představuje čtyři různé způsoby výměny atomů realizované jak pomocí vakancí, tak bez jejich přispění.

Na obrázku 2.1.a se jedná o vzájemnou výměnu, mezi sousedními atomy. Obrázek 2.1.b pak znázorňuje postupné přemísťování vakancí, kdy atom přejde do místa, kde byla vakance, a uvolní tak místo dalšímu atomu. Třetí způsob (obr. 2.1.c) znázorňuje vnikání atomu, kdy se atom uvolní ze své pozice, a postupuje pak dál krystalovou mřížkou. Cestující atom musí být mnohem menší, než atomy prvků tvořící krystalovou mřížku, v níž se pohybuje. K tomuto způsobu je nutná značná energie a je možný při heterodifúzi v tuhých roztocích. Posledním způsobem je tzv. kruhová výměna zobrazená na obrázku 2.1.d. Čtyři atomy se vzájemně vymění po kružnici. Jde o jeden z nejreálnějších posuvů u kovů se soudržnou mřížkou. [1]

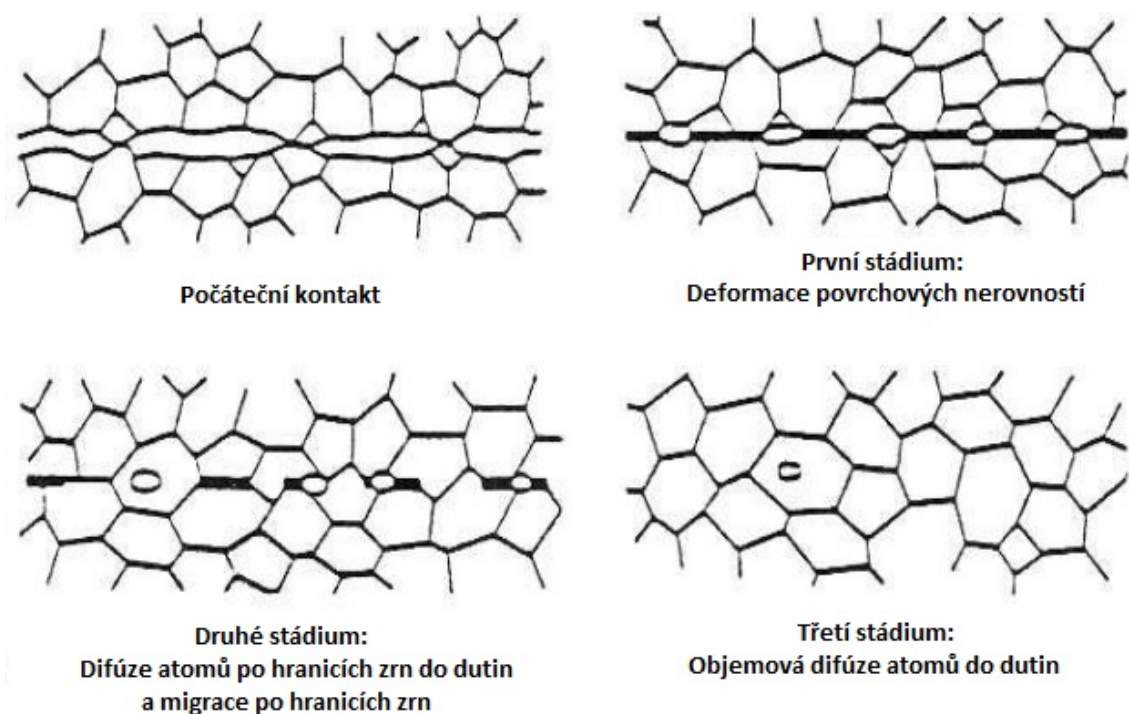


Obrázek 2.1: Mechanizmy přesunu atomů v krystalové mřížce kovu [1]

2.2. Mechanismus vzniku spoje

Pro pevnost a spolehlivost spoje, je třeba vzorky přiblížit na dostatečnou vzdálenost, aby mohlo dojít k difúzi a vzniku atomových vazeb. Na povrchu součásti se nacházejí absorpční vrstvy plynu, vody a ostatní látky, které je třeba před svařováním odstranit. Proces difúzního svařování lze pak rozdělit na tři stádia schematicky znázorněná na obrázku 2.2.

- a) **První stádium** – je stádiem, ve kterém vzniká počáteční kontakt povrchů (již za pokojové teploty), následující povrchovou deformací nerovností a deformací povrchových vrstviček, což je nezbytné pro vznik mechanického kontaktu.
- b) Při **druhém stádiu** dochází k přemísťování vakancí a dislokací a k vzájemné difúzi atomů po hranicích zrn do dutin materiálu. Čas je v tomto stádiu velice důležitý, aby byla umožněna důkladná difúze a vznik kvalitního spoje.
- c) Ve **třetím stádiu** dochází k objemové difúzi atomů do dutin materiálu a v důsledku intenzivních difúzních pochodů k vymizení původního rozhraní nebo k nárůstu zrn mezi povrchy (přechodová vrstva) a vzniku konečného spoje.



Obrázek 2.2: Stádia difúzního svařování [3]

Vytvořit jednoduchý obecný model pro difúzní svařování je velice těžké, protože svařování probíhá za specifických podmínek, kdy se svařují různé materiály s různými vlastnostmi, a výsledek je podmíněn fyzikálním jevem, který převládá. Například chceme-li dosáhnout kvalitního spoje při nízkém tlaku, je zapotřebí použít dlouhého svařovacího času.

Pokud mají svařované materiály příliš rozdílné mechanické a fyzikálně-mechanické vlastnosti, může dojít ke vzniku křehkých intermetalických fází, nebo ke vzniku jiných materiálových nežádoucích struktur. K zamezení takovýchto přeměn je výhodné použít přechodových materiálů tzv. mezivrstev. Tyto mezivrstvy mohou také zajistit další

požadavky, jako jsou čistota povrchu, difúzi za nižších teplot, podporu plastického tečení a schopnost přizpůsobit se povrchu při poměrně nízkém tlaku. Mezivrstvy a aktivační materiály se nejčastěji vyskytují ve formě fólií, stříkaných povlaků, galvanických povlaků nebo prášků. [1,4]

2.3. Princip technologie a parametry svařování

Pro vznik kvalitního spoje je nejprve zapotřebí spojované povrchy řádně očistit a zabránit případné další oxidaci. Zahřát spojované součásti na předem určenou teplotu a zajistit setrvání na této teplotě po určený čas a s dostatečným tlakem (případně zajistit stálost vakua nebo ochranné atmosféry). V praxi je pro vznik kvalitního heterogenního spoje zapotřebí nejdříve učinit několik zkušebních testů s daným materiálem, abychom zjistili, jaké podmínky budou nejvhodnější.

2.3.1. Hlavní technologické parametry

Z předchozích kapitol je zřejmé, že nejdůležitějšími aspekty pro difúzní svařování je teplota, tlak a čas. Za jeden z hlavních parametrů lze považovat také ochrannou atmosféru nebo vakuum a jejich kvalitu.

Teplota využitelná pro svařování se určí z teploty tavení (T_T) svařovaných materiálů, a pokud jsou materiály rozdílné, určuje se podle materiálu s nižší teplotou tavení. Svařovací teplota se pohybuje mezi 55 až 90 % teploty tavení, přičemž její optimální hodnota je přibližně 0,7 násobek teploty tavení T_T . Pracovní teplota ovlivňuje zejména rychlost difúze jednotlivých prvků v materiálu a s nárůstem teploty zpravidla i jeho plasticitu. Snahou je teplotu svařování snížit co nejvíce a podle posledních výzkumů lze úspěšně difúzně svařovat i za teploty 0,4 T_T .

Tlak při svařování musí být natolik dostatečný, aby došlo nejen k přiblížení ploch, ale pokud možno k difúzi po co největší ploše dotýkajících se materiálů. Zároveň se musí brát ohled na to, aby nedošlo ke tvorbě makroskopických trhlinek. Tlak je volen podle druhu materiálu a jeho chemických vlastností, podle výše svařovací teploty, podle mechanických vlastností nebo podle druhu použité mezivrstvy. Tlak pro difúzní svařování oceli se pohybuje v rozmezí 10 až 20 MPa.

Čas je dalším parametrem pro difúzní svařování a volí se s ohledem na předchozí parametry tlak a teplotu. Je zapotřebí, aby jeho volba byla optimální pro dostatečnou difúzi vzhledem k velikosti svařovaných ploch a různé rychlosti difúze jednotlivých

prvků svařovaných materiálů. Jeho optimální hodnota se pohybuje v rozmezí od 3 do 60 minut.

V tabulce 2.1 jsou uvedeny příklady parametrů difúzního svařování pro různé materiály, nebo kombinace materiálů.

Tabulka 2.1: Parametry materiálů pro difúzní svařování [1]

Svařované materiály	T _{sv} (°C)	P _{sv} (MPa)	t _{sv} (min)	Svařované materiály	T _{sv} (°C)	P _{sv} (MPa)	t _{sv} (min)
Nízkouhlíková ocel	950	16	6	Grafit + Ti	950	7	20
Středněuhlíková ocel	1000	12	5	TiC + Mo	1427	5	10
Ocel 12 060 + 19858	1000	20	3	ZrC + Nb	1400	15	10
Cr-Al ocel	1000	20	5	ZrC + Ta	2000	5	10
Austenitická ocel + Cu	650	18	40	ZrC + W	1800	15	10
Al-Si 12 + ocel	370	2	10	NbC + Nb	1600	5	10
Cu + ocel (0,5%C)	850	5	10	NbC + Ta	1700	5	10
Ni (pórovitý) + austenitická ocel	950	5	25	NbC + Mo	1800	5	10
Austenitická ocel	1150	14	15	NbC + W	1800	5	10
Cu	885	5,6	8	TaC + Nb	1200	5	10
Al + Cu	450	3	8	TaC + Ta	1900	5	10
Mo	1600	10	20	TaC + Mo	1600	5	10
Cu + Mo	900	5	15	TaC + W	2000	5	10
Nb	1300	15	10	Mo ₂ C + Mo	1400	5	10
Mo + Nb	1400	10	20	MoC + W	1500	5	10
W	2000	10	20	WC + Mo	1850	5	10
AlMg6	500	2	10	WC + W	1900	5	10

Dalším důležitým aspektem pro difúzní svařování je hodnota pracovního vakua popřípadě druhu ochranné atmosféry, jako je například argon, hélium nebo jiný inertní plyn. Optimální hodnota vakua je volena podle druhu materiálu a podle předešlých zkoušek, ale je limitována možnostmi použitého zařízení. Při nedostatečné ochraně svařovaných součástí je spoj vystaven riziku oxidace. Naopak vysoká hodnota vakua snižuje produktivitu svařování, zvyšuje jeho cenu a může být odůvodněna pouze efektivním očištěním svařovaných ploch materiálů od oxidů a různých plynů. Mohou také nastat případy svařování ve volné atmosféře, ale takto vytvořený spoj nikdy nedosáhne takových kvalit jako spoj vytvořený ve vakuu. Zvláštním způsobem difúzního svařování je svařování v kapalných prostředích (tab. 2.2). [1,5]

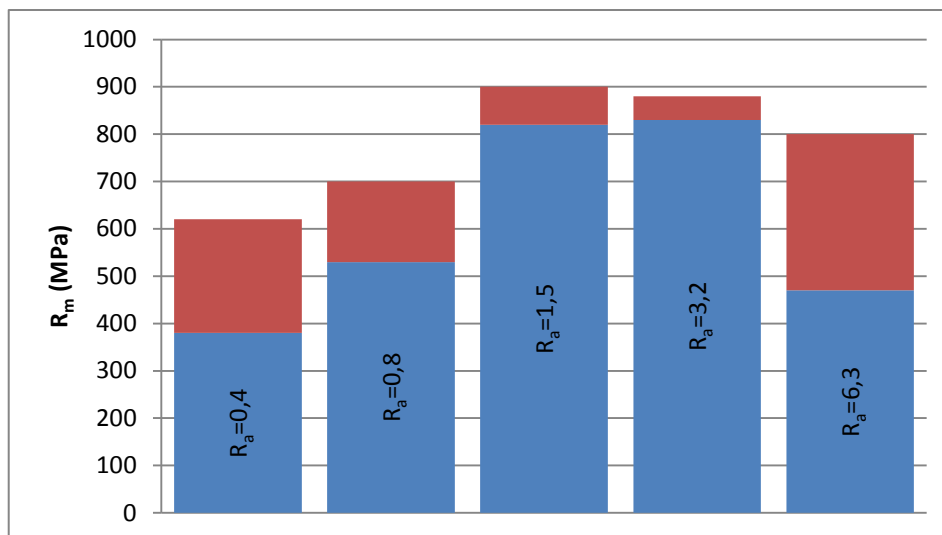
Tabulka 2.2: Roztoky pro difúzní svařování [1]

Složení roztoků	T _T (°C)	T _{sv} (°C)
100% BaCl ₂	962	1020 až 1320
90% BaCl ₂ + 10% NaCl	-	950 až 1300
100% Ba ₂ O ₃	577	1200 až 1400
100% NaCl	800	850 až 920
100% KCl	776	820 až 920
78% BaCl ₂ + 22% NaCl	-	700 až 950
80% BaCl ₂ + 20% KCl	640	680 až 1060
70% BaCl ₂ + 30% KCl	-	680 až 900
53% BaCl ₂ + 20% NaCl + 27% KCl	550	600 až 900
80% Na ₂ CO ₃ + 10% NaCl + 10% SiC	-	870 až 900
56% KCl + 44% NaCl	660	700 až 815
83% BaCl ₂ + 17% BaF ₂	844	900 až 1000
100% KNO ₃	338	350 až 600
100% NaNO ₃	317	330 až 600
100% NaOH	318	350 až 580

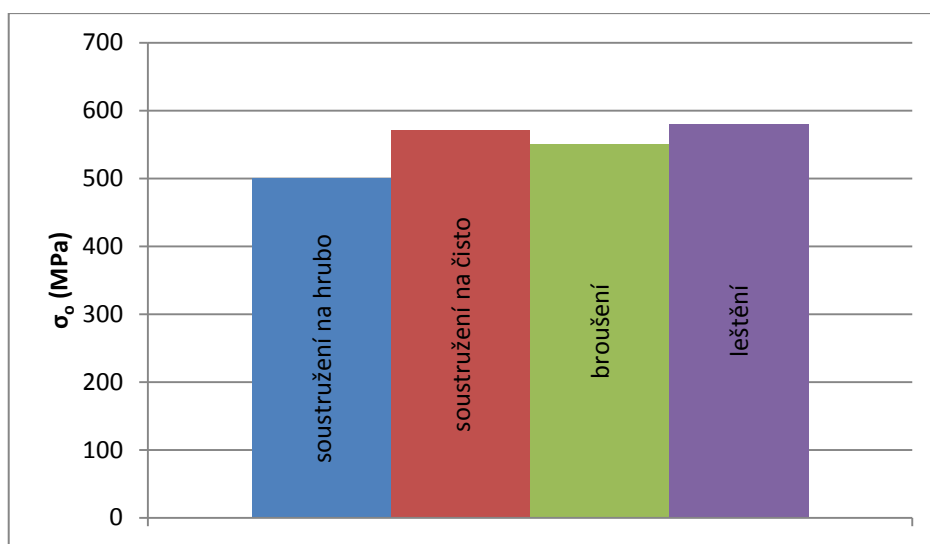
2.3.2. Vliv čistoty a drsnosti povrchu

Na kvalitě spoje se z velké části podílí příprava svařovaných vzorků, proto je důležité vzorky před svařováním náležitě očistit. Pro tento druh svařování je vyžadováno, aby svařované plochy byly kovově čisté, opracované na požadovanou drsnost a dostatečně odmaštěné. Čím pečlivěji jsou svarové plochy připraveny, tím lepší svar vznikne. Svařované plochy je dobré nejdříve jemně opracovat řeznými nástroji a následně odmastit například acetonem.

Problematikou drsnosti a čistoty povrchu se zabýval již profesor Kazakov. Příkladem je vliv drsnosti na pevnost heterogenního svaru u oceli ČSN 12 050, provedený ve vakuu při teplotě 1000°C, při svařovacím tlaku 20 MPa a svařovacím čase 5 minut, znázorněný na obrázku 2.3. Vzorky měly stejné podmínky přípravy i svařování, jen byly obrobena různými způsoby a to: soustružením na hrubo, soustružením na čisto, broušením a leštěním. Z obrázku 2.4 je zřejmé, že nejvhodnější metodou pro přípravu povrchu, je soustružení na čisto nebo leštění. Dalším způsobem může být například čištění ultrazvukem, kdy mez pevnosti v ohybu svařovaného spoje vzrostla ze 700 až 800 MPa na 800 až 1300 MPa.

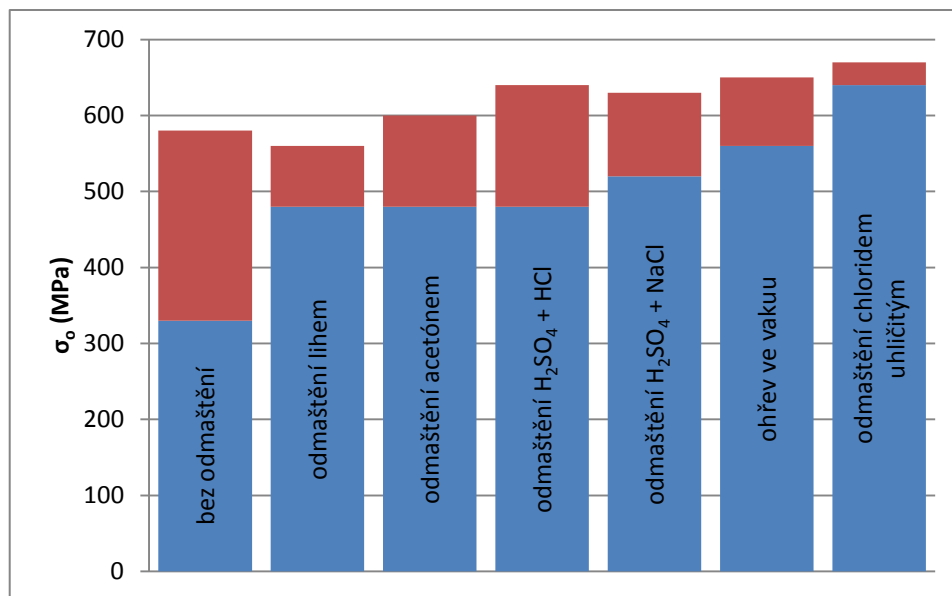


Obrázek 2.3: Vliv drsnosti na pevnost svarových spojů [1]



Obrázek 2.4: Závislost pevnosti spoje u oceli ČSN 12 050 na mechanickém obrobění povrchů před svařováním [5]

Na kvalitu spoje má dále vliv stav povrchu vzorku. Na povrchu kovu jsou absorpční vrstvičky, které je třeba odstranit (olej, tuk, prach, rez, barva atd.). Tyto vrstvičky brání dostatečnému přiblížení svařovaných vzorků a tedy i vzniku kvalitního spoje. Na obrázku 2.5. je ukázána výsledná pevnost spoje v závislosti na způsobu odstranění absorpčních vrstviček. Tukové vrstvy byly odstraněny několika způsoby: omytí alkoholem, acetonem, chloridem uhličitým a ohřevem ve vakuu.



Obrázek 2.5: Závislost pevnosti svarového spoje na chemické úpravě povrchu [5]

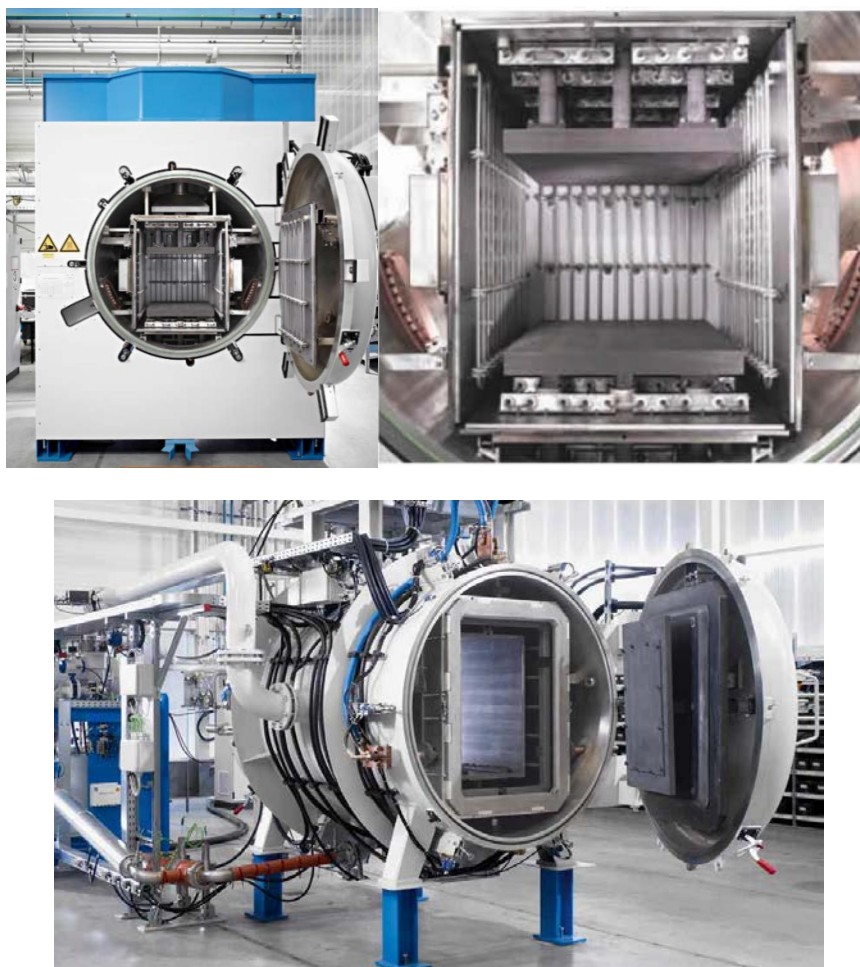
Z těchto experimentů, které provedl profesor Kazakov, lze vyvodit několik závěrů.

- 1) Příprava povrchů má význam pro zlepšení kvality spoje. Nejvýhodnější je obrábění soustružnickým nožem, tj. soustružení na čisto.
- 2) Chemické opracování povrchu zvýší pevnostní parametry spoje (rozdílné vlastnosti různých chemických prostředků)
- 3) Použití vakua, nezávisle na způsobu čištění povrchů spojovaných součástí či druhu obrobení, zlepšuje mechanické vlastnosti materiálu. [5]

2.4. Druhy zařízení pro difúzní svařování

Pro difúzní svařování se využívá nepřeberné množství zařízení, především s různými druhy ohřevu, ale i s různým druhem ochranné atmosféry nebo kvality vakua. Jsou i speciální přístroje pro svařování v kapalných prostředích.

Základní části svařovacího zařízení jsou nejčastěji: svařovací komora, zdroj ohřevu svařovaných součástek, hydraulický systém pro vytvoření správného tlaku, vakuový nebo jiný systém ochranného plynu či kapaliny, chladicí systém, měřicí a regulační systém, ovládání a jiné části. Takové zařízení můžeme vidět na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Zařízení od firmy PVA TePla [6]

2.4.1. Dělení zařízení podle vakua

Vakuum je prostředí, kde je tlak plynu nebo páry podstatně nižší, než je atmosférický tlak. Vakuum je vysoké, nebo velmi dobré, když se tlak prakticky blíží k nule, tj. když se jeho hodnoty měří v miliontinách, miliardtinách či ještě menších zlomcích atmosférického tlaku.

Při difúzním svařování se vakuum vytvoří snadno a to vyčerpáním plynů a par z vakuové (svařovací) komory. Vytvořené vakuum je pak potřeba udržet po celou dobu svařování. Toho se docílí dostatečným utěsněním stěn a také použitím speciálních pohlcovačů vyloučených plynů. V současné době existují tři základní způsoby jak vakuum vytvořit: vývěvou, speciálními pohlcovači plynu anebo lapači. Při použití lapačů mrzne ve vakuové komoře vodní pára a tím se snižuje tlak. Pokud tvrdíme, že atmosférický tlak je $1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, pak vývěvou dosáhneme vakua o hodnotách maximálně $1,01 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Při použití lapačů nebo pohlcovačů lze dosáhnout vakua o hodnotách až $1,01 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}$.

Rozdělení podle kvality vakua:

- a) s nízkým vakuem – řádově $1,01 \text{ Pa}$
- b) se středním vakuem – $0,101$ až $1,01 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$
- c) s vysokým vakuem – nižší než $1,01 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$
- d) s určitým tlakem ochranných plynů.

Rozdělení podle způsobu vakuování:

- a) s úplným vakuováním svařovaných součástí
- b) s částečným vakuováním svařovaných součástí
- c) s místním vakuováním svařovaných součástí.

2.4.2. Dělení podle tepelného zdroje a způsobu ohřevu

Stejně jako u jiných typů svařování je při difúzním svařování nutný ohřev spojovaných součástí na určitou teplotu. Velikost této teploty, v závislosti na druhu materiálu, tvaru a jeho rozměrech, určují druh tepelného zdroje. Při difúzním svařování ve vakuu se používá několik typů tepelných zdrojů, které mohou vyvinout různě vysoké teploty. Podle způsobu přeměny elektrické energie v teplo je lze rozdělit do následujících kategorií:

1) Zařízení s indukčním ohřevem

Je jedním z nejčastějších druhů ohřevu vůbec, a to jak v průmyslu, tak i ve výzkumu. Je vyvinuto přes 40 druhů těchto zařízení a z toho je přibližně 90 % univerzální a zbytek speciální. Zdrojem tepla je ve většině případů vysokofrekvenční generátor, který je schopen docílit teplot přes $1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

2) Zařízení s ohřevem elektronovým paprskem

Zařízení tohoto typu obsahují elektronové optické soustavy. Bývají většinou 3 pootočené o 120° a jsou umístěné vně pracovní komory. Soustava obsahuje napájecí blok, vysokonapěťový usměrňovač, blok řízení napětí pro ovládání elektronických děl, ohniskovou a vychylovací soustavu pro směřování svazku paprsků a nastavení intenzity paprsku. Přivádí se stejnosměrné a střídavé napětí k dosažení pohybu elektronového svazku. Tento způsob ohřevu umožňuje poloautomatickou výrobu a musí mít speciální ochranu proti vlivu rentgenového záření.

3) Zařízení s radiačním (sálavým) ohřevem

Toto zařízení je vhodné pro cyklický způsob práce a zdrojem tepla je tyč nebo tenkostěnný válec např. z wolframu, niobu nebo molybdenu, který sálá teplo protékáním elektrického proudu (stejně jako u žárovky). Zařízení pro difúzní svařování tohoto typu vytváří velice kvalitní spoj a slouží ke spojování poměrně malých součástí s citlivým teplotním spádem, jako je keramika nebo sklo.

4) Zařízení s využitím sluneční energie

Toto zařízení používá k ohřevu koncentrátory a heliostat. Parametry pece umožňují lokální ohřev přes 3000 °C. Intenzitu sluneční energie lze měnit zatemňováním zrcadla nebo posunem vzorku mimo ohniskovou vzdálenost. Specifikem tohoto druhu pece je to, že vzorek je ohříván pouze z jedné strany, proto jsou nejvhodnější vzorky, které lze při ohřevu otáčet. Lze předpokládat, že při difúzním svařování s tímto druhem ohřevu, bude svařování některých dvojic prokazovat lepší výsledky, než při ohřevu elektrickém, protože jde o svařování bez působících vlivů.

5) Zařízení s odporovým ohřevem

Při tomto druhu svařování je zdrojem tepla svařovací transformátor. Elektrický proud prochází svařovanými součástmi a tím je ohřívá. Je tedy zřejmé, že součástky musí být elektricky vodivé. Nejčastěji se tento druh svářecího zařízení používá při svařování membránových komor z různých materiálů.

6) Zařízení s ohřevem v plynném prostředí

Trendem poslední doby je při difúzním svařování používání oxidu uhličitého. Oxid uhličitý výrazně zlevňuje celý svářecí proces. Na rozdíl od ostatních tedy zařízení obsahuje nádrž na ochranný plyn a rozvod tohoto plynu. Ochranný plyn prochází ze zásobníku, reduktorem a sušičkou do svařovací komory, kdy vytěsňuje vzduch. Druh tohoto zařízení se nejčastěji uplatňuje při svařování nepříliš náročných výrobků z mědi, niklu, olova a ocelí se středním a nízkým obsahem uhlíku. Svařují se trubky a pruty do průměru 50 mm.

2.4.3. Dělení podle druhu silové soustavy

Dalším rozdělením zařízení je dělení podle druhu silové soustavy. To jsou zařízení, která vytváří požadovaný tlak na vzorky v pracovní komoře. Ty jsou děleny na: hydraulické, pneumatické, mechanické, tepelné, kombinované, s vibrací (za použití ultrazvuku) nebo s využitím elektrických kmitů. Tlaky, které jsou potřeba při svařování

a tyto zařízení je vytvářejí, se pohybují řádově v rozmezí od 0 do 20 MPa, případně i více. Nejčastěji používané jsou ústrojí hydraulická nebo mechanická. Tepelné soustavy jsou v podstatě obyčejné vakuové nebo plynové pece.

2.4.4. Ostatní dělení

Existuje ještě mnoho dalších možností, jak rozdělit zařízení pro difúzní svařování. Jako další bychom mohli uvést rozdělení podle:

Počtu vakuových komor - dělíme je na jednokomorové a vícekomorové. Díky více komorám lze lehce zvýšit produktivitu a snížit koeficient vytíženosti tepelných a dalších zdrojů. Na jednom zařízení se většinou nachází dvě až tři komory.

Počtu míst ve vakuové komoře – zařízení jsou dělena na jednomístná a vícemístná. Vícemístná zařízení umožňují svařovat několik vzorků najednou a výrazně tak zvýšit produktivitu celého procesu. Používají se zařízení se dvěma až čtyřmi pracovními místy. Víc míst není vhodné použít, protože s rostoucím počtem míst, roste také nerovnoměrnost ohřevu.

Stupně automatizace – zařízení se pak dělí na zařízení s ručním, poloautomatickým a automatickým programovým řízením. Nejčastěji se vyskytují s ručním a poloautomatickým řízením, přičemž zařízení mohou být stacionární nebo pohyblivé.

Uvedená rozdělení nejsou kompletní. Je ještě mnoho dalších rozlišovacích znaků zařízení pro difúzní svařování, jelikož na materiály ve vakuové technice jsou kladeny různé nároky. [5]

2.5. Kontrola kvality spoje

Posledním krokem před praktickým využitím výrobku je kontrola kvality vytvořeného spoje. Jelikož je difúzní svařování poměrně stálé tzn. vzorky nebo výrobky jsou vyrobené jen s nepatrnými rozdíly, má výsledný produkt i při kontrole kvality jen nepatrné rozdíly, pokud jsou zachovány základní parametry (teplota, tlak, doba svařování, hodnota vakua a příprava vzorků). Takto vytvořené produkty projevují odchylky do 5 %. Kontrola svarových spojů probíhá většinou pomocí mechanických zkoušek, jako je pevnost v tahu, pevnost v ohybu, vrubová houževnatost a další.

Samotný proces difúzního svařování nemůže být z důvodu kontroly přerušen, proto celý proces kontrol probíhá buďto před anebo po svařování. Při svařování je možné pouze kontrolovat, jestli jsou dodržovány základní parametry při svařování a tím

odhadnout případné chyby v procesu. Defekty svarového spoje mohou vzniknout několika způsoby, jak je uvedeno v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Příčiny vzniku defektu [5]

Defekt	Základní příčina vzniku defektu
Neprovažené místo	Nedostatečný ohřev, doba svařování, vakuum Nesprávná konstrukce svařovaného přípravku nebo špatné ustavení ve svařovací komoře Nedostatečná příprava svarových ploch
Trhliny	Velká rychlost ohřevu, ochlazování. Vysoká teplota, tlak nebo doba svařování, nedostatečná příprava svarových ploch
Deformace po svařování	Přílišná velikost ohřevu, tlaku nebo doby svařování
Natavení	Přílišná velikost ohřevu nebo doby svařování Nesprávná konstrukce zdroje ohřevu nebo jeho polohy vzhledem k součástem
Přesazení	Nevhodný svařovací přípravek nebo jeho špatné ustavení ve svařovací komoře. Vibrace svařovacího zařízení

Nejčastějším defektem bývají neprovažená místa nebo lepené spoje, protože vznikají z mnoha příčin, které jsou poměrně těžko zjistitelné (např. znečištění svarových ploch mazivem, které proniklo do svařovací komory). Analyzování vzniklých vad a jejich přiřazením k určitému stádiu (od přípravy vzorku po konečný svarový spoj) usnadňuje jejich budoucí odstranění. [5]

2.6. Příklady použití difúzního svařování ve světě

Dnes ve světě běžně používané difúzní svařování přináší celou řadu výhod. Především pak při svařování vysokotavitelných kovů (Mo, W, Ta, Nb), materiálů s vysokou tvrdostí (vysokolegované oceli) a kovů s vysokou afinitou ke kyslíku (Al, Mg, Ti). Takovéto kovy se běžnými způsoby svařují obtížně, nebo svar nedosahuje potřebných kvalit, a proto se volí difúzní svařování. Také jde o jedinou metodu, při které lze svařit kovy s nekovy, jako jsou keramika, grafit, nebo sklo. Tématem bakalářské práce je difúzní svařování heterogenního spoje titanu s vysokolegovanou ocelí, proto zde bude uvedeno několik příkladů podobného charakteru nalezených v rámci rešerše.

Nejčastěji používanou slitinou Ti ve světě je Ti-6Al-4V. Proto se většina článků zabývá právě jí. Používá se v leteckém, kosmickém, průmyslu i v medicíně např. jako

implantáty. Největší výhodou této slitiny je její korozivzdornost. Další slitiny titanu jsou Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo a Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo – pro použití za vyšších teplot.

Ve článku nazvaném „**Optimalizace procesních parametrů difúzního svařování slitiny titanu a nerezové oceli**“ uvedeném v časopise International Journal of Engineering Research and Science & Technology (IJERST) se autoři zabývají difúzním svařováním slitiny titanu Ti-6Al-4V a nerezové oceli 304L. Přesný popis chemického složení prvků je uveden v tabulce 2.4. Vzorky z uvedených materiálů byly difúzně svařeny s rozdílnými parametry (čas, teplota, tlak) a následně podrobeny mechanickým a metalografickým zkouškám.

Samotné svařování probíhalo za teplot od 750 do 850 °C, při tlaku od 5 do 15 MPa a dobou svařování na ustálené teplotě od 60 do 120 minut. Vzorky byly obráběny do rozměrů o průměru 40 mm, délce 20 mm a dotýkající plochy leštěny diamantovou pastou. Vstupní data experimentu byla zvolena na základě dílčích experimentů a na základě některých základních teorií nebo hypotéz.

Tabulka 2.4: Chemické složení z obecných kovů [7]

Slitina	Jednotky	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Fe	Al	V	Ti
Ti-6Al-4V	%	0,03	-	-	-	-	-	-	0,01	-	0,05	6,33	4,32	Bal
304L	%	0,03	0,36	1,58	0,03	0,02	18,37	0,13	8,28	0,03	bal	-	-	-



Obrázek 2.7: Ultrazvukový C-Scan [7]

Mechanické a metalografické zkoušky (zkoušky pevnosti svaru) byly prováděny na ultrazvukovém C-Scanu (obrázek 2.7), což je nedestruktivní zařízení, které vysílá

ultrazvukové vlny na svarový spoj, ty se odrazí a podle intenzity odražených vln se určí kvalita spoje. Z provedených měření byly získány hodnoty meze pevnosti v tahu. Různé výsledky meze pevnosti pro různé vstupní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.6. Z hodnot vyplývá, že nejlepší meze pevnosti v tahu (235 MPa) bylo docíleno při svařovacím čase 60 minut, tlaku 15 MPa a teplotě 800 °C. [7]

Tabulka 2.5: Mez pevnosti v tahu pro difúzní svaření slitiny titanu a nerezové oceli [7]

Pokus č.	Teplota (°C)	Tlak (MPa)	Čas (min)	Mez pevnosti v tahu (MPa)
1	750	5	60	198
2	750	10	90	164
3	750	15	120	175
4	800	5	90	142
5	800	10	120	68
6	800	15	60	235
7	850	5	120	85
8	850	10	60	163
9	850	15	90	148

Další příspěvek pochází opět z časopisu „International Journal of Recent Trends in Engineering“. Jde o svařování komerčně čistého titanu a tvrzené kalené nerezové oceli (PH SS). Přesné chemické složení je uvedeno v tabulce 2.7. Tentokrát bylo svařování provedeno při tlaku 3,5 MPa a době svařování 60 minut, s rozdílnou hodnotou expoziční teploty od 800 do 1000 °C, vždy po 50 °C. Hodnota vakua se pohybovala od 4 do $6 \cdot 10^{-3} Pa$. Svařovaly se vzorky o průměru 15 mm a délce 30 mm, které byly válcovány za tepla. Titan byl žhán při 700 °C a ocel prodělala proces rozpouštěcího žhání a stárnutí při teplotě 1050 °C a následně popouštění při teplotě 450 °C. Tyto procesy stanovily materiálům mechanické hodnoty uvedené v tabulce 2.8. Vzorky byly před svařováním broušeny diamantovou pastou a očištěny acetonem.

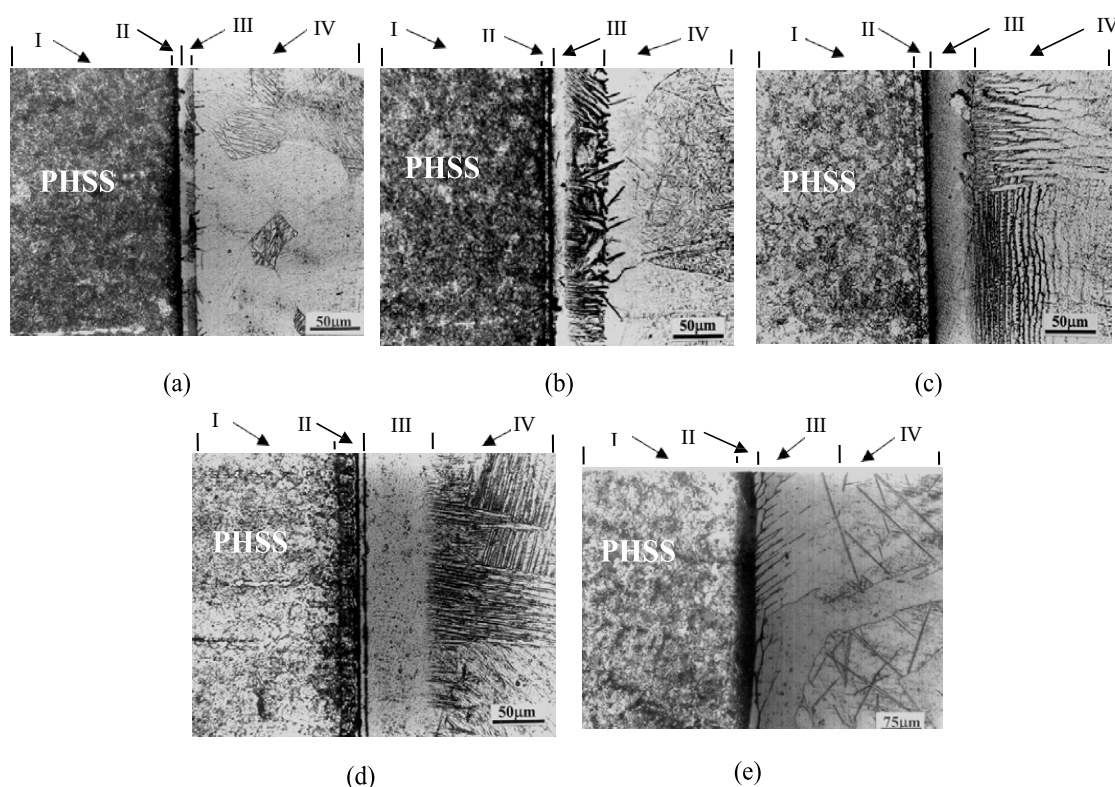
Tabulka 2.6: Chemické složení z obecných kovů [8]

Slitina	Jednotky	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13
		C	Fe	Ti	Mn	Si	S	Cr	Ni	Cu	O	N	H
cp Ti	%	0,02	0,10	bal	-	-	-	-	-	-	0,15	0,02	0,0011
PH SS	%	0,044	bal	-	0,52	0,33	0,011	16,4	4,13	3,12	0,31	-	-

Tabulka 2.7: Mechanické pevnosti materiálů [8]

Slitina	Mez pevnosti ve smyku [MPa]	Smluvní mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]
cp TI	297	205	319
PH SS	716	1033	1098

Po svařování opět následovalo mechanické a metalografické vyhodnocení. Na obrázku 2.8 je ukázána struktura spoje a v tabulce 2.9 jsou uvedeny pevnostní vlastnosti spoje pro různé teploty.



Obrázek 2.8: Metalografická struktura svaru (a) 800 °C (b) 850 °C (c) 900 °C (d) 950 °C (e) 1000 °C [8]

Oblast „I“ na obrázku 2.12 označuje martenzitickou fázi s malým objemovým podílem feritu mateřské fáze. Oblast „II“ je oblast obsahující kombinaci různých intermetalických fází. Oblast „III“ pak obsahuje stabilní fázi β -titanu a oblast „IV“ je tvořena fází α - β titanu. [8]

Tabulka 2.8: Pevnostní parametry svaru titanu a oceli [8]

Svařovací teplota (°C)	Pevnost ve smyku (MPa)	Mez pevnosti v tahu (MPa)
800	123,1 ± 1	165 ± 4
850	173,4 ± 4	238 ± 5
900	197,7 ± 2	275 ± 6
950	260,1 ± 4	344,3 ± 4
1000	224 ± 5	310,5 ± 1

Jak je zřejmé z tabulky 2.9, nejvhodnější svařovací parametry pro tyto materiály byly při teplotě 950 °C, tlaku 3,5 MPa a doba svařování 60 minut. Za těchto hodnot dosáhl svar 260,1 ± 4 MPa pevnosti ve smyku a 343 ± 4 MPa meze pevnosti v tahu. Titan Grade 2 má například mez pevnosti v tahu kolem 485 MPa tzn., že svar zdaleka nedosáhl pevnosti v tahu, jako má titan samotný.

3. Difúzní svařování na simulátoru Gleeble

Teplotně-napěťový simulátor Gleeble od americké společnosti Dynamic Systems Inc. je jedním z nejpoužívanějších systémů svého typu na světě. V předchozích letech systém využívaný především v Americe a Japonsku se stále více rozšiřuje také do Evropy, Ruska a hlavně Číny. Na simulátoru Gleeble lze testovat mnoho druhů teplotně mechanických a metalurgických stavů materiálů a výsledky následně použít pro numerické simulace, nebo pro optimalizaci výrobních postupů. Přístroj dokáže simulovat například objemové tváření a válcování za tepla, dále simulace tepelného zpracování a svařování, kontinuálního lití, teplotně-napěťovou únavu a mnoho dalších.

Zařízení Gleeble dokáže simulovat teplotně mechanické zatížení a to jak během zpracování, tak i při následných provozních podmínkách, což je jeho velkou výhodou. Systém Gleeble lze použít nejen ke konkrétním výzkumům, ale i ke kontrole produkce a vyhodnocení její kvality. Všechny potřebné a uživatelem zadané veličiny jsou zaznamenávány, přičemž některé veličiny jsou použity ke zpětnému řízení testů.

V laboratořích Technické univerzity v Liberci se nachází přístroj Gleeble 3500, který byl pořízen v roce 2013 a jde o druhé zařízení v České Republice podobného typu.

3.1. Simulátor Gleeble 3500

Simulátor Gleeble, který se nachází na Technické univerzitě v Liberci, se skládá z několika hlavních částí tj. ovládací (řídící) panel, hlavní jednotka (obsahuje hydrauliku a transformátor pro ohřev) a samotné testovací zařízení, tak jak je ukázáno na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Simulátor Gleeble 3500 [9]

Zařízení je schopno vzorky ohřát rychlostí $10000\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ a při testování vzorků o malém průměru lze dosáhnout i poměrně vysoké rychlosti ochlazení (kolem $6000\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$). Vzorky, které lze v zařízení testovat, musejí být do průměru 20 mm, nebo s plochou průřezu do 400 mm^2 . Maximální rychlost posuvu vzorku je $1\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a zdvih je možný do 100 mm.

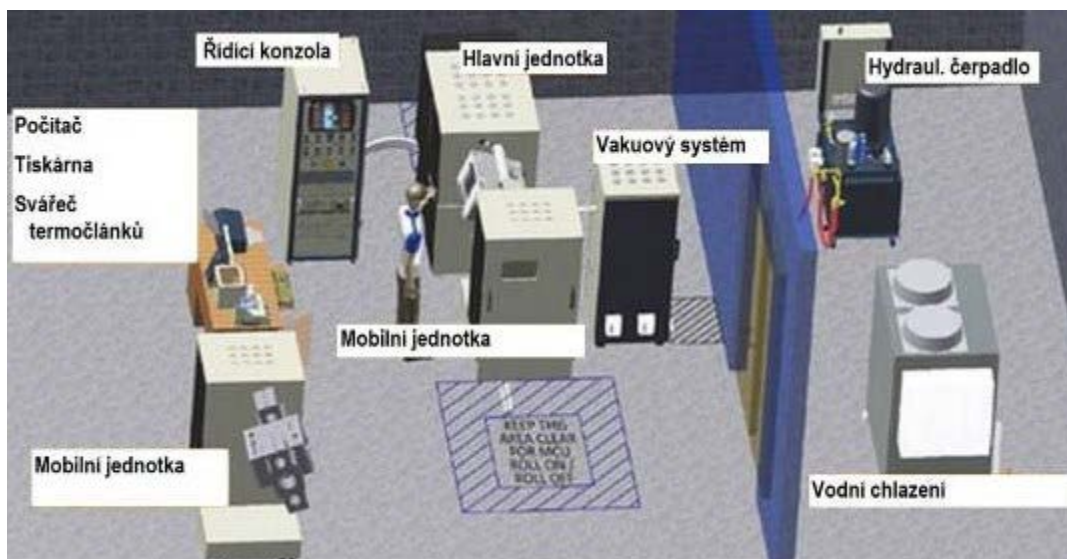
V tabulce 3.1 je uveden souhrn nejčastěji používaných průmyslových aplikací, které lze na systému Gleeble testovat. Systém Gleeble lze také použít pro studium dějů za zvýšených teplot, jako je difúze, tání, tuhnutí nebo relaxace. Pro každou simulaci je rozdílný maximální průřez vzorku nebo druh upínacích čelistí.

Tabulka 3.1: Průmyslová aplikace simulátoru Gleeble 3500 [9]

Oblasti aplikace	Zaměření testu
Simulace svařovacích procesů	Tepelně ovlivněná oblast
	Test maximální teploty, při níž se pevnost blíží k nulové hodnotě
	Test na zjištění náchylnosti k trhlinám
	Simulace laserového svařování
	Zjištění porušení tupých svarů
Únavové testy	Teplotní únava materiálu
	Tepelně mechanická únava materiálu
Simulace tepelných procesů	Analýza pevnost v tahu za vyšších teplot
	Analýza pevnost v tlaku za vyšších teplot
	Testování a simulace plošných zatížení
	Simulace válcování za tepla
	Simulace kontinuálního lití
	Simulace tání a tuhnutí

3.2. Základní součásti systému Gleeble

Celý testovací systém není tvořen pouze jedním zařízením, jak je vidět na obrázku 3.2, ale je tvořen hlavní jednotkou, ovládacím panelem, hydraulickým čerpadlem, mobilní jednotkou pro teplotně-mechanické testy, vakuovým systémem a kompresorem pro stlačený vzduch a kondenzátorovou svářečkou pro přivařování termočlánků.



Obrázek 3.2: Rozmístění testovacího systému Gleeble [9]

Většinu hydraulické práce zastane hlavní jednotka, k níž je připojena mobilní jednotka a ovládací panel s hardwarem i softwarem pro řízení a ovládání celého systému. Dále následuje hydraulické čerpadlo pro udržení dostatečného tlaku v hydraulické jednotce, vakuový systém schopný dosáhnout vakua ve vakuové komoře vyšší než 10^{-1} Pa.

Systém dokáže snímat maximálně čtyři kanály, tzn. osm mechanických dat. Konkrétně maximálně čtyři termočlánky, nebo tři termočlánky a jeden pyrometrický kanál. Detail je ukázán na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Zapojení termočlánků ve čtyřech možných kanálech [9]

3.3. Systémy přístroje Gleeble 3500

Přístroj Gleeble má dva oddělené systémy, které lze používat samostatně, nebo ve vzájemné kombinaci. Jedná se o teplotní systém pracující na principu elektrického

odporu a o mechanický (hydraulický) systém využívající vysokorychlostních ventilů pro regulaci rychlosti deformace.

3.3.1. Teplotní systém

Simulátor Gleeble umožňuje vytvoření širokého spektra teplotních profilů. Dokáže vytvořit gradienty s vysokou strmostí, ale i poměrně ploché gradienty. V tabulce 3.4 jsou ukázány příklady rychlosti ohřevu pro volnou délku vzorku 10 mm.

Tabulka 3.2: Závislost rychlosti ohřevu na zatížení a průměru vzorku [9]

Rychlost ohřevu vzorku	
Zatížení v tahu, průměr 6 mm	10000 °C · s ⁻¹
Zatížení v tahu, průměr 10 mm	3000 °C · s ⁻¹
Zatížení v tlaku, průměr 6 mm	50 °C · s ⁻¹
Zatížení v tlaku, průměr 10 mm	5 °C · s ⁻¹

Pro rychlost ochlazování existují dvě možnosti, neřízené (free cooling) a řízené (programované) ochlazování. Pro neřízené ochlazování se využívá odvodu tepla ze vzorku pomocí vysokoteplotních čelistí při vypnutém transformátoru. Řízené ochlazování je kombinací ochlazování vzorku čelistmi a ohřevu vzorku transformátorem. Při požadavku vyšších ochlazovacích rychlostí než jsou dosaženy při volném chlazení, jsou aplikována dodatečná ochlazování pomocí stlačeného vzduchu, nebo vodou. Nejvyšší rychlosti je dosaženo kombinací stlačeného vzduchu a vody. Volné chlazení (free cooling) závisí na typu a materiálu vysokoteplotních čelistí, na tepelné vodivosti ochlazovaného vzorku a na volné délce vzorku. Příklad dosažené rychlosti ochlazování při použití měděných čelistí s plným kontaktem je ukázán v tabulce 3.5.

Tabulka 3.3: Ochlazovací rychlosti při řízeném free coolingu [9]

Řízené volné ochlazování	
Povrch vzorku o Ø 6 mm	330 °C · s ⁻¹ v intervalu 1000 °C až 800 °C
	200 °C · s ⁻¹ v intervalu 800 °C na 500 °C
Povrch vzorku o Ø 10 mm	140 °C · s ⁻¹ v intervalu 1000 °C až 800 °C
	78 °C · s ⁻¹ v intervalu 800 °C na 500 °C

Pomocí elektrického odporu lze dosáhnout rychlosti ohřevu 10 000 °C · s⁻¹, ale také velmi dobré regulace při výdrži na teplotě nepřesahující ± 1 °C. Za pomoci dodatečných zařízení, lze v simulátoru Gleeble na povrchu vzorku dosáhnout rychlosti ochlazení až 6000 °C · s⁻¹. Pro řízení rychlosti ohřevu nebo chlazení je zapotřebí dostatečně rychlá

odezva, kterou je získána ze zpětné informace z řídicího termočlásku, nebo z pyrometru.

Systému Gleeble umožňuje použít několik typů termočlásků (E, K, R, S, a B), z toho najednou až 4 druhy, ovšem pouze jeden řídicí. Druh termočlásku závisí na rozsahu teplot měření, viz tabulka 3.6. Používají se termočlásky o průměru 0,25 mm, který se navaří na střed vzorku z důvodu dosažení rovnoměrného teplotního gradientu, který má své maximum uprostřed, v místě řídicího termočlásku. Vlivem difúze může při výdrži na vyšších teplotách u termočlásků docházet k chybám v měření teploty. Pro účel difúzního svařování, kdy teplota nepřesáhne 1250 °C, postačí termočlánek typu K, který je nejčastěji používaným typem termočlásku při testech ve vakuu.

Tabulka 3.4: Typy termočlásků a jejich teplotní rozsahy [9]

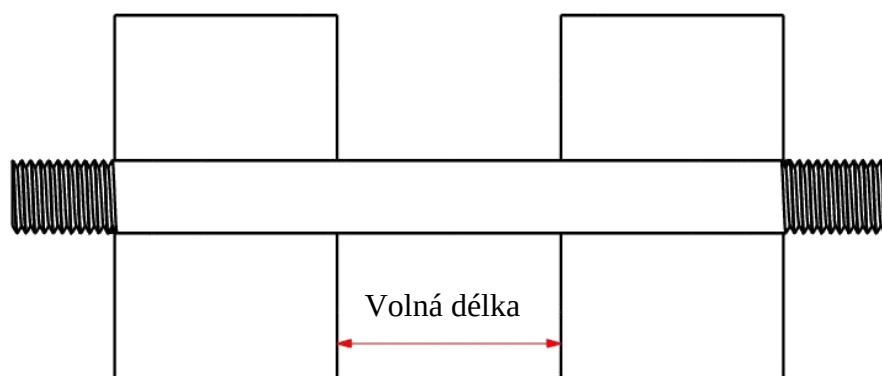
Typ termočlásku	Popis	Provozní rozsah
Typ K	Ni-Cr (+) vs. Ni-Al (-)	0 – 1250 °C
Typ S	Pt-10%Rh (+) vs. Pt (-)	0 – 1450 °C
Typ R	Pt-13%Rh (+) vs. Pt (-)	0 – 1450 °C
Typ B	Pt-30%Rh (+) vs. Pt-6%Rh (-)	0 – 1700 °C
Typ E	Cu-Ni (+) vs. Ni-Cu (-)	0 – 900 °C

3.3.2. Mechanický systém

Simulátor Gleeble 3500 také nabízí výkonný hydraulický pohon schopný dosáhnout rychlosti posuvu až $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a síly 100 kN. Nikdy ovšem není možné dosažení maximálního posuvu a zároveň maximální síly. To platí obecně pro všechny hydraulické zařízení. Systém je schopný pohybu příčnicku po dráze 150 mm a ke snímání rychlosti využívá vysokorychlostní optické vazby. Pro konstantní deformaci musí být čas deformace větší než 0,18 s, z důvodu odezvy materiálu, nebo v případě konstantní rychlosti může být minimální čas deformace 0,060 s. Systém je schopný dosáhnout poměrně vysoké síly při vysoké rychlosti posuvu.

3.3.3. Teplotní gradient a vysokoteplotní čelisti

Systém Gleeble je schopen při simulacích kontrolovat rovnoměrnost teploty ohřevu, tedy teplotní gradient. Na teplotní gradient má vliv mnoho faktorů – druh materiálu vzorku, jeho tepelný a elektrický odpor, poměr povrchu a objemu, délka vzorku, průřez a volná délka (vzdálenost mezi okraji kontaktů čelistí, jak je vidět na obrázku 3.4) atd. Obecně tedy platí, že čím kratší je kontakt mezi upínacími čelistmi a vzorkem, tím rovnoměrnější pak je teplotní gradient ve vzorku.



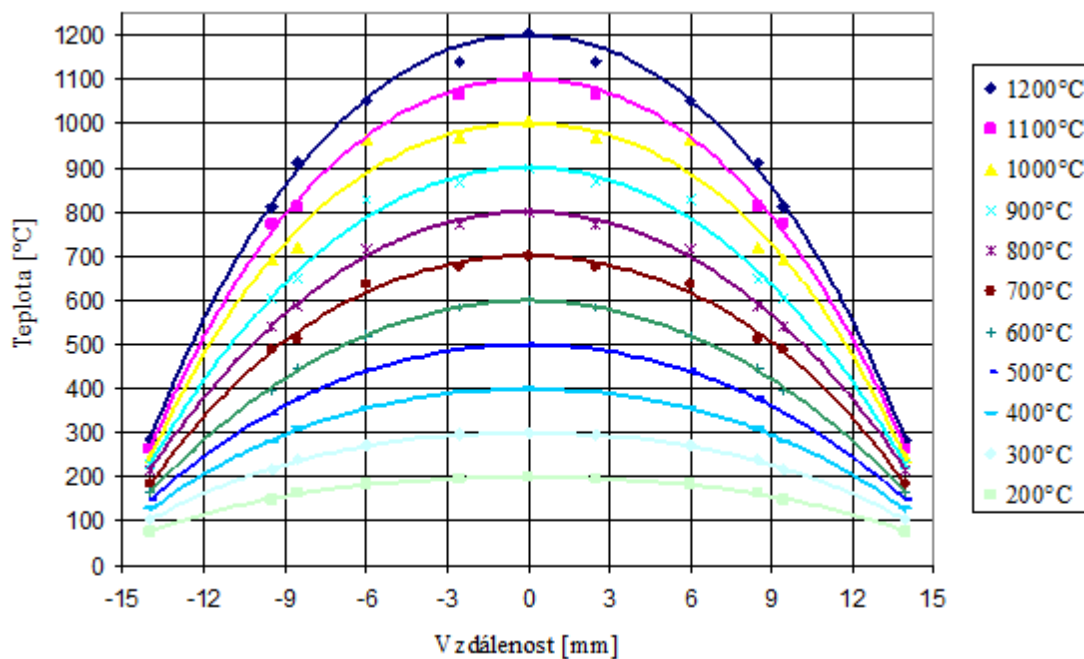
Obrázek 3.4: Volná délka vzorku s čelistmi s plným kontaktem [9]

Velký vliv na teplotní Gradient a odvod tepla mají vysokoteplotní čelisti. Čelistí existuje mnoho druhů a tvarů. Je třeba tedy myslet na to, do jakých teplot se budou používat, jaké budou síly a rychlosti ohřevu, tvar vzorku atd. Nejčastěji se užívají čelisti z mědi (Cu 99%) a austenitické oceli (X5CrNi18-8). Mají rozdílnou tepelnou vodivost a tak je možné u stejného vzorku získat rozdílný teplotní gradient. Čelisti lze ještě dělit na čelisti s plným kontaktem nebo s částečným kontaktem. Ukázka různých typů čelistí je na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Čelisti s úplným i částečným kontaktem z mědi a oceli pro různé tvary vzorků [9]

Na obrázku 3.6 můžeme vidět teplotní gradient na volné délce 30 mm vzorku z oceli S35J2 o průměru 10 mm. Byly použity měděné čelisti s plným kontaktem, a jak vidíme, je teplotní pole velice nerovnoměrné a s rostoucí teplotou strmost teplotního gradientu stoupá. Takovýto teplotní gradient je ale při difúzním sváření žádoucí, termočlánky jsou přivařeny co nejblíže středu a tak má vzorek nejvyšší teplotu právě v místech přiblížených ploch. Zbytek vzorku je pak téměř teplotně neovlivněn. [9]



Obrázek 3.6: Teplotní gradient na volné délce vzorku z oceli S355J2 za použití měděných čelistí s plným kontaktem pro rozmezí teplot 200 až 1200 °C [9]

4. Experimentální část

Experimentální část práce byla zaměřena na nalezení procesních parametrů vedoucích k co největší pevnosti heterogenního spoje mezi čistým titanem Grade 2 a austenitickou vysokolegovanou ocelí 316L. Úspěšným řešením by se výrazně snížila heterogenita v oblasti svarového spoje, což by mělo mít příznivý vliv na životnost takových spojů.

4.1. Titan Grade 2

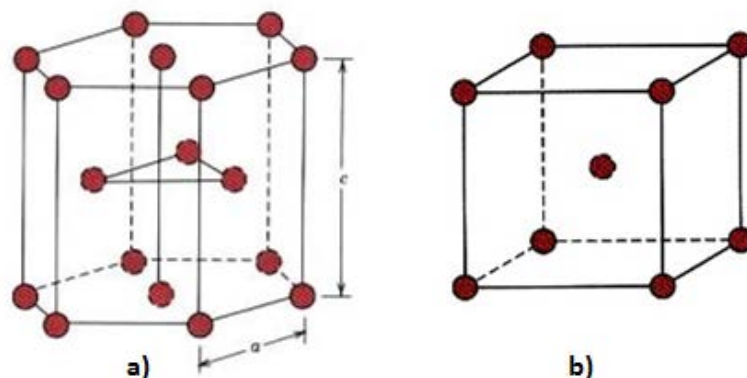
Titan byl objeven v roce 1791 chemikem Williamem Gregorem a to na minerálu zvaném ilmenit (FeTiO_3). Surový titan byl ovšem připraven až v roce 1887 švédskými chemiky Larsem Nilsonem a Svenem Petterssonem a čistý titan dokonce až v roce 1910. O jeho průmyslovou rafinaci se zasloužil lucemburský metalurg Dr. William Justin Kroll a umožnil tak jeho masové rozšíření v technice.

Jde o polymorfní kov stříbro-šedé barvy s hustotou $4,506 \text{ g/cm}^3$, teplotou tání $1668 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplotou varu $3287 \text{ }^\circ\text{C}$. Čistý titan je poměrně tvárný, křehký a na vzduchu stálý. Při teplotě $150 \text{ }^\circ\text{C}$ reaguje s fluorem za vzniku fluoridu titaničitého (TiF_4) a při teplotě $300 \text{ }^\circ\text{C}$ s chloridem za vzniku chloridu titaničitého (TiCl_4). Má vysokou afinitu k uhlíku a křemíku a snadno se tak slučuje na karbid (TiC) a silicid (TiSi_2). Hlavní překážkou při svařování titanu je fakt, že titan za teplot nad $700 \text{ }^\circ\text{C}$ (spíše již od $500 \text{ }^\circ\text{C}$) začne pohlcovat plyny (kyslík, dusík), a zvyšuje si tak pevnost a tvrdost na úkor tažnosti a křehkosti. To zapříčiňuje strukturní změny a tvorbu trhlin. Má poměrně nízkou tepelnou vodivost a nízký koeficient tepelné roztažnosti. To má za následek dobrou svařitelnost, pokud není titan nijak znečištěn. Již poměrně malé množství nečistot, které se do čistého titanu dostaly při jeho výrobě, do značné míry ovlivňují jeho vlastnosti.

Titan se při pokojové teplotě vyskytuje v α -modifikaci, která má hexagonální mřížku s těsným uspořádáním (obr. 4.1). Při teplotě přibližně $882 \text{ }^\circ\text{C}$ dochází k alotropické přeměně na β -modifikaci s kubickou prostorově centrovanou mřížkou (obr. 4.1) a v této modifikaci titan setrvává až do teploty tání. Vykazuje paramagnetické chování a za vysokých teplot nepříznivou afinitu ke kyslíku a dusíku. Vznikají oxidy a nitridy, které sice zvýší tvrdost titanu, ale mají nepříznivý vliv na jeho křehkost.

Využití titanu je rozsáhlé, především pak ve zbrojním, leteckém, lékařském, sportovním a dokonce i ve šperkařském průmyslu. Svařitelnost titanu je dobrá za předpokladu,

že svarová lázeň popřípadě tepelně ovlivněná oblast je dokonale chráněna před nežádoucími účinky atmosféry nebo nežádoucími plyny, inertním plynem nebo vakuem. [10,11,12]



Obrázek 4.1: Hexagonální mřížka s těsným uspořádáním (a) a kubická prostorově centrovaná mřížka (b) [13]

Jednou z možností svařování jsou metody WIG a MIG, kdy svařování probíhá v ochranných komorách za použití argonu s vysokou čistotou (min. 99,9997 hm. %). Další metodou svařování vhodnou pro titan je svařování elektronovým paprskem. Krátkými svařovacími časy je sníženo riziko pohlčení plynů a zkřehnutí svaru. [11,14]

Pro difúzní svařování byl použit komerčně čistý titan (Titan Grade 2), který je nejvíce používaným druhem titanu ve všech formách polotovarů. Přesné složení titanu použitého při difúzním svaření je ukázáno v tabulce 4.1. Jeho fyzikální a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.1: Chemické složení Titanu Grade 2 (hmotnost %) (maximální hodnoty) [15]

O	N	C	H	Fe	Al	V	Ni	Mo	Rezidua
0,25	0,03	0,08	0,015	0,3	-	-	-	-	0,4

Tabulka 4.2: Fyzikální a mechanické vlastnosti Titanu Grade 2 [15]

Vlastnost	Hodnota
Bod tání, ± 15 °C	1660 °C
Hustota	4,51 g/cm ³
Beta fáze, ± 15 °C	910°C
Poissonova konstanta	0,34-0,40
Mez kluzu	350-450 MPa
Mez pevnosti v tahu	485 MPa
Tvrdost	160-200 HV
Modul pružnosti	103 GPa
Vrubová houževnatost Charpy	40-82 J

4.2. Ocel AISI 316L (X2CrNiMo17-12-2)

Ocel 316L patří mezi austenitické korozivzdorné oceli, konkrétně jde o chrom-nikl-molybdenovou ocel. Lze ji také nalézt pod označeními 1.4404, X2CrNiMo17-12-2, ČSN 17349, nebo AKV Extra 2.

Austenitické korozivzdorné oceli obsahují obecně více než 12 % Cr (až 30%) dále Ni, Mn, C a případně N. Dále mohou oceli obsahovat legury jako Mo, Ti, Ni, Cu a Si sloužící k získání dalších užitečných vlastností. Austenitické, se tyto oceli nazývají pro svou austenitickou strukturu, které dosahují za pokojových teplot i v celém rozsahu teplot až do teploty solidu. Tento druh oceli je sice odolný vůči korozním prostředím, při svařování se ale může projevit náchylnost na mezikrystalickou korozi. Při této náchylnosti, podle nejčastěji užívané teorie, dochází k precipitaci karbidů chromu v oblasti hranic zrn a to za teplot kolem 425 až 815 °C. Takováto ocel je pak v některých místech ochuzena o chrom a tudíž následně v těchto místech náchylná na korozi. Pro zvýšení odolnosti proti této korozi, a tedy snížení tvorby karbidů chromu, se snižuje množství uhlíku v oceli. Při tavném svařování se k eliminaci uvedených vlastností používají přídavné materiály s vyššími obsahy Nb a Ti. Chemické složení oceli 316L je uvedeno v tabulce 4.5.

Tabulka 4.3: Chemické složení oceli AISI 316L (hmotnost %) (maximální hodnoty) [16,17]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Co	P	S
0,03	1,0	2,0	18,5	13,0	2,2	1,0	0,11	0,19	0,045	0,03

Ocel 316L je využívána ve slaných prostředích, tedy v přímořských oblastech nebo v prostředí bazénů, ale také v pivovarnictví, mlékárnách a obecně v potravinářském průmyslu. Typickými výrobky pak jsou filtry, tepelné výměníky, kondenzátory, ventily, příruby a armatury. Je označována také jako chirurgická ocel využívaná na výrobu šperků a dalších ozdob, které jsou v přímém kontaktu s lidským tělem. Teplota likvidu oceli je dosažena při teplotě cca 1400°C a ocel může být na vzduchu provozována do teploty 870°C při přerušovaném provozu a do teploty 925°C při kontinuálním provozu. Mechanické vlastnosti oceli jsou uvedeny v tabulce 4.6. Ocel 316L má velice dobré vlastnosti při ohýbání a tažení, je dobře svařitelná a leštitelná. [16,18,19,20,21]

Tabulka 4.4: Fyzikální a mechanické vlastnosti AISI 316L [17]

Vlastnost	Hodnota
Teplota tání	1371 °C
Poissonova konstanta	0,25
Mez kluzu	290 MPa
Mez pevnosti v tahu	558 MPa
Tvrdost	160-200 HV
Modul pružnosti	193 GPa
Vrubová houževnatost Charpy	103 J

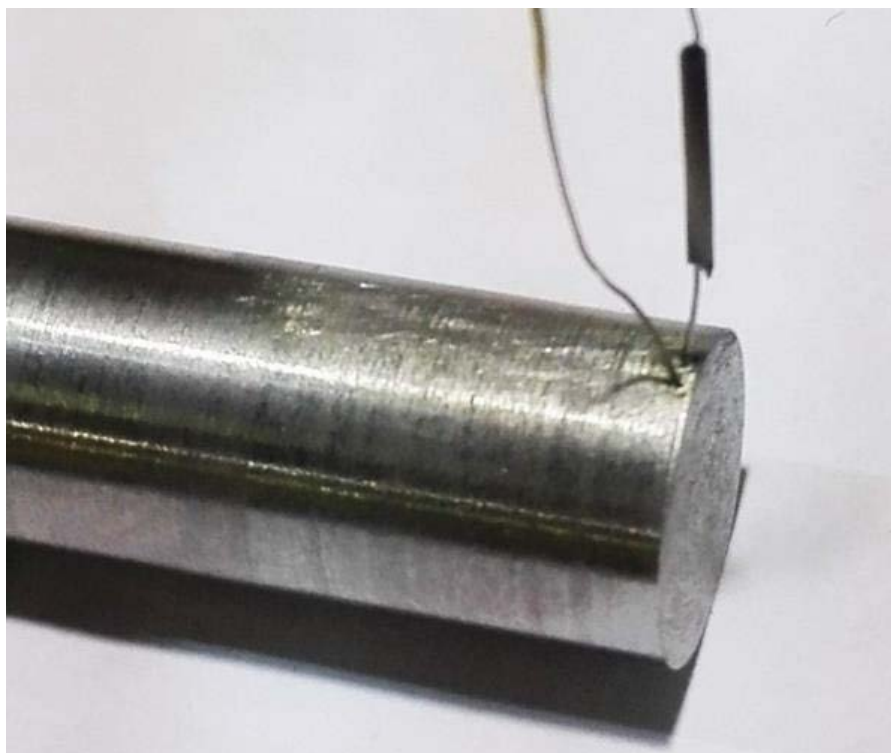
5. Difúzní svaření Titanu Grade 2 s ocelí 316L

V následující kapitole je popsán způsob hledání vhodných procesních parametrů pro difúzní svaření vysokolegované oceli 316L a titanu. Dále je zde popsán způsob přípravy vzorků, vlastní průběh celého procesu svařování až po mechanické a metalografické zkoušky výsledných vzorků a jejich vyhodnocení z hlediska kvality.

5.1. Příprava vzorku

Vzorky použité k experimentům měly tvar válečku o délce $l = 50$ mm a průměru $d = 12$ mm. Tyto vzorky vnikly řezáním a obráběním z tyčového polotovaru. Na čelních stykových plochách bylo jemným soustružením dosaženo průměrné drsnosti - ocel 316L $R_a = 1,14 \mu\text{m}$ a u Titanu Grade 2 pak drsnosti $R_a = 0,81 \mu\text{m}$.

Dalším krokem pro přípravu svařování je upevnění termočlánků typu K. Tyto termočlánky je nutno umístit co nejblíže spoji vzorků (tj. cca. 0,5 až 0,7 mm od hrany spoje). Vzorek musí být před připevněním termočlánku řádně očištěn a následně je termočlánek kondenzátorově přivařen na přístroji Thermocouple Welder při napětí 33 V. Připevněný termočlánek se skládá ze dvou částí (drátků) o průměru 0,25 mm a složené z Ni-Cr (+) a Ni-Al (-). Na jednom z těchto drátků je navíc navlečen izolant, aby nedošlo ke kontaktu. Příklad takového vzorku je zobrazen na obrázku 5.1. Tímto způsobem byly připevněny termočlánky vždy na vzorky z titanu, protože se titan při expozičních teplotách mnohem více deformoval. Extrémní případ nadměrné deformace titanu je ukázán na obrázku 5.2. V tomto případě došlo k přehrnutí titanového vzorku přes vysokolegovanou ocel.



Obrázek 5.1: Příklad přivaření termočládku na vzorek



Obrázek 5.2: Větší deformace titanové části vzorku (vlevo) a její přesun přes hranu oceli

5.2. Návrh a realizace první fáze experimentu

Správné podmínky a procesní parametry svařování byly určeny především z rešerše, vlastností kovů, teorií difúzního svařování a podle průzkumných pokusů ve světě. Byly zvoleny parametry teplota, tlak a čas.

Při difúzním svařování se volí teplota svařování v rozmezí 55 až 90 % teploty tání materiálu (pokud jsou materiály rozdílné, pak podle nižší teploty tání). Titan Grade 2 má teplotu tání přibližně 1660 °C a ocel 316L 1371 °C. Po jednoduchém matematickém výpočtu tedy bylo zjištěno, že teplota svařování by se měla pohybovat v rozmezí od 754 do 1234 °C. Pro první fázi experimentu byl navržen rozsah teplot od 845 °C do 1050 °C (viz tabulka 5.1.).

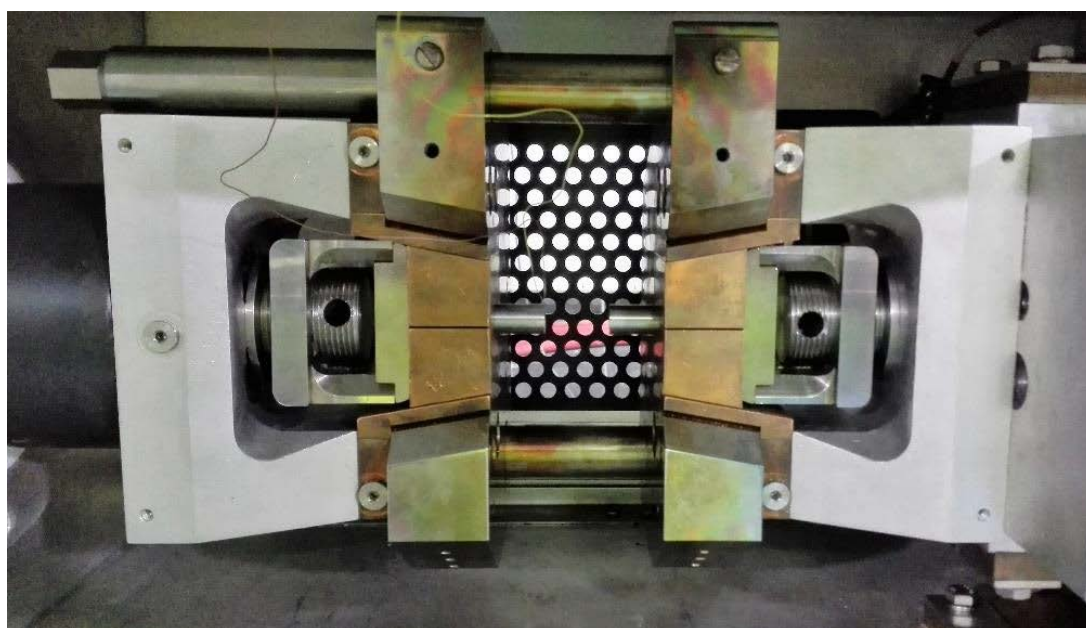
Systém Gleeble dokáže udržet ustálený tlak v celém průběhu svařování. Volí se podle druhu materiálu a to takový, aby došlo k potřebným lokálním plastickým deformacím, ale zároveň aby nedošlo k nadměrným deformacím případně až ke vzniku makrotrhlin. Pro první fázi experimentu byl zvolen tlak v rozmezí od 1,1 kN do 2,5 kN. Doba svařování pak byla stanovena jednotně 20 minut. Cílem první fáze bylo nalezení vhodného poměru hlavních procesních veličin (teploty, tlaku, času).

Tabulka 5.1: Plán experimentů realizovaný v první fázi testování

Označení vzorku	Teplota [°C]	Přítlačná síla [kN]	Čas [min]
T1050_F2,5_t20	1050	2,5	20
T1050_F1,5_t20	1050	1,5	20
T900_F1,1_t20	900	1,1	20
T845_F1,1_t20	845	1,1	20

5.2.1. Realizace experimentu

Po přípravě vzorků a připevnění termočlánků byly vzorky umístěny do měděných čelistí s plným kontaktem, které byly následně upnuty do upínacích čelistí přístroje Gleeble, tak jak je ukázáno na obrázku 5.3. Tyto čelisti byly použity při všech experimentech difúzního svařování a to z důvodu strmějšího teplotního gradientu a tím pádem i menšího teplotního ovlivnění vzorku.



Obrázek 5.3: Upnutí vzorků a kleštin ve vakuové komoře simulátoru Gleeble

Vzorek byl do upínacích čelistí vložen tak, aby jeho koncová plocha byla ve stejné rovině s koncovou plochou upínacích čelistí. Pak následovalo zafixování vzorku a upínacích čelistí pomocí šroubových rozpěrek tak, aby byl zaručen dostatečný přenos tepelné energie mezi vzorkem, čelistmi a zařízením, a zároveň nemohlo dojít k posunutí vzorku v průběhu experimentu. To by mělo za následek nesprávné měření plastických deformací, nebo v nejhorším případě i poškození kleštin.

Vlastnosti budoucího spoje mohou ještě negativně ovlivnit nečistoty, případně mastnota, proto je před spuštěním vakuování třeba dotykové plochy vzorků od případných nečistot očistit a odmastit etanolem. Očištěné a usušené vzorky byly následně mechanicky přiblíženy tak, aby došlo ke kontaktu čelních ploch. Následně byla komora vakuována do hodnot vakua kolem $1,8 \cdot 10^{-3}$ Torr.

K naprogramování procesu i celého zařízení Gleeble slouží software QuikSim2, pomocí něhož jsou stanoveny všechny vstupní parametry. Jde o jednoduchý tabulkový program, kde je definován rozsah veličin, čas jejich spuštění a délka jejich trvání. Lze také nastavit měřené veličiny a frekvenci jejich záznamu. Příklad nastavení programu je ukázán na obrázku 5.4. Jde o program pro difúzní svařování při teplotě 1050 °C na ustálené teplotě po dobu 20 minut, s přitlačnou silou 2,5 kN. Počátečních 5 sekund probíhal náběh systému, proto bylo nastaveno 20 °C a nulová přitlačná síla. Následujících 5 sekund byla teplota zvýšena na 25 °C, tentokrát již s přitlačnou silou. Teplota na ustálenou teplotu z pokojové teploty rostla rychlostí $2^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, tj. 8 minut a 32,5 sekund z teploty 25 na teplotu 1050 °C a to za neustálého působení přitlačné síly. Po uplynutí 20 minut přišlo na řadu ochlazení, které opět probíhalo rychlostí $2^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$. Závěrečných 10 sekund pak bylo určeno k dochlazení a ustálení bez přitlačné síly. Obdobným způsobem probíhaly všechny experimenty, pouze docházelo ke změnám veličin teploty, tlaku a času.

#	L	Time	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Comment
1		System	Setup	Limits: Compression=-70mm, Force=50000kgf, Heat=100% [table.gin]		
2		Stress/Strain	Engineering strain using Stroke, l = 39.00mm, d = 12.00mm			
3		Acquire	Force LGauge PowAngle PRam PTemp Strain Stress Stroke TC1			
4		*				
5		*				
6		*				
7		Start	☒ Mechanical	☐ High	☒ Thermal	
8		Mode	Force(kN)	Torsion(rev)	TC1(C)	
9		Sample	2.0Hz			
10		Zero	LGauge Stroke			
11		00:05.0000	0.0	0	20	
12		00:05.0000	- 2.5	0	25	
13		08:32.5000	- 2.5	0	1050	
14		20:00.0000	- 2.5	0	1050	
15		08:32.5000	- 2.5	0	25	
16		00:10.0000	0.0	0	25	
17						
18		End	☐ Mechanical	☐ High	☐ Thermal	

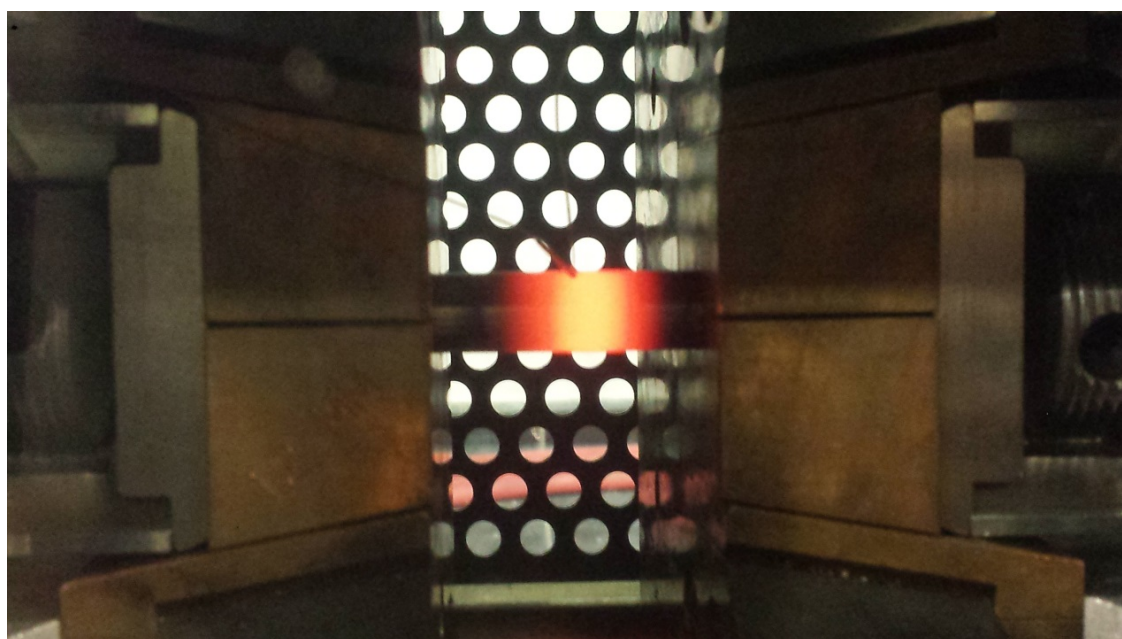
Obrázek 5.4: Nastavení svařovacích podmínek v programu QuikSim2

Kromě vstupních veličin je také třeba v programu QuikSim2 definovat parametry, které se budou zaznamenávat. V našem případě je zapotřebí zaznamenávat přítlačnou sílu (Force), prodloužení vzorku pomocí průtahoměru (LGauge), aktuální výkon transformátoru (PowAngle), programovaný pohyb příčnicku (PRam), programovaný teplotní cyklus (PTemp) poměrné prodloužení (Strain), napětí ve vzorku (Stress), prodloužení pomocí příčnicku (Stroke) a teplota řídicího termočlánku (TC1). Všechny tyto hodnoty se zaznamenávaly frekvencí 2 Hz k následnému vyhodnocení.

Samotný proces svařování je poměrně zdlouhavý a po celou jeho dobu je zapotřebí vizuální kontrola pro případ oddělení termočlánku nebo pro případ velké deformace. Největší riziko oddělení termočlánku nastává během ohřevu vzorku na svařovací teplotu, ale může se stát, že odpadne i během ustálených teplot. Na obrázku 5.5 je ukázána svařovací komora v průběhu svařování a na obrázku 5.6 pak detail difúzního svařování titanu s ocelí, přičemž titan se nachází vpravo.



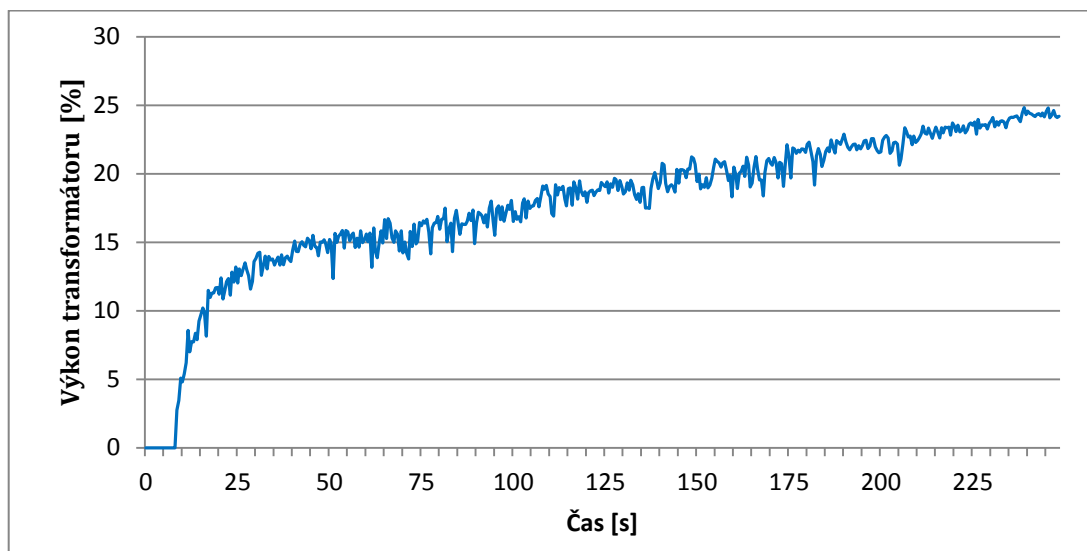
Obrázek 5.5: Svařovací komora během procesu difúzního svařování



Obrázek 5.6: Detail svařovaného titanu (vpravo) s ocelí

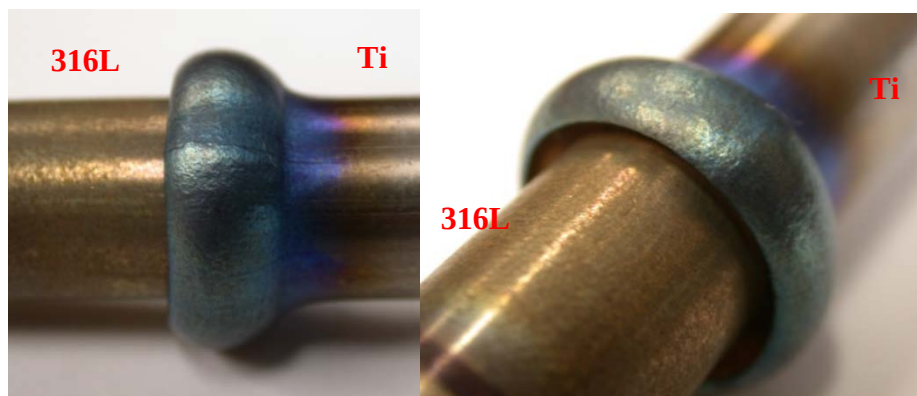
Během procesu svařování, konkrétně během ohřevu vzorku na ustálenou teplotu, lze pozorovat kolísání aktuálního výkonu transformátoru (PowAngle). To je zapříčiněno nedostatečným stykem a kontaktem přechodových ploch a tím dochází k pulzování elektrického proudu na pomezí materiálů. Tento stav lze pozorovat až do doby, kdy dojde k částečnému difúznímu spojení materiálů. Poté dojde k ustálení a zvýšení

potřebného výkonu transformátoru. Během expozičních teplot je již výkon transformátoru konstantní. Příklad kolísání výkonu transformátoru je ukázán na obrázku 5.7. Data jsou pořízena při svařování vzorku T1050_F2,5_t20, tedy při teplotě svařování 1050 °C, přitlačné síle 2,5 kN po dobu 20 minut. Jak je zřejmé, výkon transformátoru prvních pár sekund prudce stoupá, to je doba náběhu systému, následně kolísá a osciluje až přibližně do 225 sekund (to odpovídá teplotě 454 °C), kdy dojde k ustálení a růstu až na teplotu svařování.



Obrázek 5.7: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T1050_F2,5_t20

Po dokončení procesu svařování a vychladnutí vzorků lze do svářecí komory vpustit tlak okolního prostředí a vyjmout vzorek. Na obrázku 5.8 je ukázán vzorek T1050_F2,5_t20. Při přitlačné síle 2,5 kN došlo již při teplotě okolo 950°C k intenzivní deformaci vzorku titanu, tak jak je ukázáno na obrázku 5.8, a experiment musel být ukončen. U části tvořené austenitickou ocelí 316L k žádné deformaci nedošlo.

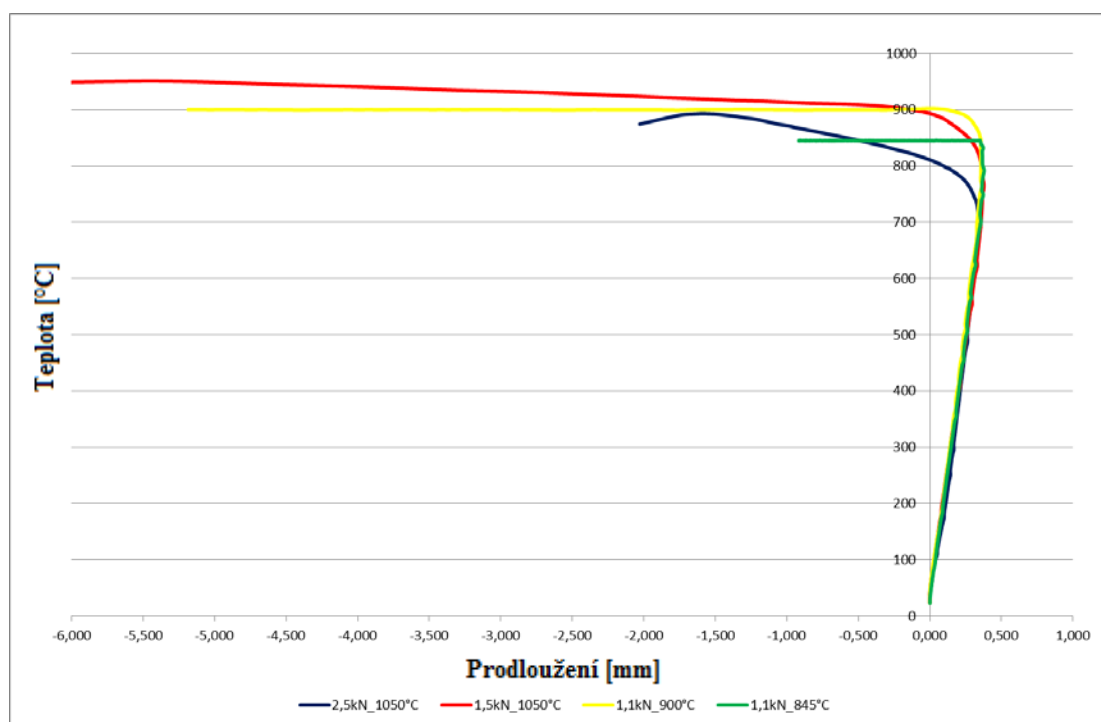


Obrázek 5.8: Difúzně svařený vzorek T1050_F2,5_t20 oceli 316L a Titanu Grade 2

Proto byla u dalšího vzorku označeného T1050_F1,1_t20 snížena přítlačná síla na 1,1 kN. Ovšem i u tohoto vzorku došlo při překročení teploty 950°C k poměrně intenzivní deformaci na straně titanu a také v tomto případě musel být experiment přerušen.

U třetího vzorku označeného T900_F1,1_t20 proto bylo rozhodnuto o snížení teploty na 900°C. Zde již došlo k výdrži na teplotě po dobu 20 minut, tak jak je ukázáno na obrázku 5.9, ale výsledná deformace na straně titanu se blížila k 6 mm, což je stále příliš.

Na základě zjištěných poznatků byla přítlačná síla u vzorku T845_F1,1_t20 dále snížena a to až na teplotu 845 °C. Při této teplotě a při zatížení vzorku silou 1,1 kN došlo po uplynutí 20 minut k celkové deformaci vzorku 0,8 mm. Na obrázku 5.9 jsou ukázány průběhy deformací pro všechny 4 testované vzorky.



Obrázek 5.9: Průběh deformace vzorků z první fáze testování

5.3. Realizace druhé fáze experimentu

Vzhledem k výsledkům první fáze experimentu bylo zapotřebí vstupní parametry dále upravit tak, aby byl nalezen optimální poměr procesních parametrů vedoucí k získání co největší pevnosti heterogenního spoje. Pro již odzkoušené rozmezí teplot 825 až 900°C, došlo k výraznějšímu snížení přítlačné síly, z důvodu omezení deformací vznikajících na straně titanu. Dále byly prodlouženy doby výdrže na expozičních

teplotách. Celkově bylo pro druhou fázi testování navrženo 10 experimentů, s podmínkami vzniku uvedených v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2: Seznam provedených experimentů a jejich svařovacích podmínek

Označení vzorku	Teplota [°C]	Přítlačná síla [kN]	Čas [min]
T900_F0,3_t40	900	0,3	40
T900_F0,5_t40	900	0,5	40
T860_F0,8_t90	860	0,8	90
T860_F0,8_t40	860	0,8	40
T860_F0,5_t90	860	0,5	90
T860_F0,5_t40	860	0,5	40
T825_F0,7_t90	825	0,7	90
T825_F0,7_t40	825	0,7	40
T825_F0,5_t90	825	0,5	90
T825_F0,5_t40	825	0,5	40

Rychlost ohřevu a ochlazení ovšem zůstala stejná a to $2\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ a při stejných hodnotách vakua kolem $1,8 \cdot 10^{-3}$ Torr. U těchto vzorků již opravdu deformace nebyla tak výrazná, jak je zřejmé i z obrázku 5.10 týkajícího se vzorku T900_F0,5_t40. Na řadu tak mohly přijít zkoušky mechanických vlastností spoje a metalografické vyhodnocení.



Obrázek 5.10: Vzorek T900_F0,5_t40

5.3.1. Mechanické zkoušky difúzních spojů

Vzorky svařené podle parametrů uvedených v tabulce 5.2, byly obrobny na zkušební tělesa, tak jak je ukázáno na obrázku 5.13. Tato tělesa byla následně podrobena statické zkoušce tahem na stroji TIRA test 2300, který je ukázán na obrázku 5.13. Tento postup byl uplatněn u všech 10 vzorků.



Obrázek 5.113: Obrobený vzorek na mechanické zkoušky



Obrázek 5.12: Mechanický přístroj TIRA test 2300

Výsledky mechanických zkoušek jsou uvedeny v tabulce 5.3. Symbol D_0 označuje průměr vzorku v testované části, $R_{p0.2}$ značí smluvní mez kluzu, R_m mez pevnosti v tahu, A_g je tažnost na mezi pevnosti a A_{20} je celkově hodnocená tažnost. Všechny vzorky byly přetrženy v místě svaru a jak je zřejmé z tabulky, nejlepších hodnot meze pevnosti v tahu dosáhl vzorek T860_F0,5_t40 a to 254 MPa. Tato hodnota byla přibližně očekávána a vzhledem k rešerši, dokonce dosáhla lepšího hodnot. Hodnota 254 MPa je sice dobrá hodnota, ale vzhledem k mezi pevnosti v tahu samotného titanu nebo oceli je méně než poloviční. Z tabulky je zřejmé, že tato hodnota nedosáhla ani meze kluzu.

Tabulka 5.3: Výsledky mechanických zkoušek z druhé fáze testování

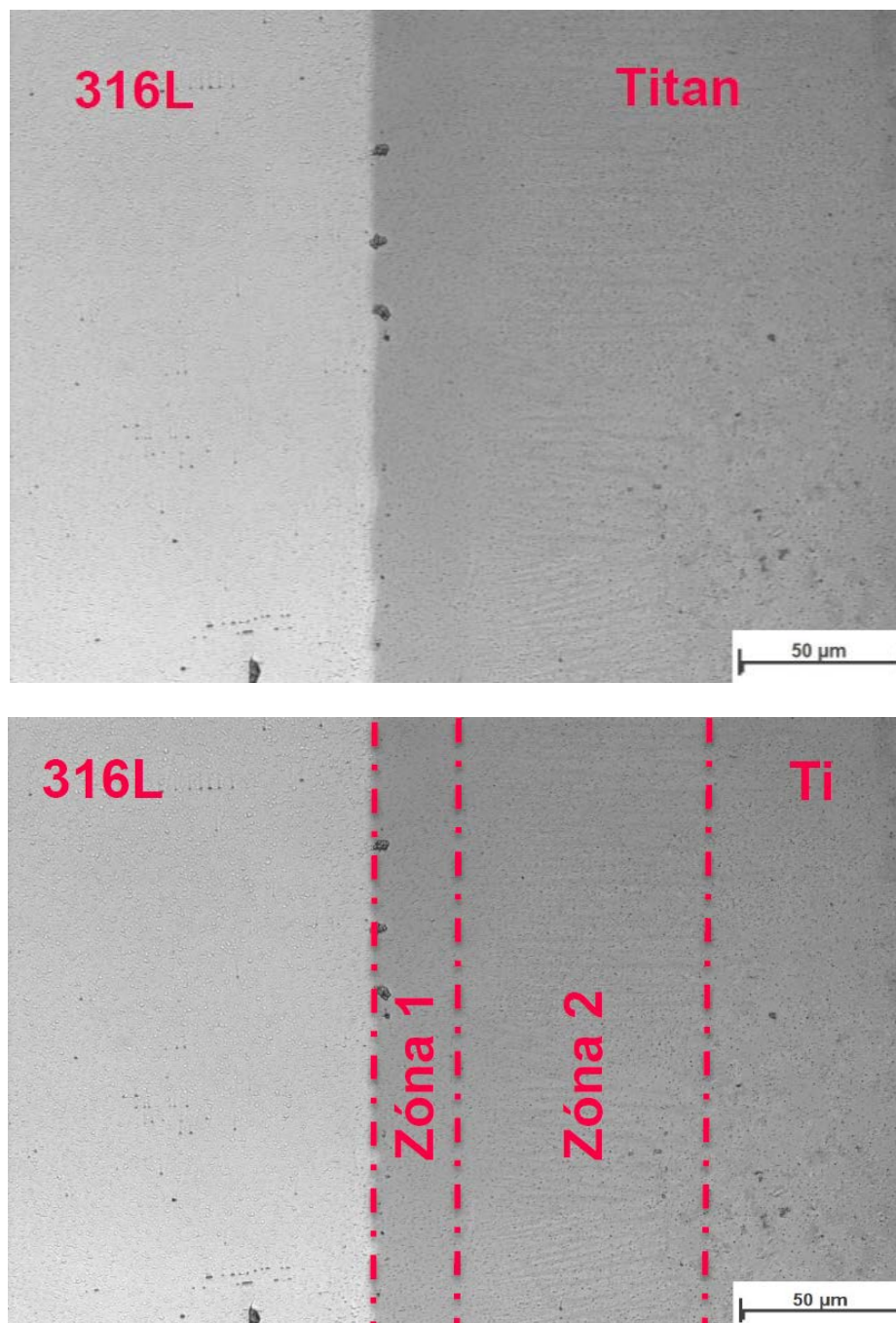
Označení vzorku	D ₀ [mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _g [%]	A ₂₀ [%]
Ocel 316L	8,07	532	667	25,5	52,0
Titan Grade 2	8,07	378	521	9,7	30,0
T900_F0,3_t40	8,02	0	129	0	0
T900_F0,5_t40	8,01	0	179	0	0
T860_F0,8_t90	8,03	0	230	0	0,1
T860_F0,8_t40	8,03	0	207	0	0,0
T860_F0,5_t90	8,03	0	222	0	0,1
T860_F0,5_t40	8,01	0	254	0	0
T825_F0,7_t90	7,97	0	122	0	0
T825_F0,7_t40	8,06	0	80	0	0
T825_F0,5_t90	8,05	0	119	0	0
T825_F0,5_t40	8,04	0	40	0	0

5.3.2. Metalografické vyhodnocení vzorků

K metalografickému vyhodnocení byly použity vzorky T900_F0,5_t40 a T825_F0,7_t40 (viz příloha). Vzorky byly připraveny běžným metalografickým zpracováním. Na obrázku 5.15 je ukázán svařený vzorek T900_F0,5_t40, který byl svařován při teplotě 900 °C po dobu 40 minut s přítlačnou silou 0,5 kN ještě před podélným rozřezáním a metalografickým vyhodnocením. Na obrázku 5.16 je pak ukázán detail oblasti spoje pořízený optickým mikroskopem při tisícinásobném zvětšení. Na vzorku jsou ukázány dvě difúzní oblasti označené Zóna 1 a Zóna 2. Zóna 1 je široká $35 \pm 3 \mu\text{m}$ a docházelo zde k nejintenzivnější difúzi oceli do titanu. Zóna 2 pak zaujímá oblast $70 \pm 10 \mu\text{m}$ a i v této oblasti docházelo k difúzi oceli do titanu ovšem s mnohem menší intenzitou a nerovnoměrně. Za zónou 2 se již nachází pouze čistý titan.

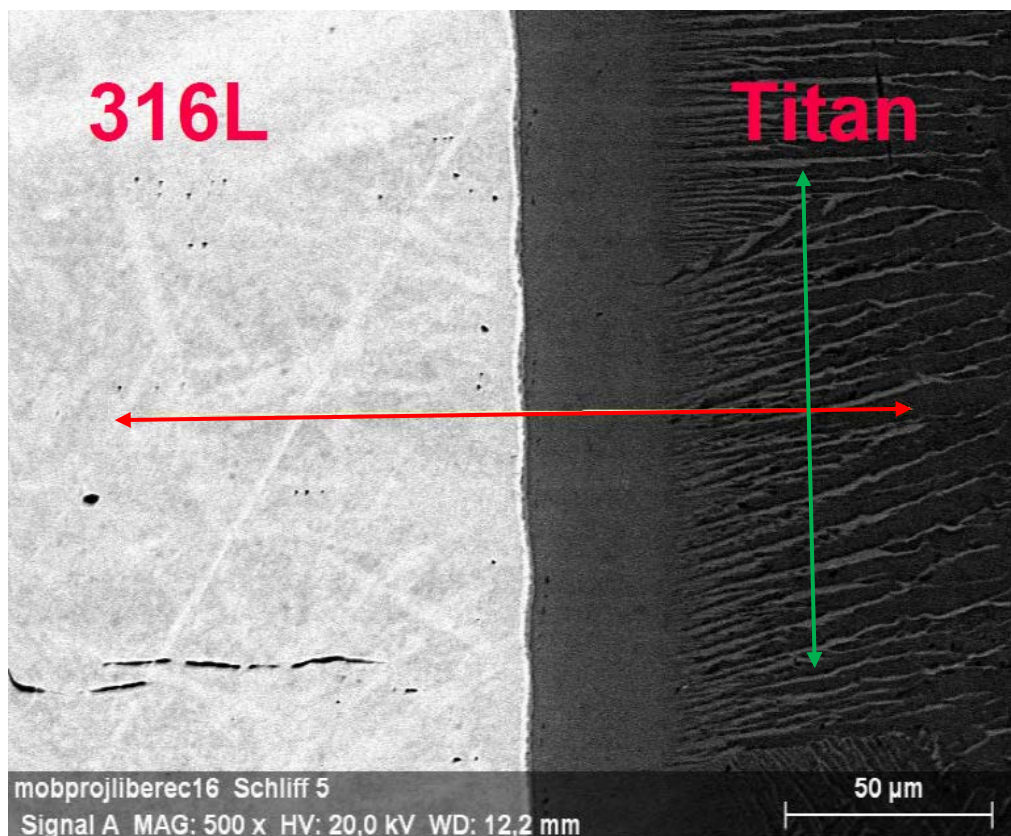


Obrázek 5.13: Vzorek T900_F0,5_t40 (titan vlevo, ocel vpravo)



Obrázek 5.14: Struktura vzorku T900_F0,5_t40 nasnímaná optickým mikroskopem

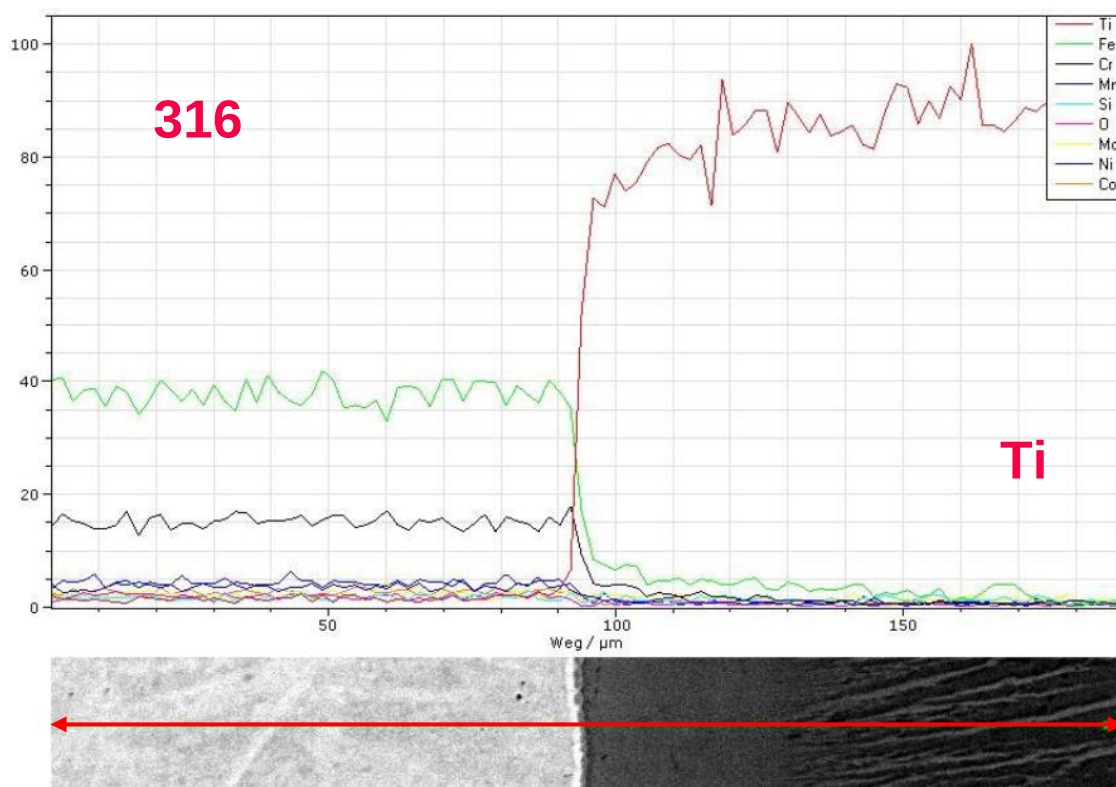
Na obrázku 5.17 pořízeném rastrovacím elektronovým mikroskopem při stejném zvětšení, lze také snadno rozlišit jednotlivé zóny. Ve druhé zóně jsou pak mnohem detailněji vidět stopy po probíhající difúzi.



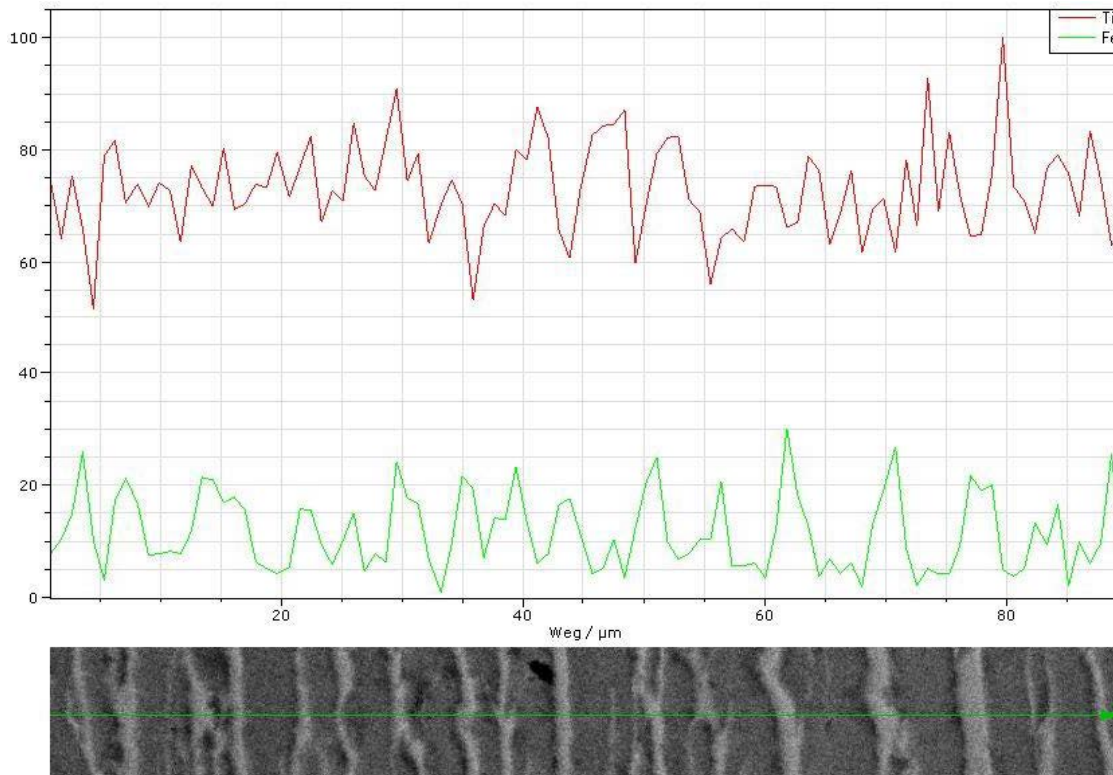
Obrázek 5.15: Struktura vzorku T900_F0,5_t40 rastrovacím elektronovým mikroskopem

Kromě toho byla na skenovacím elektronovém mikroskopu SEM provedena spektrální analýza, aby bylo možné stanovit změny koncentrace hmotnostních procent jednotlivých prvků v závislosti na vzdálenosti od místa spoje, v rozmezí znázorněném červenou šipkou na obrázku 5.17. Výsledek této analýzy je ukázán na obrázku 5.18. Z obrázku je zřejmé, že dochází především k difúzi Fe a částečně také Cr do Ti. Obráceně je však difúze Ti do vysokolegované oceli velmi malá.

Dále byla provedena spektrální analýza i v oblasti difúzních stop v titanu v tzv. zóně 2 (obrázek 5.17 zelená šipka). Výsledek je ukázán na obrázku 5.19. Z obrázku je jasně patrná změna koncentrací železa v titanu v závislosti na koncentračním gradientu.



Obrázek 5.16: Detail svaru T900_F0,5_t40 SEM s průběhem koncentračních změn hm. % jednotlivých prvků v závislosti na vzdálenosti od hranice spoje



Obrázek 5.17: Detail stop po difúzi u vzorku T900_F0,5_t40 SEM se změnou koncentračního množství hm. % u prvků Ti a Fe

5.4. Realizace třetí fáze experimentu

Na základě zjištění z první a především druhé fáze byla navržena třetí fáze experimentu. Její snahou bylo další vylepšení pevnostních vlastností spoje a to pro vzorek, u něhož byly dosaženy nejlepší mechanické vlastnosti spoje, tedy pro vzorek označený T860_F0,5_t40, který byl svařován při teplotě 860 °C, přitlačnou silou 0,5 kN po dobu 40 minut.

Změnou oproti původním parametrům bylo broušení stykových ploch svařovaných dílů. To by mělo mít za následek zlepšení kontaktu a zvětšení plochy přechodu v místech, kde probíhá difúze. Nové hodnoty drsnosti dosahovaly u oceli 316L $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ a u titanu Grade 2 drsnosti $R_a = 0,48 \mu\text{m}$. Oproti původní průměrné drsnosti u oceli 316L $R_a = 1,14 \mu\text{m}$ a u titanu Grade 2 drsnosti $R_a = 0,81 \mu\text{m}$, tak došlo k podstatnému vylepšení. Vstupní údaje obou vzorků jsou pro porovnání uvedeny v tabulce 5.4.

Tabulka 5.4: Svařovací podmínky a drsnosti vzorků T860_F0,5_t40 a T860_F0,5_t40_br

Označení vzorku	Teplota [°C]	Přítlačná síla [kN]	Čas [min]	Ø drsnost Ti [μm]	Ø drsnost 316L [μm]
T860_F0,5_t40	860	0,5	40	0,81	1,14
T860_F0,5_t40_br	860	0,5	40	0,48	0,32

Broušený vzorek T860_F0,5_t40_br byl po procesu difúzního svařování obroben na zkušební těleso, tak jako tomu bylo u vzorků v druhé části experimentu, a byl podroben statické zkoušce tahem na stroji TIRA test 2300. Došlo k mírnému zlepšení meze pevnosti v tahu oproti původnímu nebroušenému vzorku a to přibližně o 10 %. Výsledky mechanické zkoušky jsou uvedeny v tabulce 5.5.

Tabulka 5.5: Mechanické zkoušky vzorků T860_F0,5_t40 a T860_F0,5_t40_br

Označení vzorku	D ₀ [mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _g [%]	A ₂₀ [%]
Ocel 316L	8,07	532,38	667,41	25,49	52,02
Titan Grade 2	8,07	378,47	520,5	9,73	29,99
T860_F0,5_t40	8,01	0	253,56	0	0
T860_F0,5_t40_br	8,02	0	279,62	0	0

U vzorku s broušenými stykovými plochami došlo k mírnému zlepšení výsledků oproti druhé fázi experimentů, ale výsledky stále nebyly uspokojivé. Proto bylo navrženo použití ochranné atmosféry argonu na místo vakua, z důvodu posouzení intenzity ochrany proti oxidaci. Na vakuový systém simulátoru Gleeble tedy byla připojena láhev s argonem. Princip ochrany inertním plynem je trochu rozdílný od vakuového. Nejdříve je z pracovní komory odčerpán vzduch a je vytvořeno nízké vakuum hodnoty cca. $4 \cdot 10^{-1}$ Torr. Do komory je pak velice pomalu pouštěn argon a hodnota vakua klesá. Proces se zastaví při podtlaku cca $4 \cdot 10^{-1}$ Torr. Poté je z komory znovu odsávána směs Ar a zbytkového vzduchu až do hodnoty vakua cca $4 \cdot 10^{-1}$ Torr. Do komory je opět velice pomalu pouštěn argon a celý proces se opakuje 3x až 4x. Po ukončení by se již v komoře neměl vyskytovat žádný zbytkový kyslík působící vysokoteplotní oxidaci a tím i zkřehnutí titanu.

Pro experiment byl opět použit vzorek T860_F0,5_t40_br s broušenými stykovými plochami. Pro názornost a rozlišení jsou v tabulce 5.6 uvedeny svařovací podmínky všech tří vzorků, jak z druhé, třetí tak i čtvrté fáze experimentu.

Tabulka 5.6: Svařovací podmínky vzorků T860_F0,5_t40, T860_F0,5_t40_br a T860_F0,5_t40_br_Ar

Označení vzorku	Teplota [°C]	Přítlačná síla [kN]	Čas [min]	Ø drsnost Ti [μm]	Ø drsnost 316L [μm]	Typ ochrany
T860_F0,5_t40	860	0,5	40	0,81	1,14	Vakuum
T860_F0,5_t40_br	860	0,5	40	0,48	0,32	Vakuum
T860_F0,5_t40_br_Ar	860	0,5	40	0,48	0,32	Argon

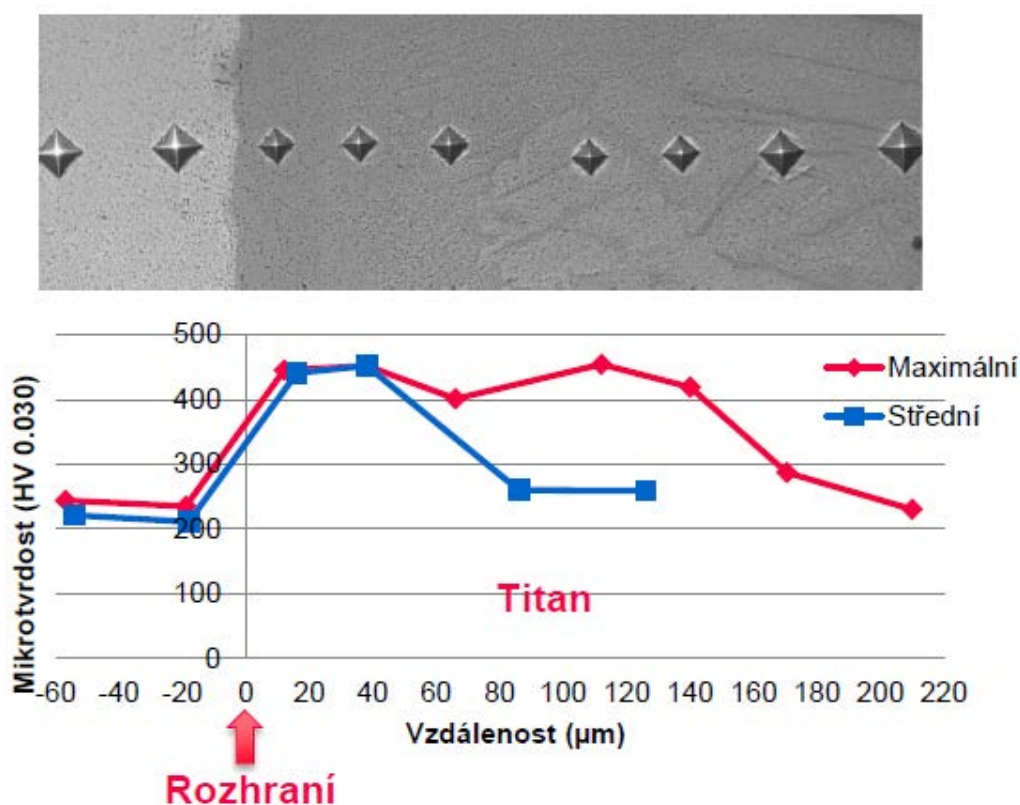
Broušený vzorek, svařovaný v ochranné atmosféře argonu T860_F0,5_t40_br_Ar vykazoval po procesu difúzního svařování známky intenzivnější oxidace na povrchu titanového dílu. Nicméně po obrobení na zkušební těleso a provedení statické zkoušky tahem na stroji TIRA test 2300 bylo zjištěno výrazné zlepšení pevnosti spoje. U tohoto vzorku jako u jediného bylo dosaženo meze kluzu a alespoň minimální tažnosti. Výsledky mechanické zkoušky jsou uvedeny v tabulce 5.7.

Tabulka 5.7: Mechanické zkoušky
T860_F0,5_t40,T860_F0,5_t40_br,T860_F0,5_t40_br_Ar

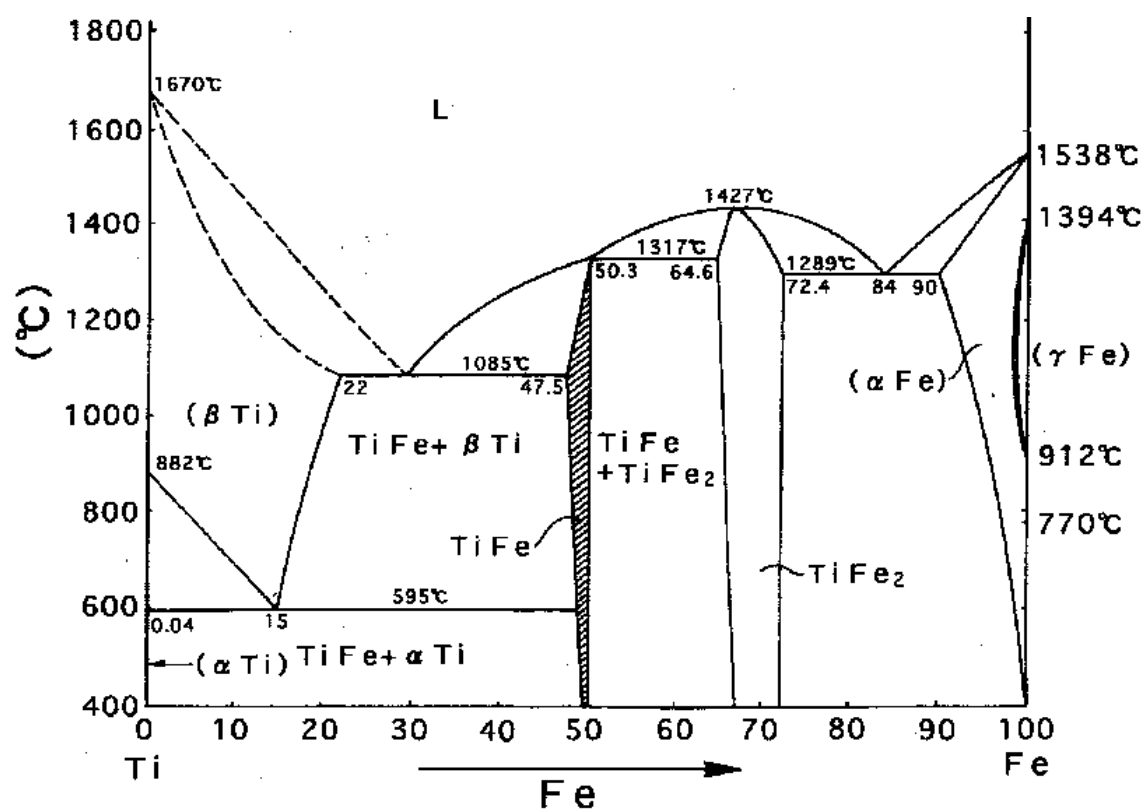
Označení vzorku	D ₀ [mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _g [%]	A ₂₀ [%]
Ocel 316L	8,07	532,38	667,41	25,49	52,02
Titan Grade 2	8,07	378,47	520,5	9,73	29,99
T860_F0,5_t40	8,01	0	253,56	0	0
T860_F0,5_t40_br	8,02	0	279,62	0	0
T860_F0,5_t40_br_Ar	7,99	328,3	336,18	0,23	0,23

I přes velmi dobré výsledky, nebylo docíleno meze pevnosti v tahu jako u materiálů samotných. Vyvstala tedy otázka příčiny tohoto problému. Tento stav mohl být způsoben vznikem tzv. intermetalické fáze, která sice zvyšuje pevnost materiálu, ale zvyšuje jeho křehkost, a to z důvodu přítomnosti různých chemických vazeb. [22]

Z tohoto důvodu byla na vzorku T900_F0,5_t40 provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse (ČSN 42 0374). Na obrázku 5.20 je detail svaru pořízený optickým mikroskopem i se stopami vtisků po měření tvrdosti HV 0,03. Z průběhů je zřejmý značný nárůst tvrdosti v difúzní Zóně 1 a to až na tvrdost okolo 450 HV. To ukazuje na vznik intermetalické fáze. Na obrázku 5.21 je znázorněn binární diagram Fe-Ti, ve kterém jsou znázorněny také intermetalické fáze.



Obrázek 5.18: Průběh tvrdosti u vzorku T900_F0,5_t40



Obrázek 5.19: Binární diagram Ti-Fe [23]

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo nalézt vhodné svařovací podmínky pro vytvoření kvalitního heterogenního svarového spoje mezi ocelí 316L a Titanem Grade 2.

V teoretické části bakalářské práce byla popsána problematika a podstata difúzního svařování, důležitost svařovacích podmínek, principy vzniku spoje či příklady použití technologie difúzního svařování v průmyslu. V závěru pak byla provedena rešerše, na téma difúzního svařování vysokolegované oceli a titanu nebo oceli a slitiny titanu, kdy byly ukázány svařovací podmínky pro svaření těchto materiálů a vyhodnocení výsledných svarů.

V experimentální části bakalářské práce byly popsány použité materiály, tedy austenitickou nerezová ocel 316L a titan Grade 2, včetně jejich chemických a fyzikálních vlastností a vzájemné svařitelnosti a použití v průmyslu.

Experimentální část práce byla rozdělena do celkem tří fází, přičemž v první fázi šlo o návrh počátečních procesních parametrů. Ten vycházel zejména z rešerše a z vlastností svařovaných materiálů. Na základě první fáze byl stanoven především rozsah teplot, ve kterých je reálné se při difúzním svařování pohybovat.

Na základě zjištěných výsledků bylo ve druhé fázi navrženo 10 experimentů, u nichž byly spoje vyhodnoceny pomocí mechanických zkoušek, ale i metalograficky. Nejlepších pevnostních hodnot spoje ($R_m = 254 \text{ MPa}$) bylo dosaženo při teplotě $860 \text{ }^\circ\text{C}$, přítláčné síle $0,5 \text{ kN}$ a době na ustálené teplotě 40 minut. U všech svařených vzorků však došlo k porušení v místě spoje.

Proto bylo ve třetí fázi testování přistoupeno ke změně technologických parametrů při zachování parametrů procesních. Nejprve došlo k úpravě stykových ploch vzorků broušením. Tento krok se pozitivně projevil na zvýšení pevnostních vlastností spoje o cca 10 %. Došlo k nárůstu meze pevnosti v tahu na $R_m = 280 \text{ MPa}$. Dalším krokem byl pokus o změnu ochrany spoje při svařování. Místo vakua tak byl použit argon a při teplotě $860 \text{ }^\circ\text{C}$, přítláčné síle $0,5 \text{ kN}$ a době na ustálené teplotě 40 minut došlo k nárůstu meze pevnosti na $R_m = 336 \text{ MPa}$. U tohoto jediného vzorku bylo docíleno i meze kluzu $R_{p0,2} = 328 \text{ MPa}$.

Provedené zkoušky tvrdosti potvrdily v místě spoje vznik intermetalické fáze. Proto by bylo vhodné při pokračování výzkumu v této oblasti zkusit využít tenké mezivrstvy

v místě spoje. Tyto mezivrstvy by měly být z materiálů, které s titanem, nebo ocelí 316L nebudou tvořit intermetalické fáze.

7. Seznam použitých zdrojů

- [1] MORAVEC, Jaromír. Teorie svařování a pájení II: speciální metody svařování. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009, 150 s. ISBN 9788073724399.
- [2] Diffusion Bonding. Department of Materials Science & Metallurgy [online]. University of Cambridge, 2016 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2005/Amir/bond.html>
- [3] Super plastic Forming and Diffusion bonding in Aerospace industries. Slideshare [online]. 2013 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/RohitKatarya/spf-db-presentation-finla8>
- [4] KUNCIPÁL, Josef a kolektiv. Teorie svařování. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 265 s.
- [5] KAZAKOV, Nikolaj Fedotovič. Difúzní svařování. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983, 266 s.
- [6] Diffusion Bonding (Hot Press): Resistance Heated High Vacuum Treatment Furnace With Integrated Pressing Unit. PVA TePla [online]. [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.pvatepla.com/en/products/vacuum-furnaces/pva/vacuum-heat-treatment/hotpress>
- [7] ARUN, S., N. HARIKRISHNA, A. J. JAHANGIR, A. JEGANATHPRABHU, W. EDWIN LYONAL a G. MAHANDEVAN. OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS OF DIFFUSION BONDING IN TITANIUM WITH STAINLESS STEEL. International Journal of Engineering and Technology [online]. 2015, 4(1), 8 [cit. 2016-06-12]. ISSN 2319-5991. Dostupné z: http://www.ijerst.com/ijerstadmin/upload/IJEETC_55235855a70b6.pdf#page=5&zoom=auto,-178,460
- [8] Solid-State Diffusion Bonding of Commercially pure Titanium and Precipitation Hardening Stainless steel. International Journal of Recent Trends in Engineering [online]. 2009, 1(5), 7 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.481.4003&rep=rep1&type=pdf>

- [9] MORAVEC, Jaromír a Josef BRADÁČ. Možnosti a využití teplotně-napětového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 9788074941382.
- [10] SEDLÁČEK, Vladimír. Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada hutnické literatury.
- [11] KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 8085771853.
- [12] Titan. Periodická tabulka Chemické prvky [online]. 2016 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/22.html#vyroba>
- [13] Fyzikální základy vědy o materiálu. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity [online]. [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>
- [14] RUŽA, Viliam. Zváranie titánu v ochrane argónu. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1966.
- [15] Titan Grade 2 - Komerčně čistý titan. Inkosas [online]. Praha, 2008 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.inkosas.cz/download/titanove-slitiny-grade/titan-grade-2.pdf>
- [16] NEREZOVÁ OCEL 1.4404. Inoxspol [online]. 2016 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/index.php?act=a&cat=4&art=11>
- [17] AISI Type 316L Stainless Steel, annealed bar. Aerospace Specification Metals INC. [online]. [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ316Q>
- [18] NEUMANN, Heinz. Teorie svařování a pájení. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 9788074941719.
- [19] Železo. Periodická tabulka Chemické prvky [online]. 2016 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/26.html>
- [20] Označování materiálů podle evropských norem. Oddělení povrchového inženýrství Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni [online]. [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/evropske_normy.pdf

- [21] CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI. Italinox [online]. 2015 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/?p1=plechy&p2=p6&p3=p2>
- [22] SAUTHOFF, G. Intermetallics. New York: VCH, c1995. ISBN 3527293205.
- [23] Diagram Fe-Ti. Idea [online]. [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://idea.db.aist.go.jp/download/patent/3481/000005.gif>

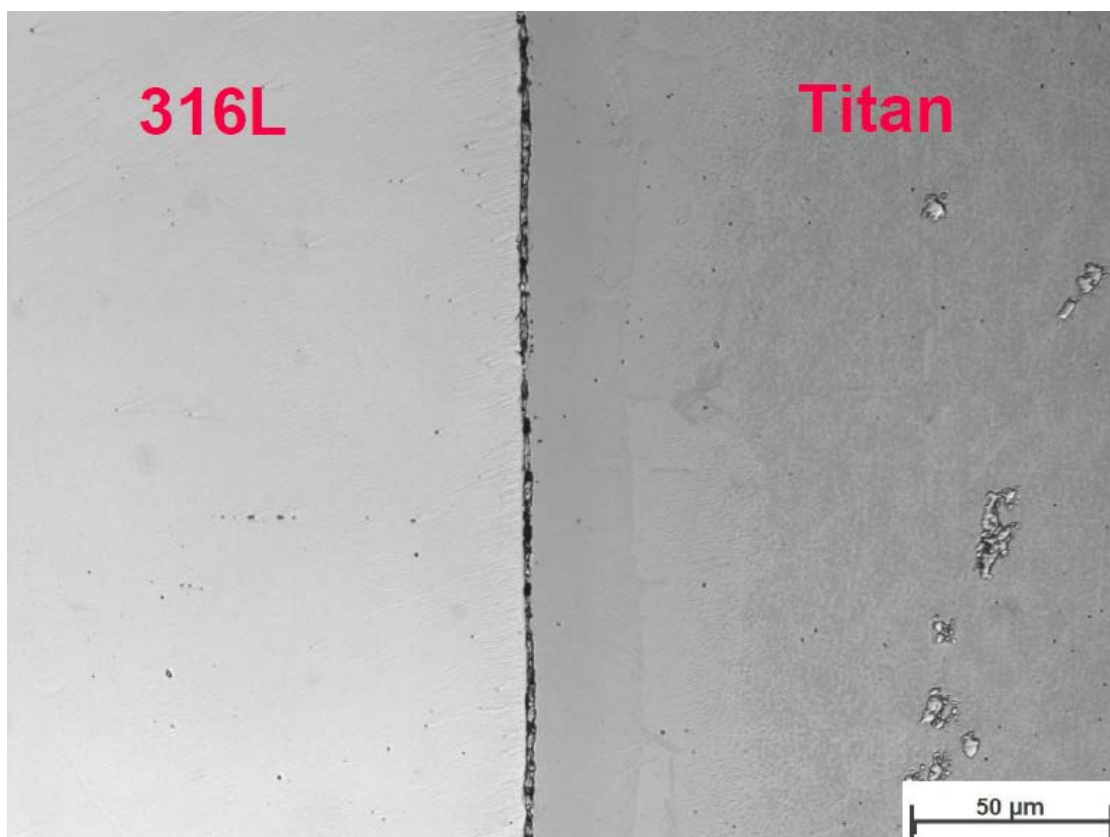
8. Seznam příloh

- Příloha č. 1: Struktura vzorku T825_F0,7_t40 nasnímaná optickým mikroskopem
- Příloha č. 2: Detail svaru T825_F0,7_t40 SEM s průběhem koncentračních změn hm. % jednotlivých prvků v závislosti na vzdálenosti od hranice spoje
- Příloha č. 3: Difúzně svařený vzorek T1050_F1,5_t20 oceli 316L a Titanu Grade 2
- Příloha č. 4: Vzorek T825_F0,7_t40 (titan vlevo, ocel vpravo)
- Příloha č. 5: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T825_F0,5_t40
- Příloha č. 6: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T825_F0,5_t90
- Příloha č. 7: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T825_F0,7_t40
- Příloha č. 8: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T825_F0,7_t90
- Příloha č. 9: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,5_t40
- Příloha č. 10: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,5_t90
- Příloha č. 11: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,8_t40
- Příloha č. 12: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,8_t90
- Příloha č. 13: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T900_F0,3_t40
- Příloha č. 14: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,5_t40_br
- Příloha č. 15: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,5_t40_br_Ar
- Příloha č. 16: Průběh deformace vzorku T825_F0,5_t40
- Příloha č. 17: Průběh deformace vzorku T825_F0,5_t90
- Příloha č. 18: Průběh deformace vzorku T825_F0,7_t40
- Příloha č. 19: Průběh deformace vzorku T825_F0,7_t90
- Příloha č. 20: Průběh deformace vzorku T860_F0,5_t40
- Příloha č. 21: Průběh deformace vzorku T860_F0,5_t90
- Příloha č. 22: Průběh deformace vzorku T860_F0,8_t40
- Příloha č. 23: Průběh deformace vzorku T860_F0,8_t90

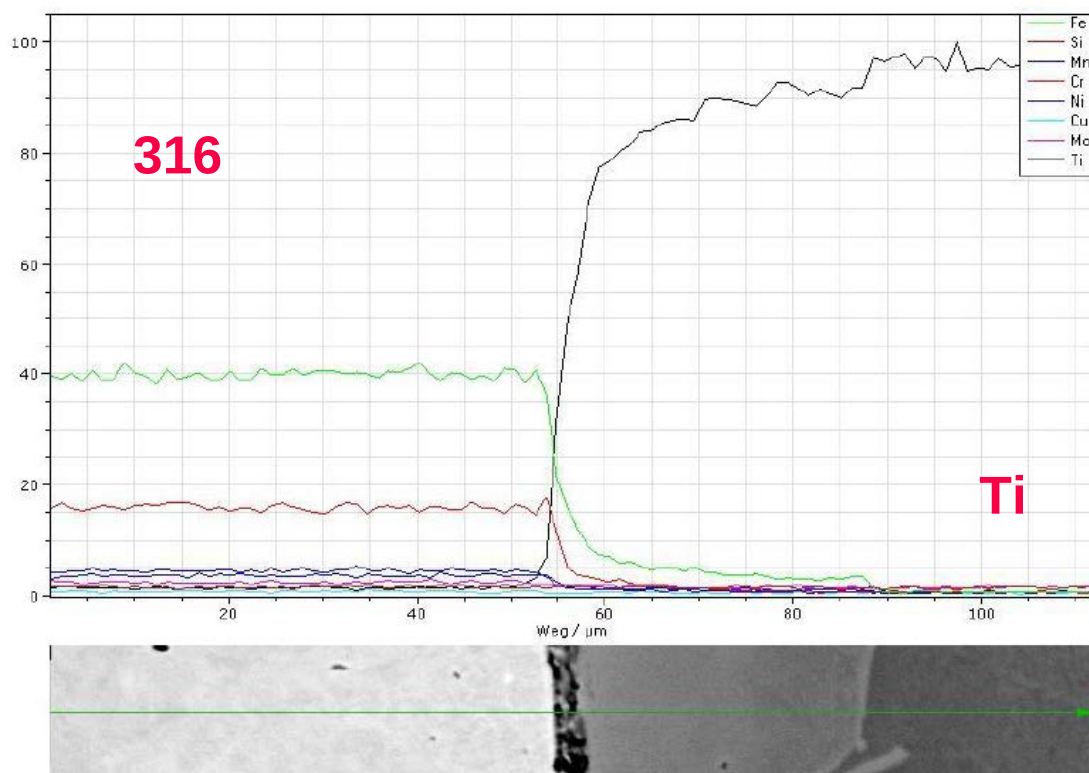
Příloha č. 24: Průběh deformace vzorku T900_F0,3_t40

Příloha č. 25: Průběh deformace vzorku T860_F0,5_t40_br

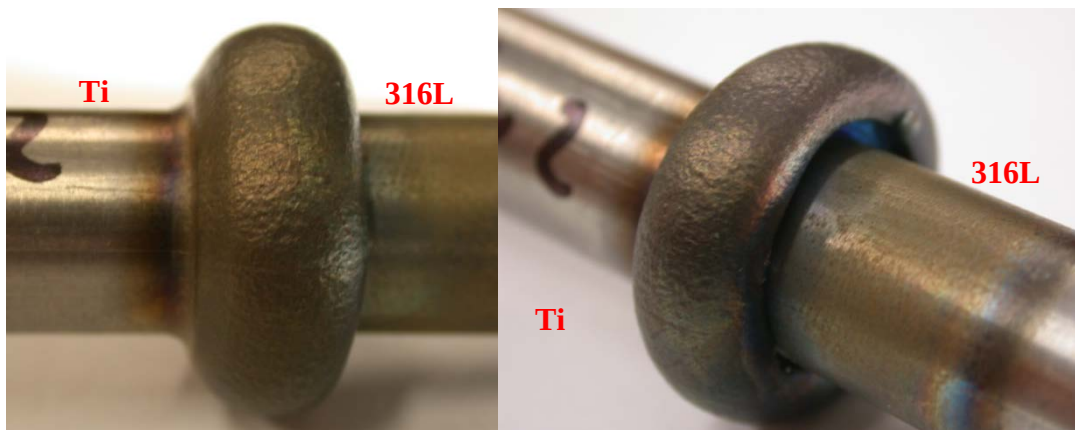
Příloha č. 26: Průběh deformace vzorku T860_F0,5_t40_br_Ar



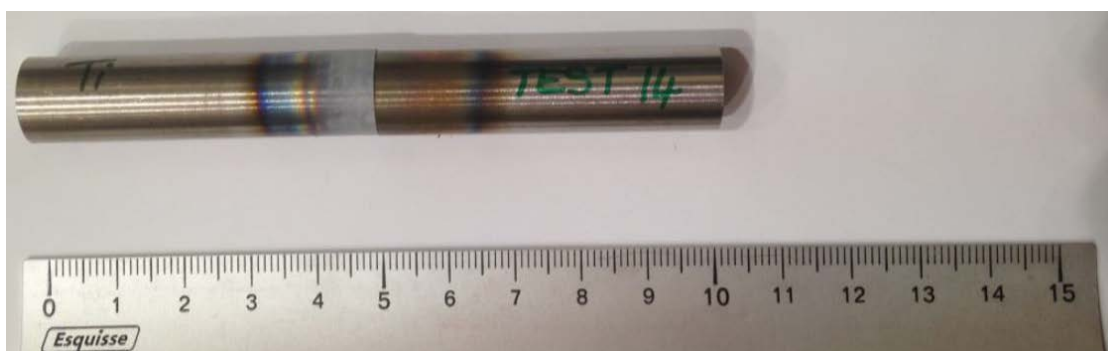
Příloha č. 1: Struktura vzorku T825_F0,7_t40 nasnímaná optickým mikroskopem



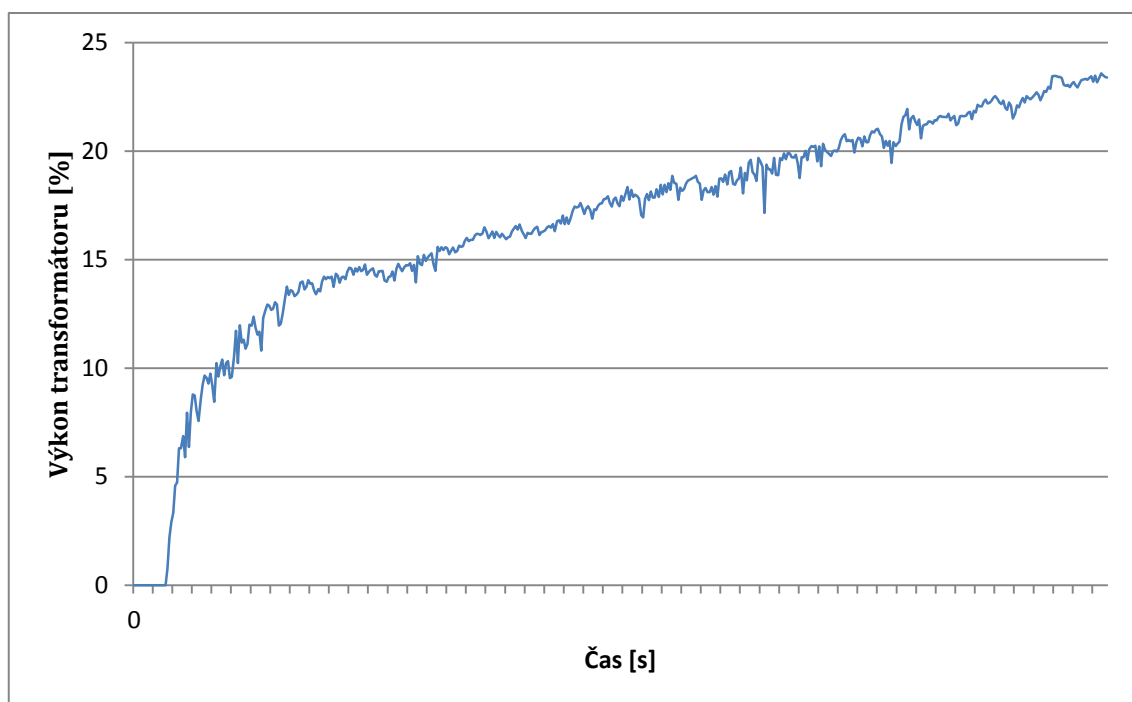
Příloha č. 2: Detail svaru T825_F0,7_t40 SEM s průběhem koncentračních změn hm. % jednotlivých prvků v závislosti na vzdálenosti od hranice spoje



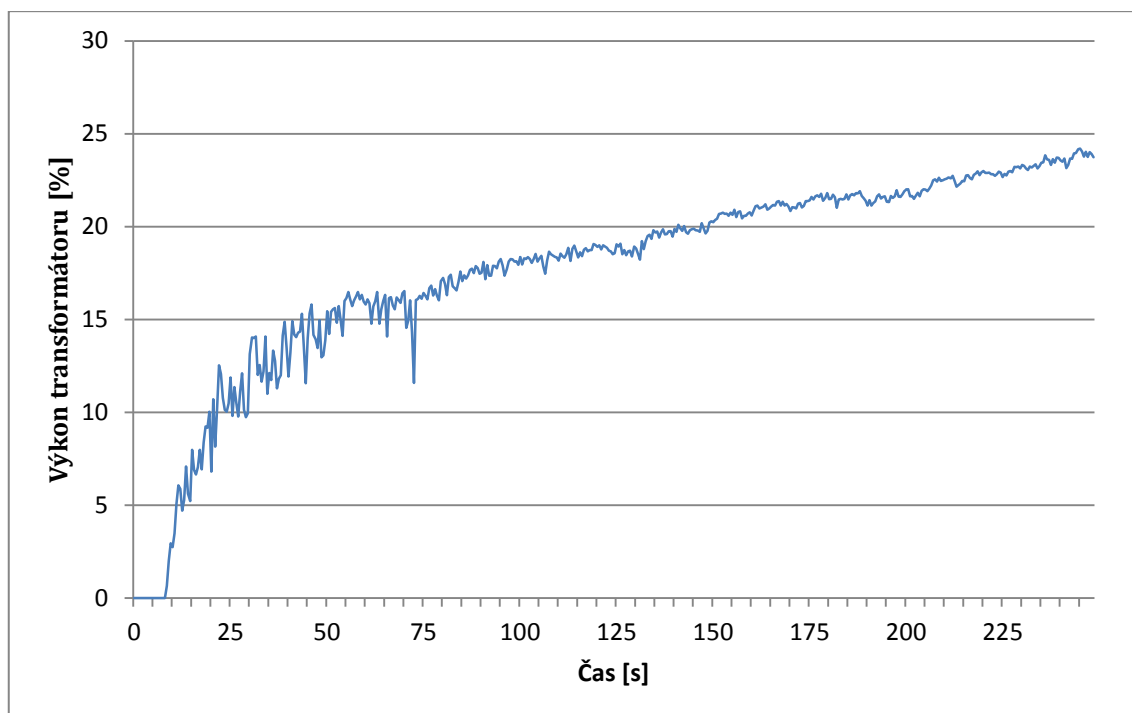
Příloha č. 3: Difúzně svařený vzorek T1050_F1,5_t20 oceli 316L a Titanu Grade 2



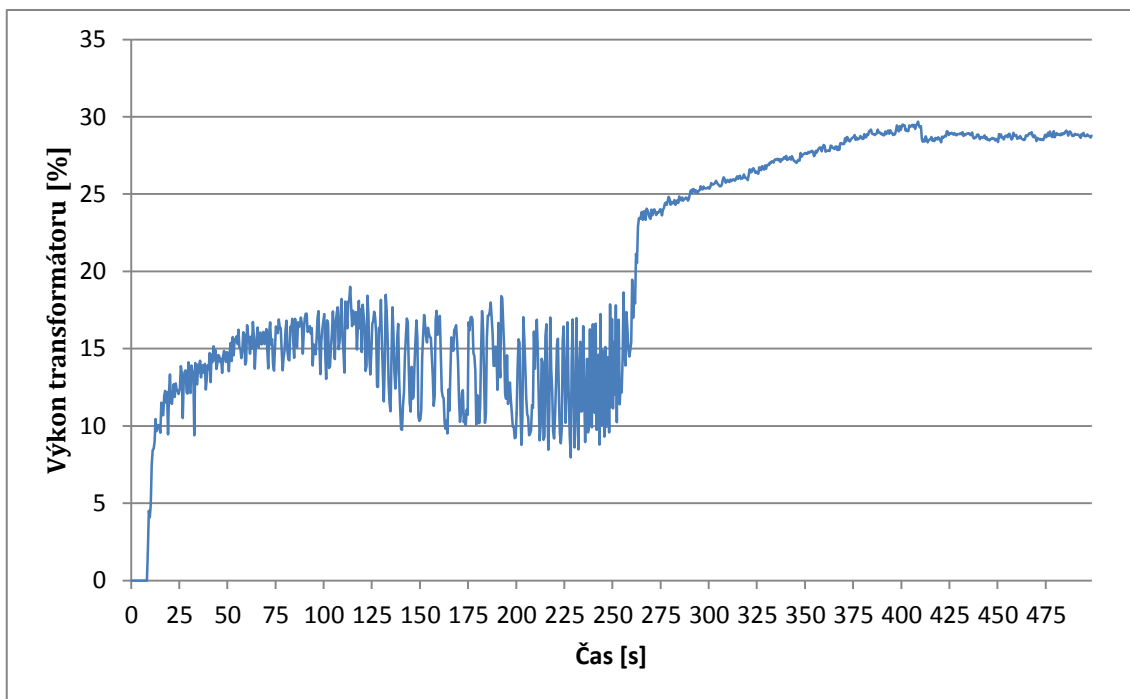
Příloha č. 4: Vzorek T825_F0,7_t40 (titan vlevo, ocel vpravo)



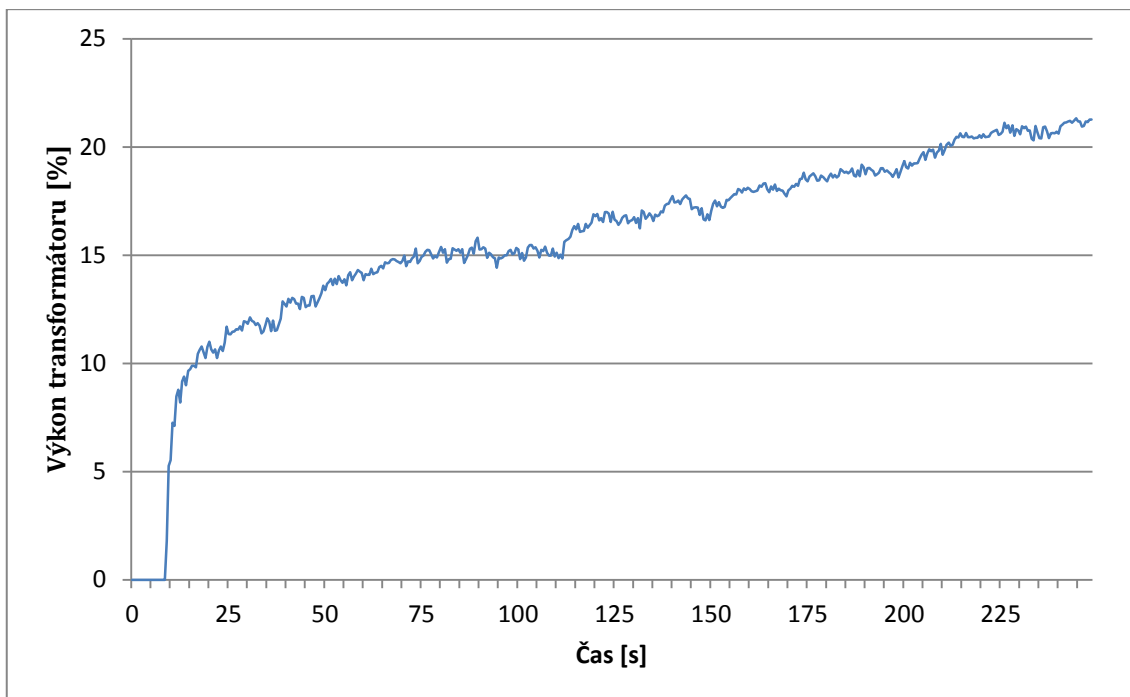
Příloha č. 5: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T825_F0,5_t40



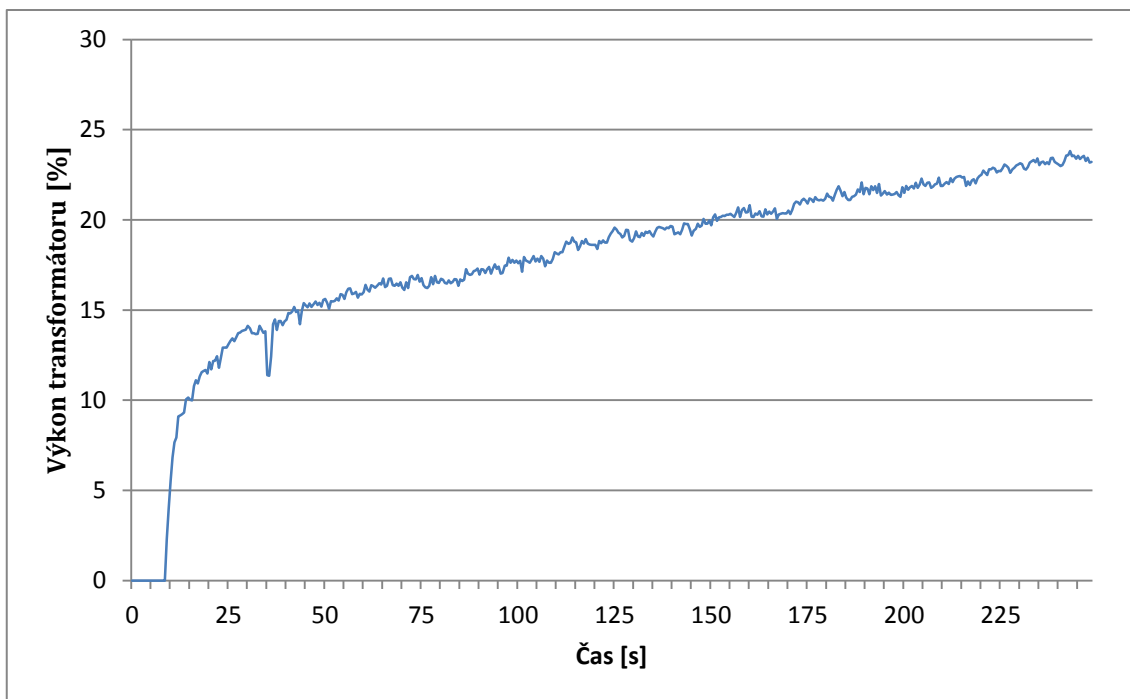
Příloha č. 6: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T825_F0,5_t90



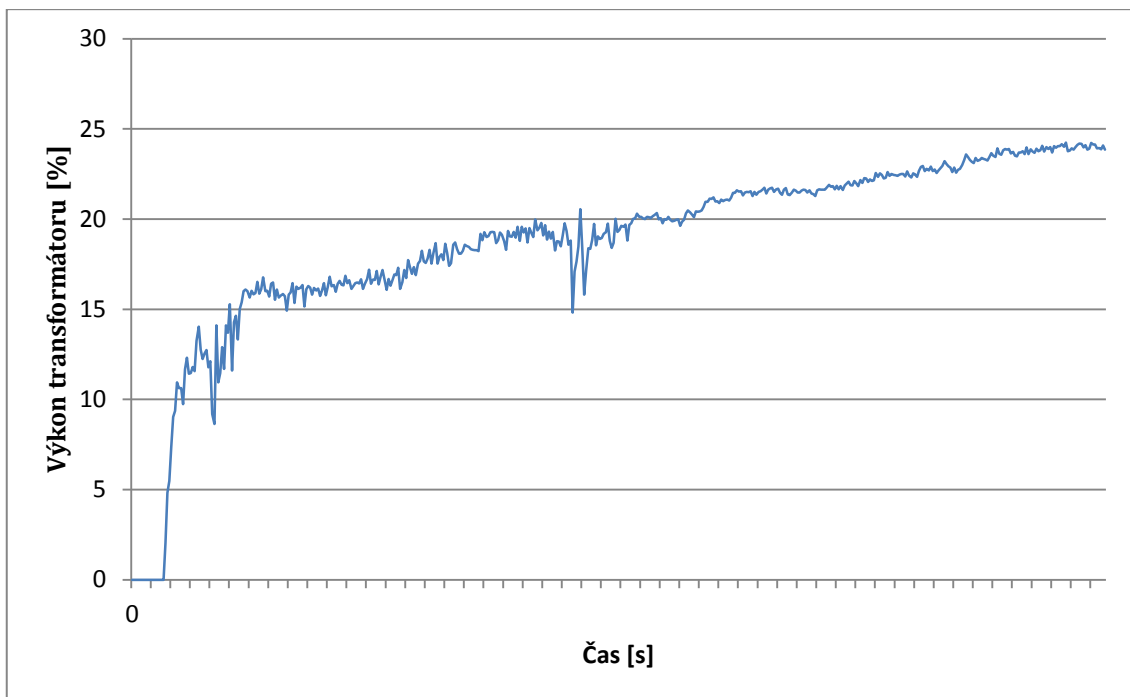
Příloha č. 7: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T825_F0,7_t40



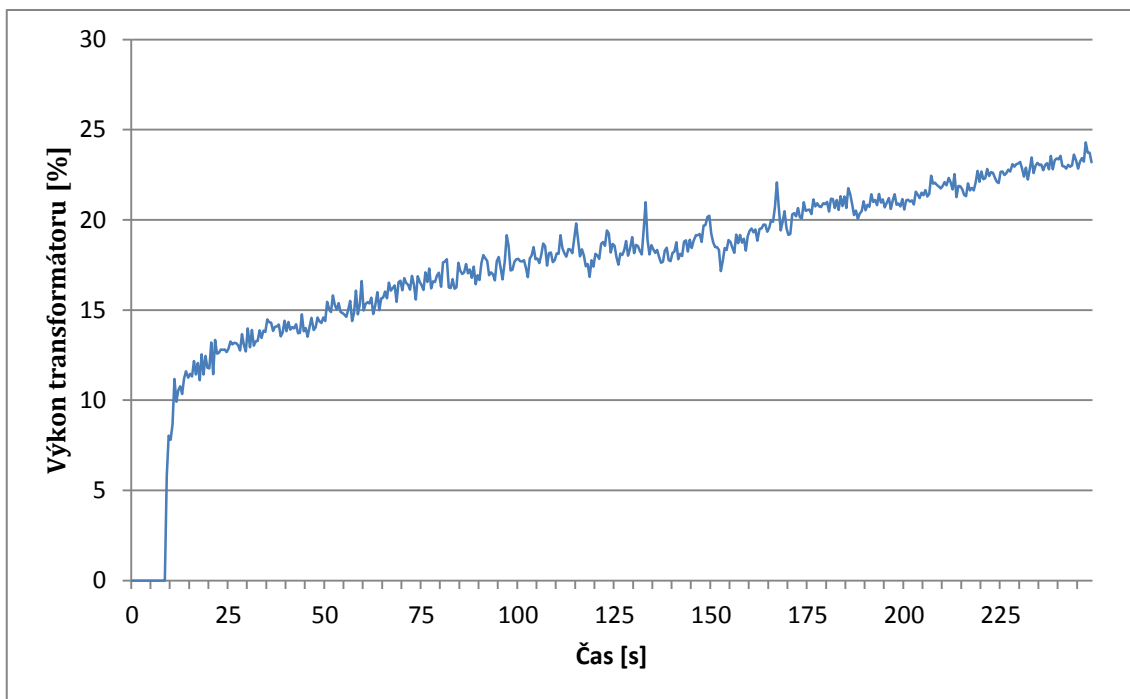
Příloha č. 8: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T825_F0,7_t90



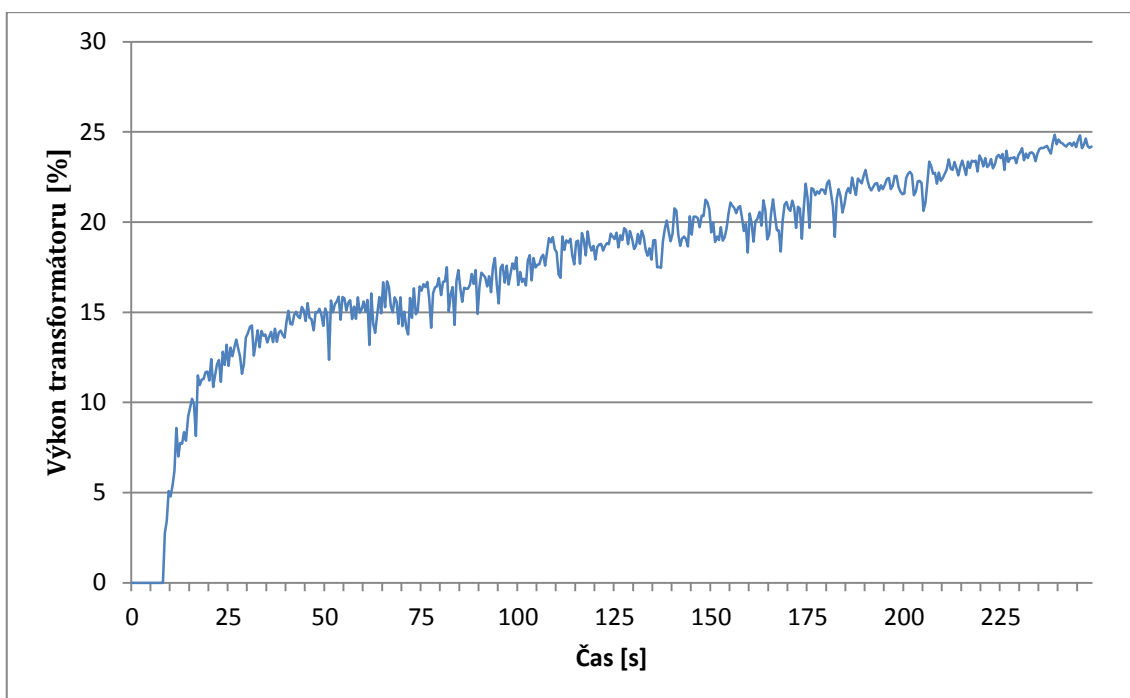
Příloha č. 9: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,5_t40



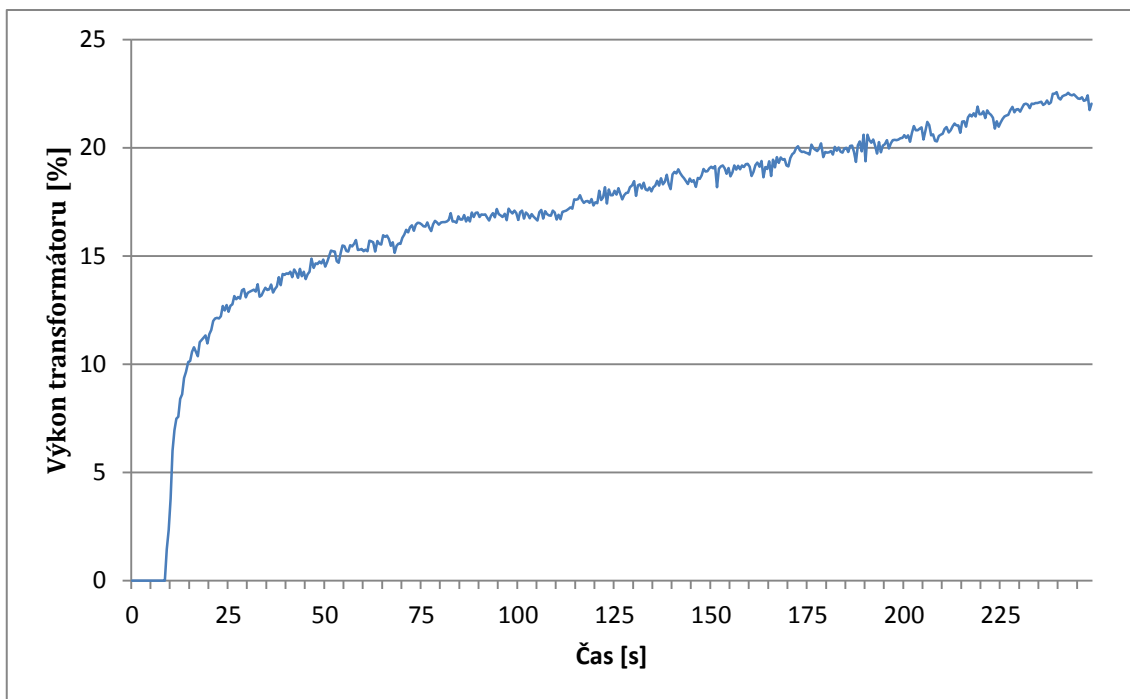
Příloha č. 10: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,5_t90



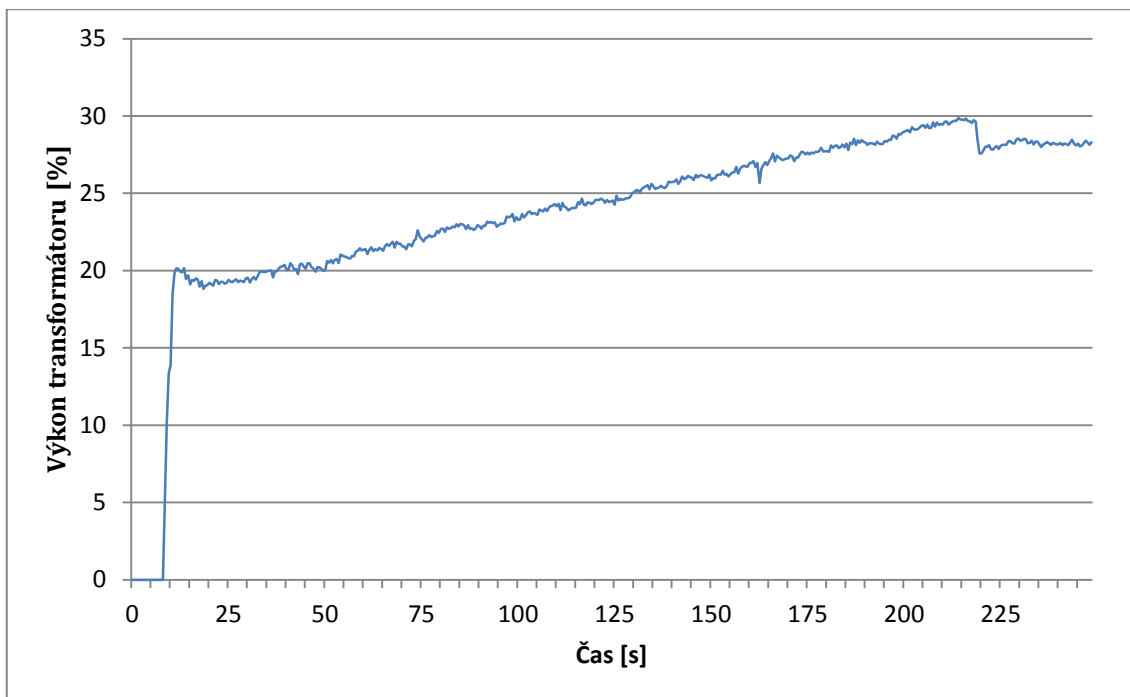
Příloha č. 11: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,8_t40



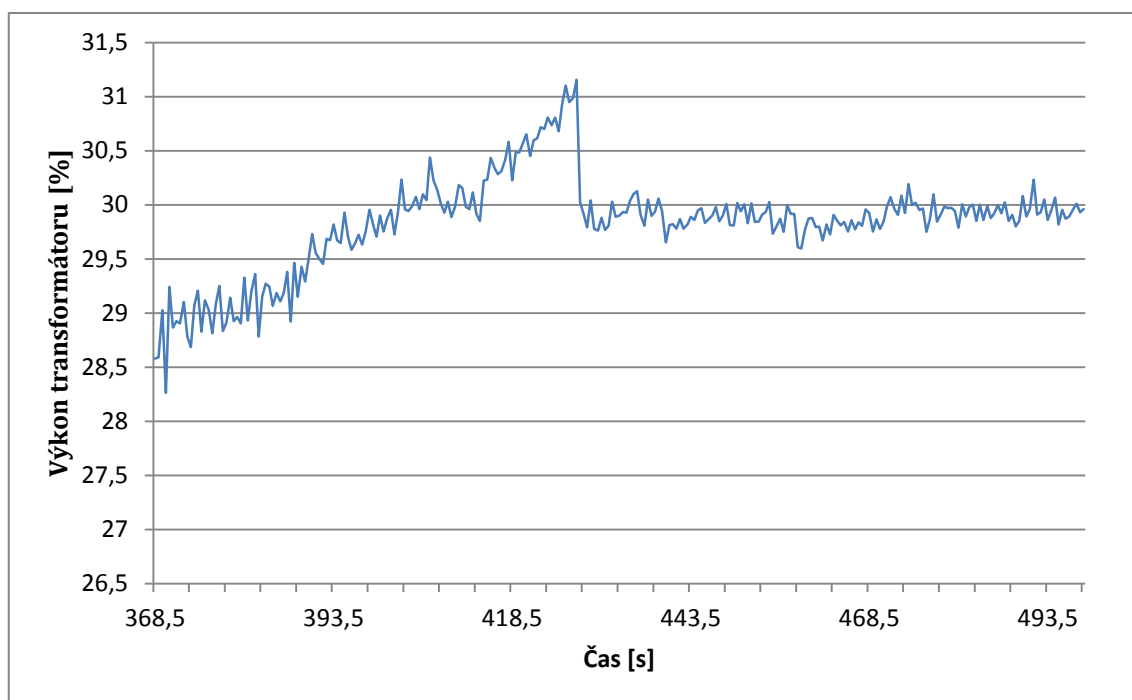
Příloha č. 12: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,8_t90



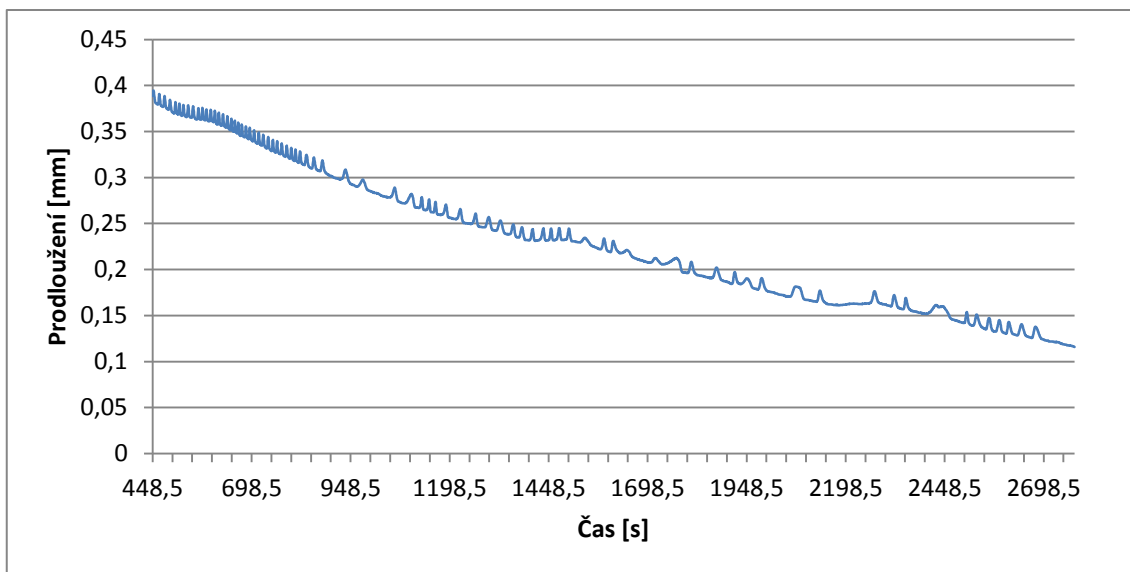
Příloha č. 13: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T900_F0,3_t40



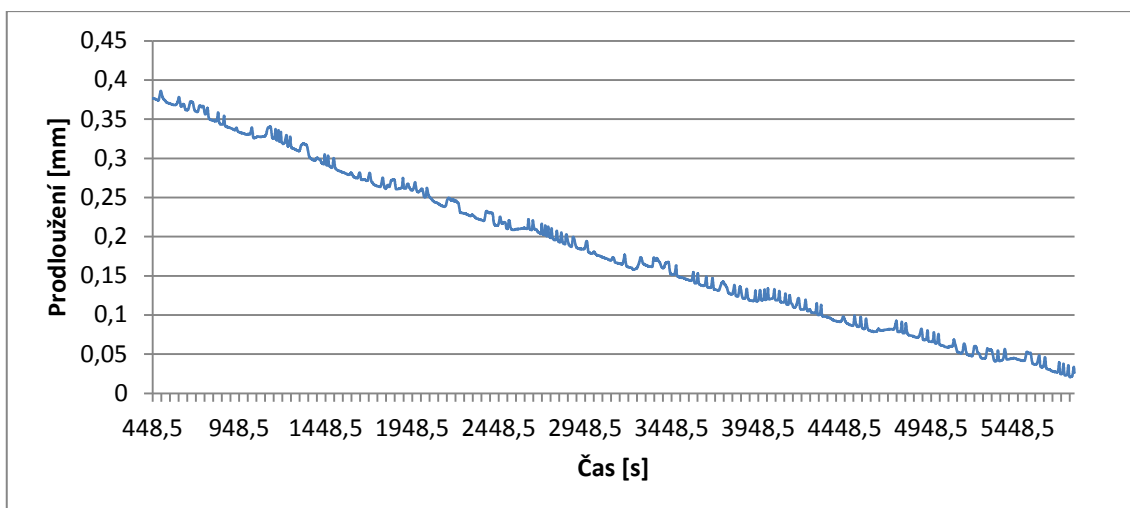
Příloha č. 14: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku T860_F0,5_t40_br



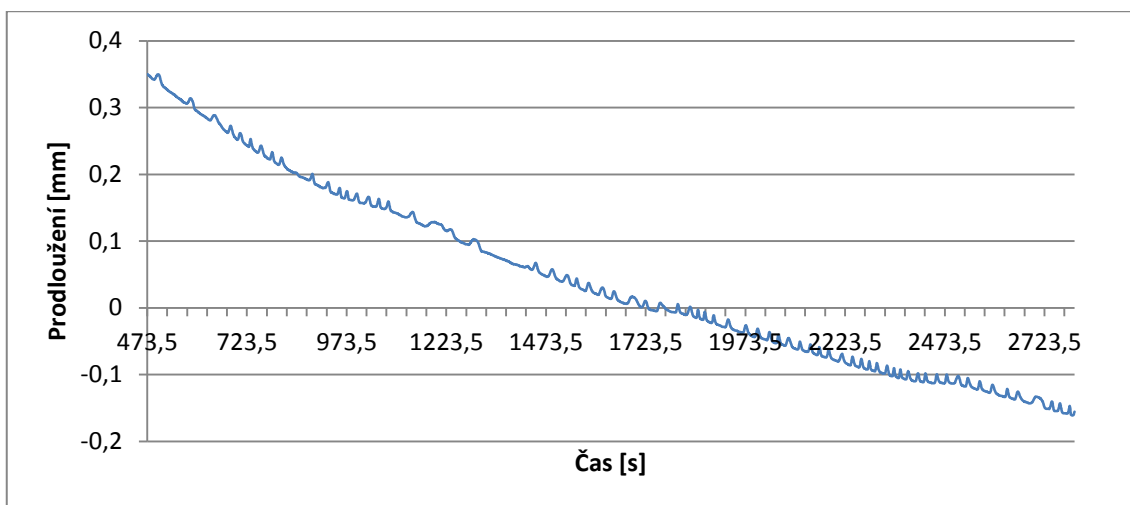
Příloha č. 15: Průběh výkonu transformátoru při svařování vzorku
T860_F0,5_t40_br_Ar



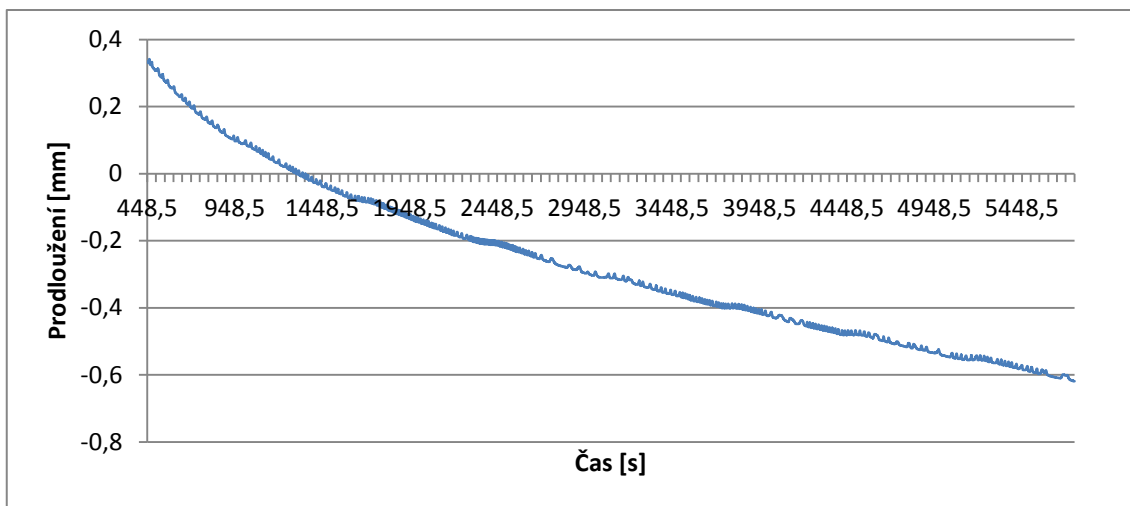
Příloha č. 16: Průběh deformace vzorku T825_F0,5_t40



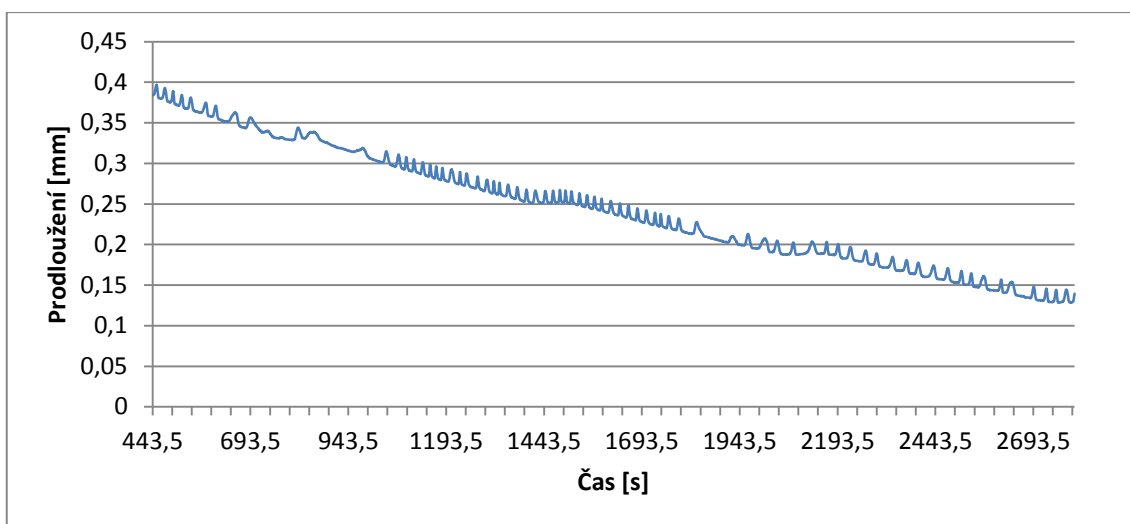
Příloha č. 17: Průběh deformace vzorku T825_F0,5_t90



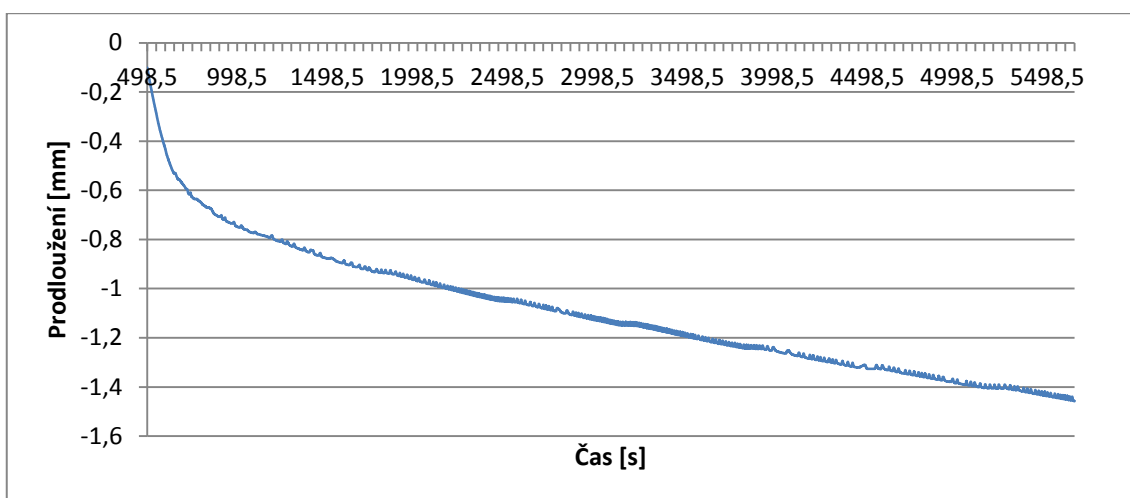
Příloha č. 18: Průběh deformace vzorku T825_F0,7_t40



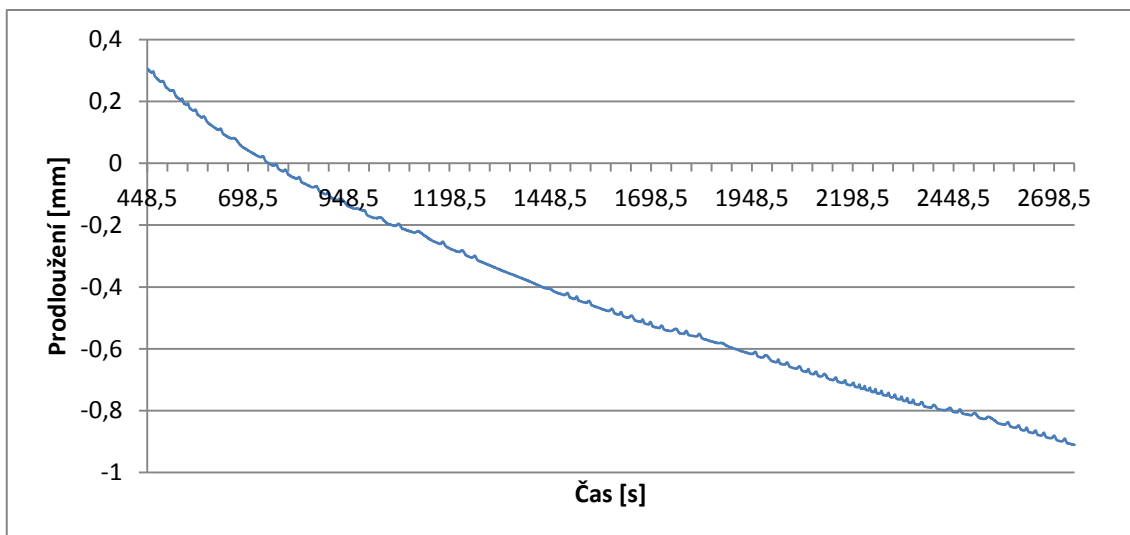
Příloha č. 19: Průběh deformace vzorku T825_F0,7_t90



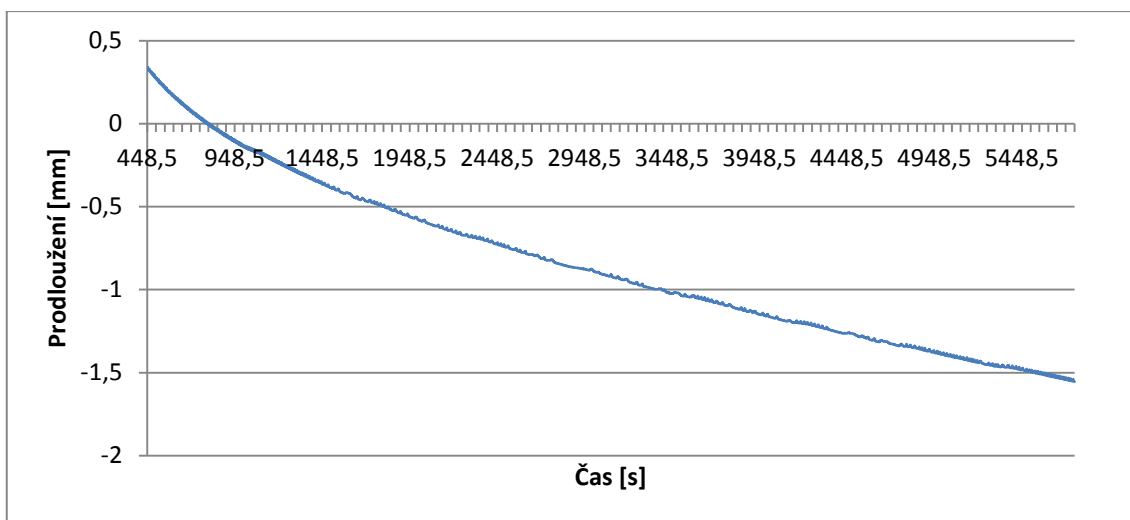
Příloha č. 20: Průběh deformace vzorku T860_F0,5_t40



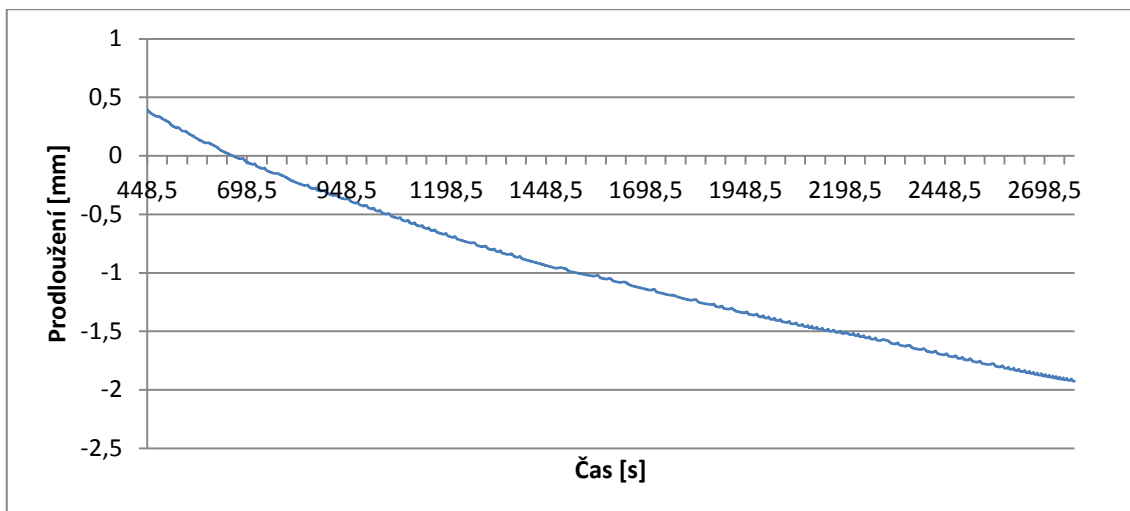
Příloha č. 21: Průběh deformace vzorku T860_F0,5_t90



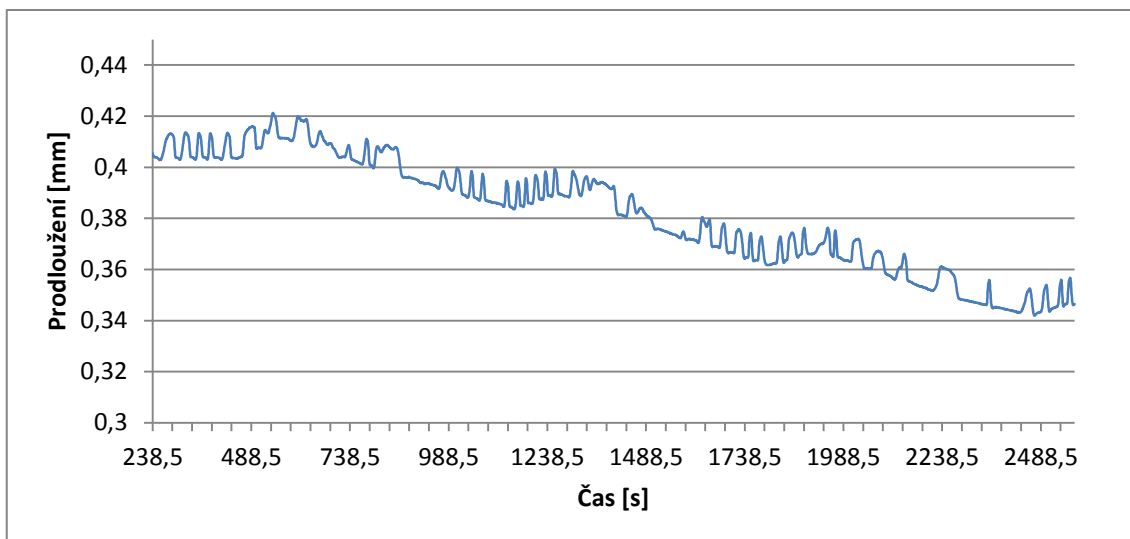
Příloha č. 22: Průběh deformace vzorku T860_F0,8_t40



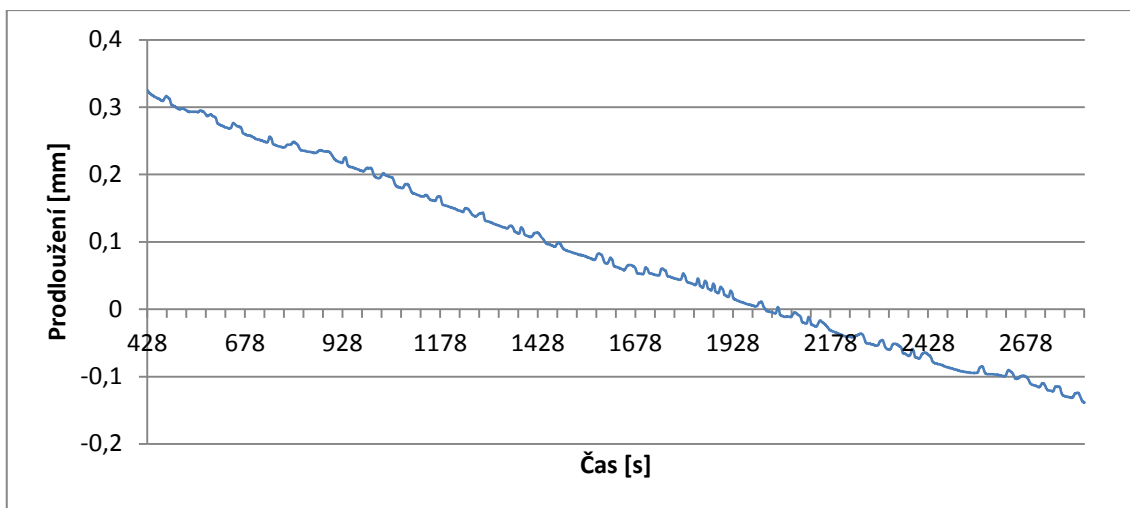
Příloha č. 23: Průběh deformace vzorku T860_F0,8_t90



Příloha č. 24: Průběh deformace vzorku T900_F0,3_t40



Příloha č. 25: Průběh deformace vzorku T860_F0,5_t40_br



Příloha č. 26: Průběh deformace vzorku T860_F0,5_t40_br_Ar