

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

Zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Svařování vybraných typů svarů aluminidu železa typu Fe_3Al metodou 141

Welding of chosen types of welds of iron aluminide Fe_3Al by method 141

Lukáš Zaňka

KSP – SM – B39

Vedoucí diplomové práce: doc.Ing Heinz Neumann, CSc. – TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	42
Počet tabulek	8
Počet obrázků	47

Datum: 6. 1. 2012

Originální zadání bakalářské práce

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: B2341-Strojní
Student: Lukáš Zaňka
Téma práce: Svažitelnost vybraných typů aluminidu železa typu Fe_3Al
metodou 141
Welding of chosen types of welds of iron aluminide
 Fe_3Al by method 141
Číslo BP: KSP – SM – B39
Vedoucí BP: doc. Ing Heinz Neumann, CSc. – TU v Liberci

Abstrakt:

Práce je zaměřena na ověření svažitelnosti aluminidu železa typu Fe_3Al legovaného niobem. Byly realizovány tupé svary metodou 141 s parametry zvolenými na základě výsledků experimentů zaměřených na svařování aluminidu železa typu Fe_3Al legovaného Ce. Svařovací proces byl monitorován programem WeldMonitor 3,5 a svarové spoje byly hodnoceny vizuální kontrolou a metalografickým rozbořem.

Abstract:

The aim of the thesis is to test weldability of iron aluminide Fe_3Al alloyed with niobium. There are butt welds made by method 141 with parameters chosen on the basis of results of experiments aimed at welding of iron aluminide Fe_3Al alloyed with Ce. The welding process has been monitored by the programme WeldMonitor 3.5 and welding joints were checked and evaluated visually as well as by metallographic analysis.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežné prohlášení, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 6. Ledna 2012

.....

Lukáš Zaňka

U Hřiště 379

Trutnov 2

Poděkování:

Touto cestou bych chtěl moc poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Heinzu Neumannovi, CSc. Za jeho pomoc při experimentální činnosti a cenné rady pro vypracování celé bakalářské práce.

Rád bych také poděkoval svým rodičům za to, že mě po celou dobu studia podporovali.

Obsah

<u>1 Úvod</u>	9
<u>2 TEORETICKÁ ČÁST</u>	10
2.1 Metoda svařování 141 podle ČSN EN 4063	10
2.1.1 <i>Zdroje svařovacího proudu</i>	10
2.1.2 <i>Elektrody</i>	12
2.1.3 <i>Výhody a nevýhody WIG svařování</i>	14
2.2 Aluminidy železa	15
2.2.1 <i>Vlastnosti slitin na bázi Fe₃Al</i>	15
2.2.2 <i>Mechanické vlastnosti</i>	17
2.2.3 <i>Příměsi</i>	19
2.2.4 <i>Svařitelnost</i>	20
2.3 Dosud realizované ověřovací zkoušky svažitelnosti Fe₃Al	20
<u>3 Experimentální část</u>	21
3.1 Výroba polotovarů	22
3.1.1 <i>Příprava keramické skořepinové formy</i>	22
3.1.2 <i>Válcování</i>	22
3.1.3 <i>Tepelné zpracování</i>	23
3.1.4 <i>Struktura</i>	23
3.2 Ověření svažitelnosti	24
3.2.1 <i>Pracoviště pro svařování</i>	25
3.2.2 <i>Metalografická laboratoř</i>	26
3.3 Svařování vzorků A1 a A2	27

3.3.1 Průběh svařování.....	28
3.3.2 Vyhodnocení prvního experimentu.....	29
3.4 Svařování vzorků A1 a A2'	30
3.4.1 Průběh svařování.....	31
3.4.2 Vyhodnocení druhého experimentu.....	32
3.5 Svařování vzorků A3 a A4.....	34
3.5.1 Průběh svařování.....	35
3.5.2 Vyhodnocení třetího experimentu.....	36
<u>4 Závěr</u>.....	39
<u>5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</u>.....	40

Seznam použitých zkratk a symbolů

WIG – TIG	Wolfram Inert Gas – Tungsten Inert Gas – Svařování netavící se (wolframovou) elektrodou v inertním plynu	
DC	Direct Current – Stejnosměrný proud	
AC	Alternating Current – Střídavý proud	
ΔI	Změna proudu	[A]
ΔU	Změna napětí	[V]
Al_2O_3	Oxid hliníku	
I_z	Základní proud	[A]
I_p	Impulzní proud	[A]
at.	Atomové procento	[%]
hmot.	Hmotnostní procento	[%]
T_p	Teplota přehřevu	[°C]
Q	Vnesené teplo [kJ/mm]	[kJ·mm ⁻¹]
I	Proud oblouku	[A]
U	Napětí oblouku	[V]
v_s	Rychlost svařování	[mm·s ⁻¹]
η	Účinnost	[-]
HCl	Kyselina chlorovodíková	
H ₂ O	Voda	

1 Úvod

Aluminidy železa jsou poměrně nový perspektivní materiál. Díky svým vlastnostem jako je dobrá otěruvzdornost, odolnost vůči kavitaci nebo odolnost vůči síře si aluminidy získávají pozornost. Díky těmto vlastnostem se předpokládá jejich využití například na konstrukční součásti letadel, zařízení pro chemickou výrobu, komponenty jaderných reaktorů, lopatky pro turbíny a kompresory tryskových motorů, součástky spalovacích motorů atd. V České republice je výzkum spojený s tímto materiálem zatím na začátku[4].

V bakalářské práci se zadáním: „Svařování vybraných typů svarů aluminidu železa typu Fe_3Al metodou 141“, je jako základní cíl nalezení vhodných postupů a technologických podmínek pro zhotovení svarových spojů bez výskytu trhlin, neboť při svařování intermetalik je všeobecně vysoká náchylnost k tvorbě trhlin překážkou pro účelné použití této technologie spojování [3, 4].

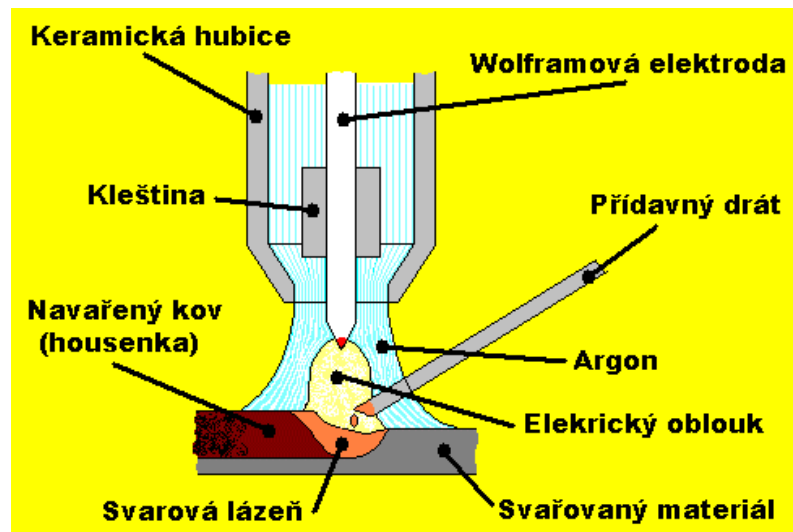
Tato práce navazuje na ověřovací zkoušky zaměřené na praktickou aplikaci metody WIG při svařování plechů tloušťky 4 až 5,5 mm ze slitiny typu Fe_3Al modifikované Cr, Ce, Mn a C, provedené na katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci. Dále pak na diplomovou práci Horáka [2].

Tato bakalářská práce vznikla s podporou v rámci specifického vysokoškolského výzkumu na Technické univerzitě v Liberci – projekt SGS 2822.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Metoda svařování 141 podle ČSN EN 4063

WIG je metoda svařování elektrickým obloukem, netavící se wolframovou elektrodou pod ochrannou atmosférou (argon, helium). Při svařování hoří elektrický oblouk mezi základním materiálem a wolframovou elektrodou. Svařovat lze bez přídavného materiálu, pouze roztavením a slitím základního materiálu, nebo s použitím přídavného materiálu podobného složení jako základní materiál. Metoda WIG svařování může být prováděna ručně, lze jí také částečně mechanizovat nebo úplně automatizovat. Princip je popsán na obrázku 2.1 a je shodný pro ruční, mechanizované i automatické svařování. Při ruční metodě svářeč drží v jedné ruce hořák, v druhé drží drát, který přidává do lázně dle potřeby po kapkách. Při částečně mechanizovaném svařování má svářeč v ruce hořák s vlastním podavačem drátu. Posun drátu do lázně ovládá svářeč tlačítkem na hořáku. Při úplné automatizaci je hořák upnut například v robotu a vedení hořáku i přídavného materiálu je řízeno automaticky [1, 2].

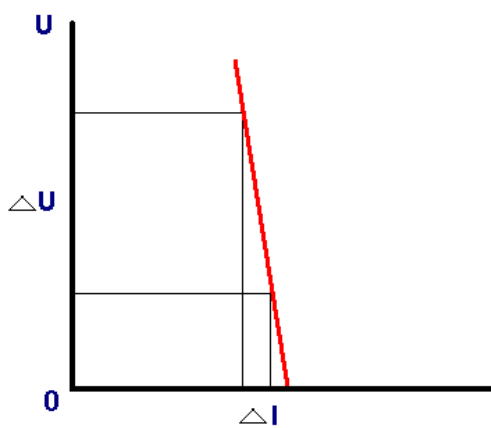


Obr. 2.1 Princip svařování metodou WIG [1]

2.1.1 Zdroje svařovacího proudu

Zdroje pro metodu WIG mohou být jak stejnosměrné (DC), tak i střídavé (AC). Oba duhy zdrojů však musí splňovat strmou statickou V-A charakteristiku, která je v idealizované podobě zobrazena na obrázku 2.2. Statická charakteristika zdroje je závislost napětí na proudu při určitém

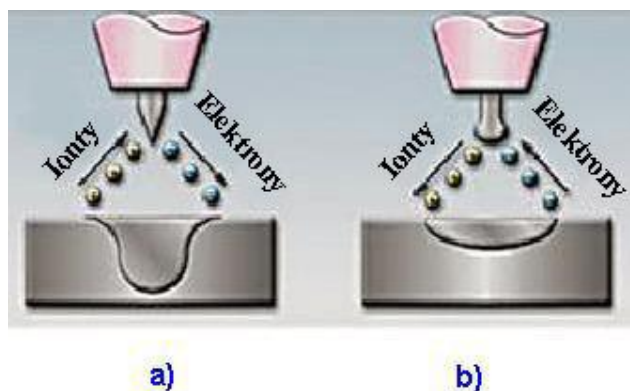
nastavení regulačního členu. Při strmé charakteristice dochází při větších změnách napětí (ΔU) na oblouku jen k minimálním změnám svařovacího proudu (ΔI). Napětí na oblouku je úměrné délce oblouku. Tudíž i při velké změně délky oblouku způsobené ručním držením hořáku svářečem, se svařovací proud mění jen minimálně [1, 2].



Obr. 2.2 Strmá statická V-A charakteristika WIG svářečky [1]

➤ *Svařování stejnosměrným proudem*

Na obrázku 2.3 je zobrazena přímá a nepřímá polarita pro svařování stejnosměrným proudem. U přímé polarity je na elektrodě záporný pól a na materiálu je pól kladný. Při použití nepřímé polarity je zapojení opačné. V praxi se používá především přímé polarity [1, 2].



Obr. 2.3 WIG svařování DC – a) přímá polarita, b) nepřímá polarita [2]

➤ *Svařování střídavým proudem*

Při tomto typu svařování se polarita periodicky mění. Střídavý proud nám umožní využít výhod přímé i nepřímé polarity najednou (obr. 2.4). Používá se

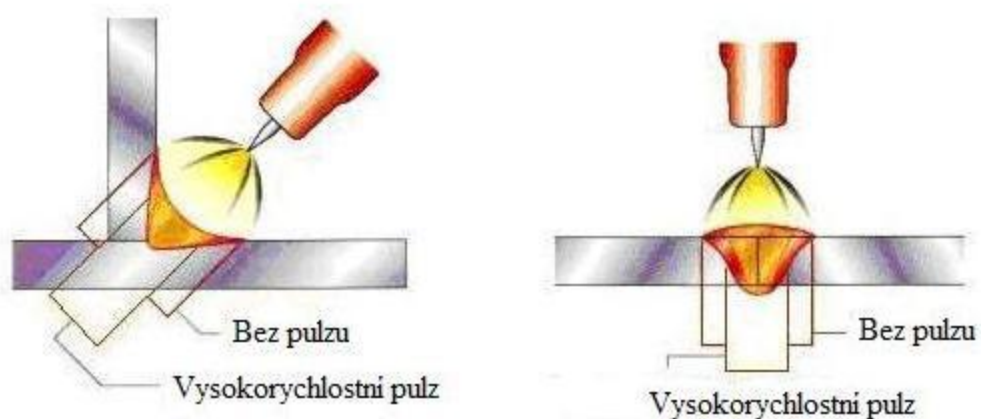
ke svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin kvůli čistícím účinkům. Čistící účinek vzniká, když je elektroda připojena na kladný pól. Při této polaritě je wolframová elektroda více namáhána. Při opačné polaritě dochází k většímu natavení základního materiálu. Zjednodušeně lze říci, že se materiál nejprve očistí a pak svaří [1, 2].



Obr. 2.4 WIG svařování AC [2]

➤ **Svařování pulzním proudem**

Jedná se o nejnovější způsob WIG svařování (obr. 2.5), při této metodě se proud mění pravidelně s časem mezi dvěma proudovými hladinami a mezi základním proudem I_z a impulzním proudem I_p . Průběh proudu může být pravoúhlý, lichoběžníkový, sinusový nebo jiný. Pulzní svařování lze použít při svařování stejnosměrným proudem i střídavým proudem [1, 2].



Obr. 2.5 Rozdíl mezi svařování s pulzem a bez pulzu [1]

2.1.2 Elektrody

Pro WIG svařování se používají nelegované elektrody z čistého wolframu, dále pak legované oxidy Thoria, Lanthanu, Ceria a Zirkonu.

Elektrody se dělí podle příměsí (legur). V tabulce 2.1 je uvedeno barevné označení pro jednotlivé typy elektrod [1].

Tab. 2.1 Druhy elektrod pro WIG svařování [1]

Označení elektrody	Barva	Legování
WP	zelená	čistý wolfram 99,8%
WT 10	žlutá	thorium 1% ThO ₂
WT 20	červená	thorium 2% ThO ₂
WT 30	fialová	thorium 3% ThO ₂
WT 40	oranžová	thorium 4% ThO ₂
WC 20	šedá	cerium 2,0% CeO ₂
WL 10	černá	lanthan 1,0% LaO ₂
WL 15	zlatá	lanthan 1,5 % LaO ₂
WL 20	modrá	lanthan 2,0% LaO ₂
WZ 08	bílá	zirkon 0,8% ZrO ₂

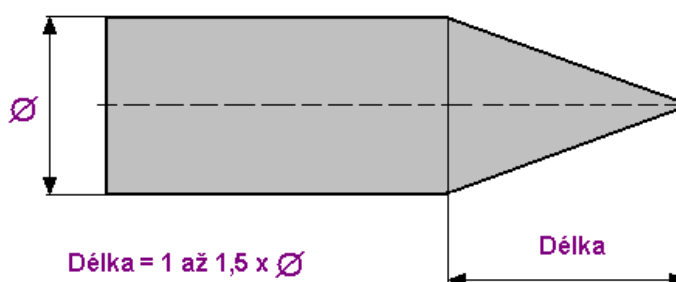
➤ *Průměry elektrod a jejich délky*

Standardně vyráběné průměry elektrod: 1,0 - 1,6 - 2,0 - 2,4 - 3,2 - 4,0 - 4,8 - 6,0 a 6,4 mm.

Standardně vyráběné délky elektrod: 50, 75, 150 a 175 mm [1].

➤ *Broušení wolframových elektrod*

Tvar konce elektrody ovlivňuje zásadním způsobem průběh svařování a kvalitu svaru. Elektrody se brousí do špičky (obr. 2.6). Délka špičky má být asi 1 - 1,5 násobek průměru elektrody [1].

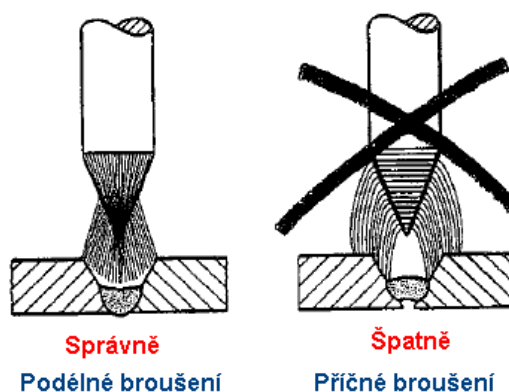


Obr. 2.6 Tvar wolframové elektrody [1]

➤ *Směr broušení*

Elektrody se brousí podélně, aby rýhy způsobené broušením byly rovnoběžné s podélnou osou elektrody (obr. 2.7). Vrypy způsobené

příčným broušením způsobují nestabilní oblouk a vylamování částiček wolframu. Vylomené částičky se pak mohou dostat do svarové lázně. Příčným broušením také hrozí snadné zlomení elektrody. Elektroda se při broušení otáčí velice pomalu [1].



Obr. 2.7 Vliv směru broušení na elektrický oblouk [1]

2.1.3 Výhody a nevýhody WIG svařování

Nejvýznamnější výhodou této metody je velmi dobrá kontrola nad svarovou lázní. Díky tomu, že na rozdíl od jiných metod svařování elektrickým obloukem, nedochází k nepřetržitému přísunu přídavného materiálu do lázně, může svářeč mnohem lépe ovlivňovat svarovou lázeň a tím i vlastnosti svarového spoje. Přídavný materiál si svářeč přidává sám podle potřeby. Svařovat můžeme bez přídavného materiálu, což je vhodné, protože svarový kov má shodné chemické složení se základním materiálem. Lze také jako přídavný materiál použít odštířek nebo úlomek ze základního materiálu, což nám opět zajistí stejné složení základního materiálu a svarového kovu. Další výhodou je svařování vysokolegovaných ocelí, což nám umožní vysoká teplota elektrického oblouku. Velice úzké teplotní pole nám tepelně neovlivní materiál v širokém pásmu okolo svaru a dosáhneme velké hloubky závaru. Díky inertnímu plynu je svar chráněn před nepříznivými účinky vzduchu. Jako další výhodu lze považovat možnost svařování velmi tenkých materiálů. Při tomto typu svařování lze použít malé proudy v jednotkách ampér, ve výjimečných případech můžeme svařovat i kovové fólie proudy menšími než 1A [1, 2].

Podstatná nevýhoda této metody svařování je její vysoká náročnost na svařovací zařízení, to platí zejména pro svařování střídavým proudem.

Hlavní nevýhodou WIG svařování je malá produktivita práce, proto se nehodí pro velkosériovou výrobu jednoduchých svařenců, používá se spíše na tvarově složitě konstrukce z ušlechtilých materiálů [1, 2].

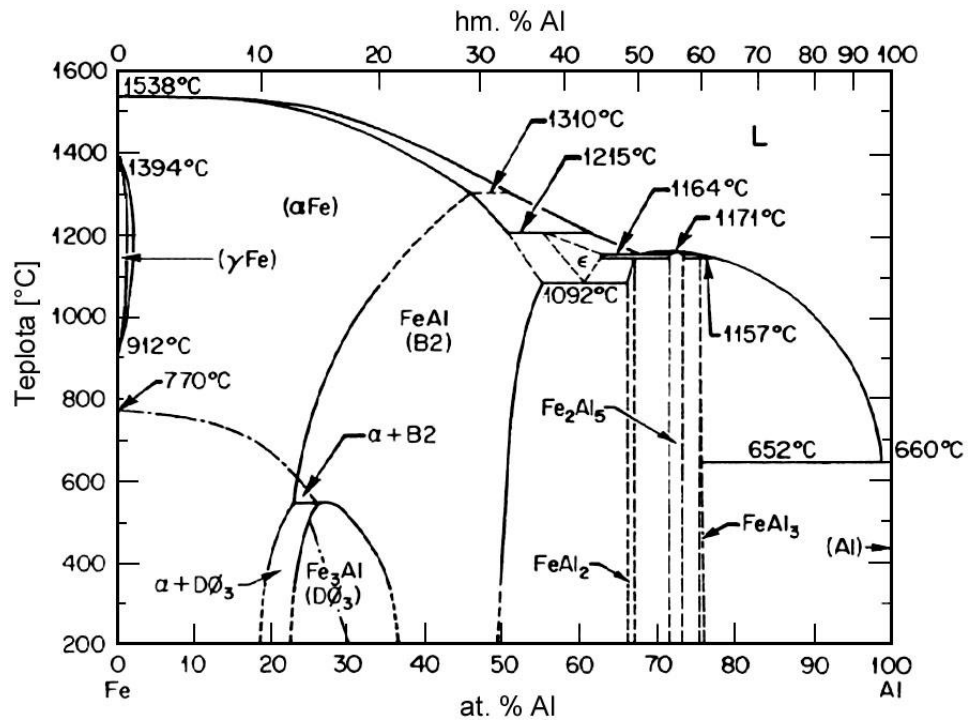
2.2 Aluminidy železa

Výborná odolnost proti korozi byla u slitin s obsahem hliníku vyšším jak 18%, zjištěná v třicátých letech minulého století. Na odborném semináři v roce 2003 byly odhaleny základní informace o nových typech slitin Fe – Al s vysokým obsahem hliníku (20 – 40 at. %). V české republice se prováděl výzkum takzvaných intermetalik v rámci grantového projektu GAČR č. 106/02/0687 „Úprava vlastností intermetalik na bázi Fe_3Al termomechanickým zpracováním a aditivy“. Díky jejich relativně nízké materiálové nákladnosti můžeme ušetřit prvky jako Cr, Ni. Aluminidy mají pevnost v tahu porovnatelnou s mnoha ocelmi. Díky své limitované kujnosti při běžných teplotách a poklesu pevnosti nad $600^{\circ}C$ nemohly být aluminidy používány jako konstrukční materiály. Až v poslední době bylo zjištěno, že tažnost lze zlepšit v tvářených slitinách úpravou složení a mikrostruktury [2, 3, 4].

2.2.1 Vlastnosti slitin na bázi Fe_3Al

➤ *Struktura fází aluminidu železa v okolí složení Fe_3Al*

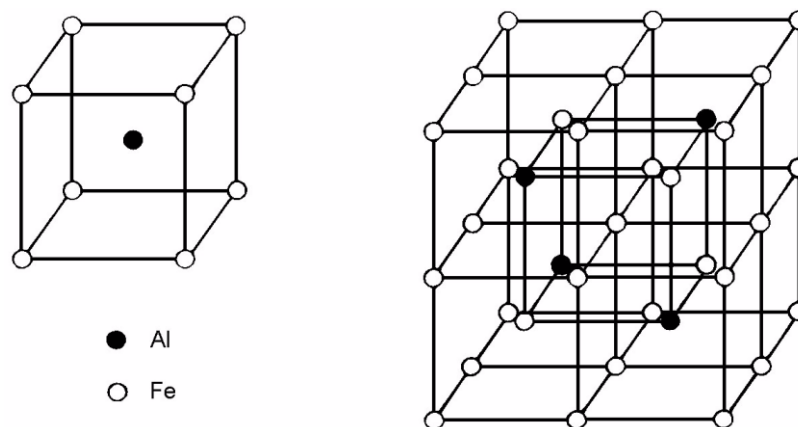
Slitiny s uspořádanou strukturou nazýváme intermetalické sloučeniny (intermetalická fáze nebo intermetalikum). Tento uspořádaný tuhý roztok vzniká z neuspořádaného při stechiometrickém složení a za určité teploty. Ve fázovém diagramu binárního systému Fe-Al (*obr. 2.8*), jsou zobrazeny různé struktury. Pro konstrukční aplikace jsou z nich nejdůležitější: tuhý roztok α , uspořádané struktury B2 a D0₃. Vzniklé struktury jsou závislé na teplotě a složení. Jedná se o neuspořádaný tuhý roztok hliníku v železe a dvě uspořádané fáze B2 a D0₃ [2, 3, 4].



Obr. 2.8 Rovnovážný diagram Fe – Al [3]

➤ Mikrostruktury aluminidu železa

Na obrázku 2.9 jsou základní buňky uspořádané krystalové struktury D₀₃ a B2, vycházejí z prostorově středěné krychlové struktury. Mřížka B2 má ve středu krychle atom hliníku a v rozích atomy železa. Vzniká průnikem dvou prostých krychlových mřížek obsazených železem a hliníkem s mřížkovým parametrem a_0 . Mřížka D₀₃ je složena z osmi elementárních buněk B2 se střídavým umístěním atomů Fe a Al v prostorově středěné poloze, s mřížkovým parametrem $a_0' = 2a_0$ (B2) [2, 4].



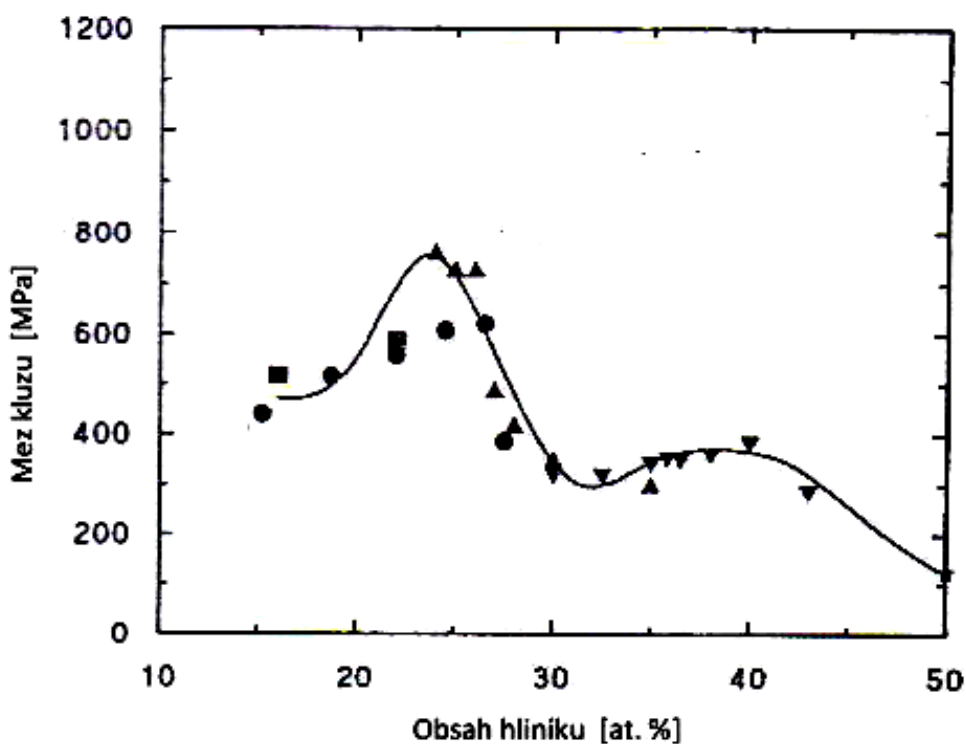
a) FeAl - B2

b) Fe₃Al - D₀₃

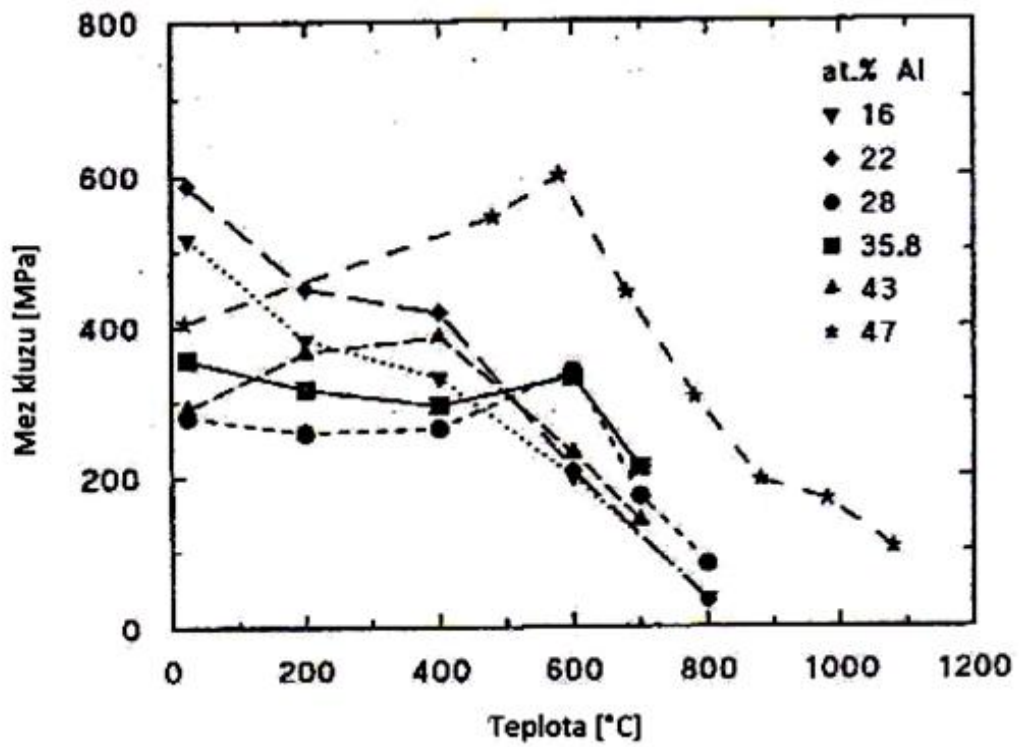
Obr. 2.9 Základní buňka struktury B2 a D₀₃ [4]

2.2.2 Mechanické vlastnosti

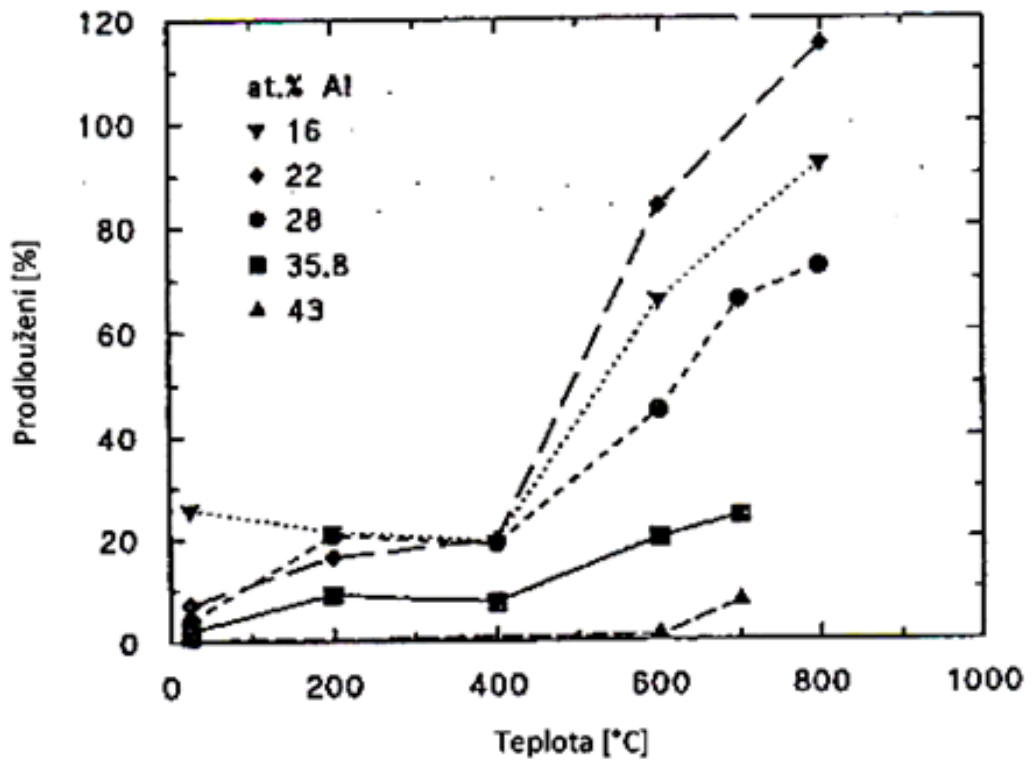
Mechanické vlastnosti aluminidu železa může ovlivnit mnoho faktorů, jako např.: obsah železa (stechiometrie), uspořádání (typ, množství, velikost uspořádaných domén), tepelné zpracování, slitinové přísady, prostředí, mikrostruktura. Při zvýšení obsahu hliníku má mez kluzu u binárních slitin tendenci k růstu (za pokojové teploty). Maxima dosahuje kolem složení Fe_3Al , následně už jen klesá (obr. 2.10). Většina používaných binárních slitin s 28at.% hliníku má maximální mez pevnosti (závislé na teplotě) blízko přechodové teploty D03-B2, která odpovídá 550 °C (obr. 2.11). Tepelným zpracováním lze zlepšit tažnost. Při zvýšení teploty nad 600°C výrazně klesá pevnost, naopak prodloužení narůstá (obr. 2.12). Z obrázku 2.13 vyplývá, že prodloužení klesá s narůstajícím obsahem hliníku [2, 4].



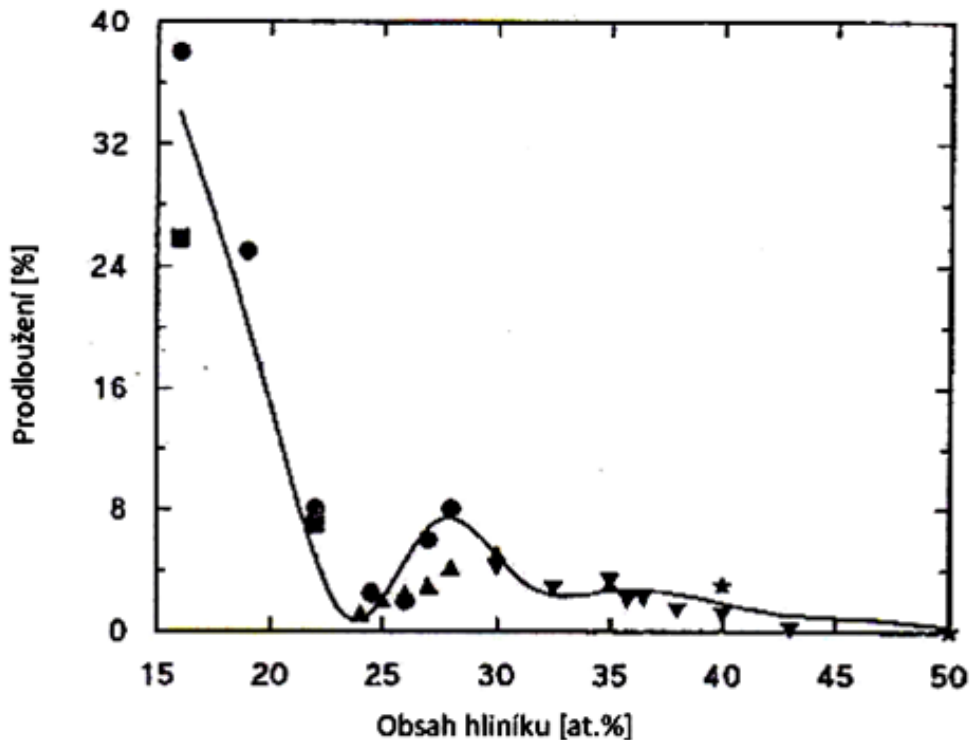
Obr. 2.10 Graf meze kluzu v závislosti na obsahu hliníku [2]



Obr. 2.11 Graf meze kluzu v závislosti na teplotě pro různé obsahy hliníku [2]



Obr. 2.12 Graf prodloužení v závislosti na teplotě pro různé obsahy hliníku [2]



Obr. 2.13 Graf prodloužení v závislosti na obsahu hliníku [2]

2.2.3 Příměsi

Legující prvky přidáváme za účelem zlepšení především mechanických vlastností. Vhodným použitím příměsí můžeme potlačit křehkost při nízkých teplotách a zlepšit tvářitelnost při pokojové teplotě [2, 4].

- *Chró*m - Obsah chrómu je vhodný do 6at%. Pozitivně ovlivňuje tvoření oxidů. Výsledkem je zvýšení tažnosti za pokojové teploty. Dobrou vlastností je zvýšení svařitelnosti materiálu. Jako jediný zlepšuje tažnost při pokojové teplotě. Při použití 2-6at.% chrómu se zvýší tažnost dvojnásobně, zatímco se mez kluzu zmenší.
- *Cér* – Zlepšuje tažnost a vysokoteplotní pevnost.
- *Borid titanu* - Zlepšuje pevnost, tažnost, zhoršuje svařitelnost.
- *Bór* - Zlepšuje tažnost.
- *Molybden* - Zvyšuje teplotu fázového přechodu B2 - D03. Dochází ke zjemnění zrna. Zlepšuje vysokoteplotní vlastnosti Fe₃Al, ale s jeho rostoucím obsahem klesá tažnost za pokojové teploty.
- *Měď* - Způsobuje zvýšení tvrdosti a meze kluzu, ale také zvýšení křehkosti.

- *Uhlík* - Zvyšuje tažnost a mez kluzu, v malém množství zlepšuje svařitelnost.
- *Křemík* - Zvyšuje pevnost za vyšších teplot, ale také křehkost. Proto se používá jen zřídka.
- *Titan* - Zvyšuje pevnost za vyšších teplot.
- *Niob* - Zlepšuje svařitelnost.

2.2.4 Svařitelnost

Aluminidy typu Fe_3Al mají z hlediska svařitelnosti specifické vlastnosti. Za pokojové teploty mají malou tažnost. Mají velký součinitel tepelné roztažnosti a nízký součinitel tepelné vodivosti. Za zvýšených teplot mají poměrně vysokou mez kluzu (snižuje se možnost odbourání vnitřních napětí plastickou deformací ve fázi ochlazování svaru a při dohřevu na teplotách pod 600 až 700 °C) [3].

Pro svařování aluminidu Fe_3Al se nabízejí v zásadě dvě cesty:

- minimalizace množství vneseného tepla, tj. svařování s koncentrovanými zdroji tepla (laserové a elektronové svařování),
- svařování při předehřevu do oblasti teplot, kdy materiál vykazuje přijatelné hodnoty plasticity [3].

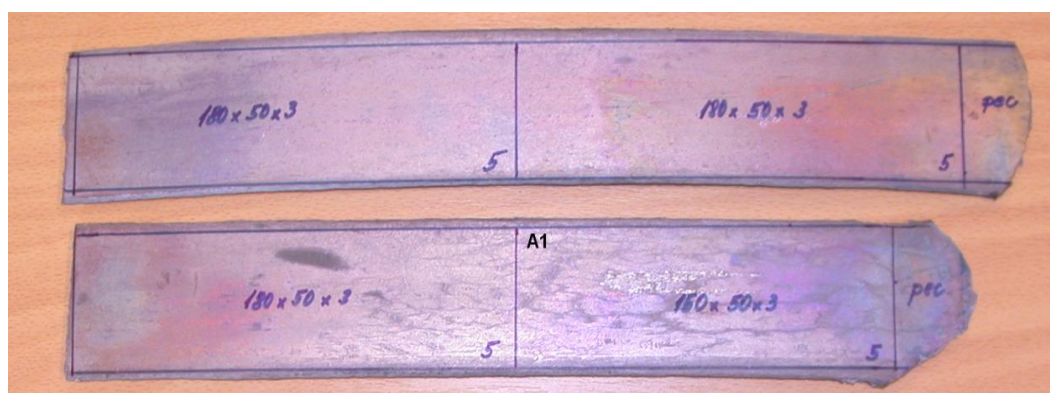
2.3 Dosud realizované ověřovací zkoušky svařitelnosti Fe_3Al

Na katedře strojírenské technologie TU v Liberci byla ověřována svařitelnost vývojové slitiny typu Fe_3Al připravené v rámci grantového projektu GAČR č. 106/02/0687. K dispozici byly vzorky se směrným chemickým složením 16,13 % Al, 2,85 % Cr, 0,06 % Ce, 0,46 % Mn a 0,04 % C (hmotnostní %). Zkoušky byly realizovány metodou WIG a jako svařovací zdroj byl použit MIGATRONIC 3000 AC/DC. Předehřev vzorků se prováděl na vyhřívané upínací desce. Teplota předehřevu byla kontrolována pomocí termočlánku, který byl umístěn ve vyvrtaném otvoru ve vzorku. Výsledkem těchto experimentů bylo zjištěno, že vzorky svařované za předehřevu 400°C s dohřevem 2h na teplotě 700°C s následným ochlazením v olejové lázni nebo v peci neobsahují trhliny a lze je považovat za vyhovující [2, 3].

Na tyto závěry navazuje Horák [2]. Ve své diplomové práci se zabýval svařováním v poloze PA podle ISO 6947 na jednu housenku bez přídavného materiálu s hořákem upnutým na lineární dráze. Vzorky byly svařovány stejnosměrným proudem. Vzorky byly opatřeny termočlánky (NiCr - Ni) a před svařením předehřáty na upínací desce na teplotu 200 nebo 400°C. Ihned po svařování byly vloženy do pece vyhřáté na 700°C. Kvalita svaru byla hodnocena vizuálně a metalografickým rozbořem. Ani u jednoho vzorku se neobjevily trhliny zapříčiněné svařováním. Povrchy většiny svarů jsou proláklé, neboť se svary zhotovovaly bez přídavného materiálu [2].

3 Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce je zaměřena na realizaci svarů vzorků (obr. 3.14, 3.15) vyválcovanými z tyče-průřezu 30x40 mm. Polotovary jsou vyrobené z aluminidu železa legovaného Nb se směrným chemickým složením 15,9% Al, 5,5% Cr, 1% Nb, 0,05%C a zbytek Fe v hmot. %.



Obr. 3.14 Výchozí vzorky



Obr. 3.15 Výchozí vzorky

3.1 Výroba polotovarů

Tavba materiálu probíhala v Peci typu Leybold Heraeus. Tato pec umožňuje vsázku skrz vakuové předpecí. Vyzdívka kelímku pece - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}(20)$ Luekorma 10UID. Dusací hmota byla použita: Dürentrup Feuerfestprodukte GmbH.

3.1.1 Příprava keramické skořepinové formy

- Zásypový materiál molochit (Imerys Mineralis Limited – England Molochite – 200), 6 obalů
- vypalování v peci při 1000 °C 4 hodiny
- vyjmutí z pece a okamžitý přesun do vakuové komory
- odlití a zakrytí Sibralem

Vlastní tavba probíhala vsázkováním do vakua. Po roztavení bylo v peci vakuum $6 \cdot 10^{-2}$ mbar a teplota 1370 °C bez korekce. Při odlévání bylo vakuum $5 \cdot 10^{-1}$ mbar.

Tab. 3.1 Materiál pro vsázku

Surovina	Hmotnost (kg)
Předslitina Ferochrom Fe – Cr (70%) 0,03 %C	0,83
Předslitina Feroniob Fe – Nb (60%)	0,20
Arema	7,27
Al (čtyřdevítkový)	1,62

Skořepiny byly po odlití přikryté Sibralem, následovalo pozvolné chladnutí. Při ochlazení na teplotu 250°C proběhlo vytloukání. Následovalo tryskání Ni broky. Vtoky byly oddělené až po delší době v Liberci. Rozbroušení kotoučem tl. 1,6 mm, u materiálu byly pozorovány zvukové efekty signalizující vznik trhlin.

3.1.2 Válcování

Následná úprava tyčí válcováním proběhla 22. 7. 2008. Průběh válcování je popsán v tabulce 3.2.

Tab. 3.2 postup válcování

Původní tloušťka	úběr →	← úběr	Konečná tloušťka	Čas dohřevu (min)
30	2	2	26	30
26	2	2	22	30
22	2	2	18	25
18	2	2	14	25
14	1,5	1,5	11	20/stříhání
11	1	1	9	25
9	1	1	7	25
7	1	1	5	25
5	1	2	3	

3.1.3 Tepelné zpracování

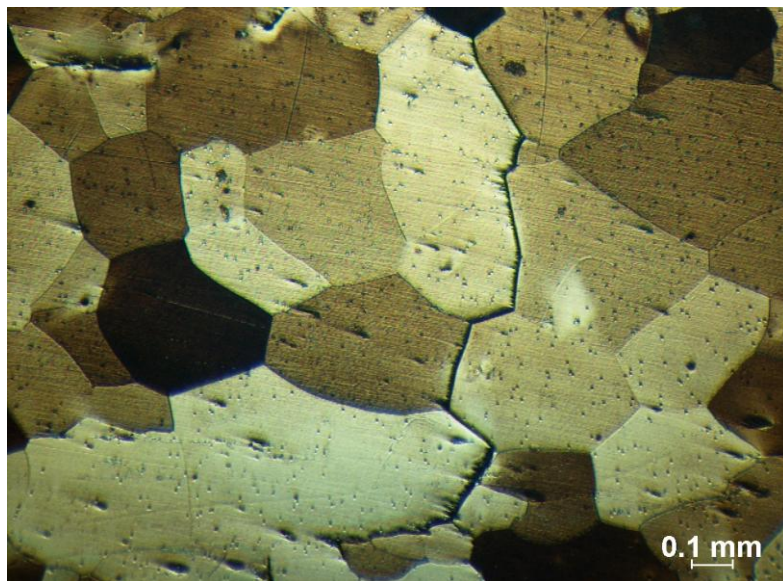
Po válcování byly tyče vloženy do pece vyhřáté na 800 °C. Na této teplotě byla pec udržována 1h, poté byla vypnuta. Ráno byla pec zapnuta a opět vyhřátá na 800 °C. Tyče byly postupně přestříženy na polovinu. Opět vloženy do pece vyhřáté na 800°C, výdrž na teplotě. Po uplynutí 1/2h, teplota zvýšena na 1250°C, rovnání pod lisem a opět vráceny do pece vyhřáté na 800°C. Po 2h byla pec vypnuta a vzorky v peci postupně chladly do druhého dne (23.7). Druhý den se vzorky vyjmuly a dochlady v zábalu sibalalu.

3.1.4 Struktura

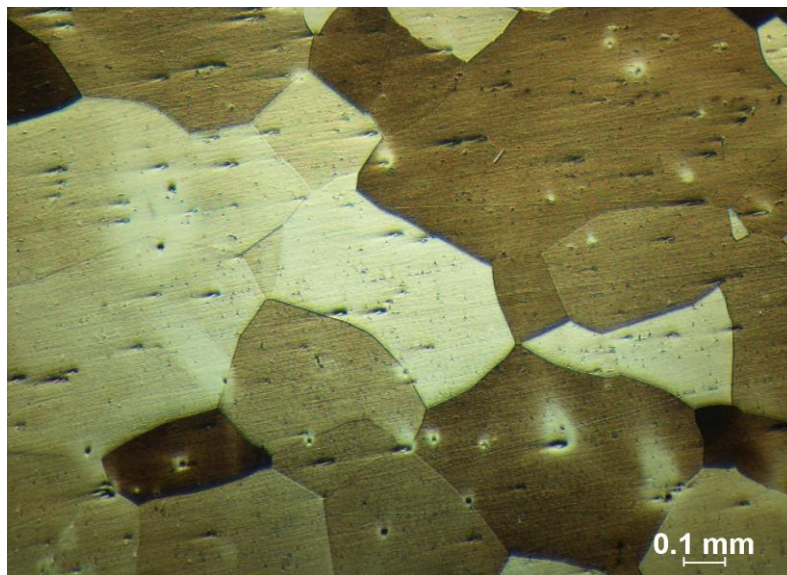
Z výchozího materiálu byly před svařováním odříznuty vzorky označené 5001 a 5002 viz obrázek 3.16. Jeden vzorek byl zkoumán v příčném řezu a druhý v podélném. Ze vzorků byly zhotoveny metalografické výbrusy (obr. 3.17, 3.18). Je vidět že materiál obsahoval mikrotrhliny v příčném směru již před svařováním. Trhlina lze pozorovat na hranicích zrn (obr. 3.17). Struktura v příčném i podélném směru je obdobná, to svědčí o tom, že po tváření došlo k rekrytalizaci.



Obr 3.16 Odříznuté vzorky 5001 a 5002



Obr. 3.17 Makrostruktura vzorku 5001



Obr. 3.18 Makrostruktura vzorku 5002

3.2 Ověření svařitelnosti

V experimentální části jsme se snažili docílit vyhovujícího svarového spoje aluminidu. Nalezením optimálních svařovacích podmínek. Průběh svařování byl zaznamenáván programem WeldMonitor 3.5 pro následné vyhodnocení. Ze všech svarů byl zhotoven metalografický výbrus. S použitím vzorce (1) jsme určili vnesené teplo.

$$Q = \frac{I \cdot U}{1000 \cdot v_s} \cdot \eta \quad (1)$$

Q... vnesené teplo [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]

I... proud oblouku [A]

U... napětí oblouku [V]

v_s ... rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

η ... účinnost metody 141 [-], $\eta=0,6$

3.2.1 Pracoviště pro svařování

Experimenty jsme prováděli ve svařovací laboratoři na katedře strojírenské technologie (obr. 3.19). Laboratoř je vybavena svařovacím zdrojem Migatronic Navigator 3000 AC/DC. Jako ochranný plyn byl zvolen čistý argon 4.8 od firmy AIR Products. Pro záznam svařovacích parametrů byl připojen počítač s programem WeldMonitor 3.5. K ustavení materiálu byla k dispozici upínací deska s transformátorem pro předehřev materiálu. K desce byl připevněn termoelektrický článek zaznamenávající průběh teplot. Deska má uprostřed vyfrézovanou drážku širokou 8mm. Drážka je pro tavidlo k ochraně kořene svaru. Pro pohyb hořáku bylo použito mechanizované dráhy s plynulou regulací rychlosti posuvu. K pohonu sloužil elektromotor s frekvenčním měničem. K přepočtu rychlosti z Hz na mm/s slouží tabulka 3.3. Na dohřev vzorku byla použita elektrická pec ELSKO.



Obr. 3.19 Svařovací laboratoř

Tab. 3.3 Převodové hodnoty [2]

Frekvence [Hz]	Otáčky [min ⁻¹]	Rychlost v_s [mm·s ⁻¹]
10	3	0,15
15	4,5	0,225
20	6	0,3
25	7,5	0,375
30	9	0,47
35	10,5	0,525
40	12	0,6
45	13,5	0,675
50	15	0,75
60	18	0,9
100	30	1,5

3.2.2 Metalografická laboratoř

V metalografické laboratoři byly provedeny metalografické výbrusy jak základního materiálu, tak i všech svarů. Laboratoř je vybavena několika bruskami a leštičkou. Po vybroušení a vyleštění, byly vzorky naleptány k následnému vyhodnocení pod mikroskopem (obr. 3.20). Všechny vzorky byly leptány leptadlem ROLASON, míchalo se v poměru: chlorid železitý - 5g, HCl - 50ml a H₂O - 100ml. Mikroskop byl vybaven kamerou NIKON a připojen k počítači s nainstalovaným programem NIS Elements pro zaznamenání makrostruktur.



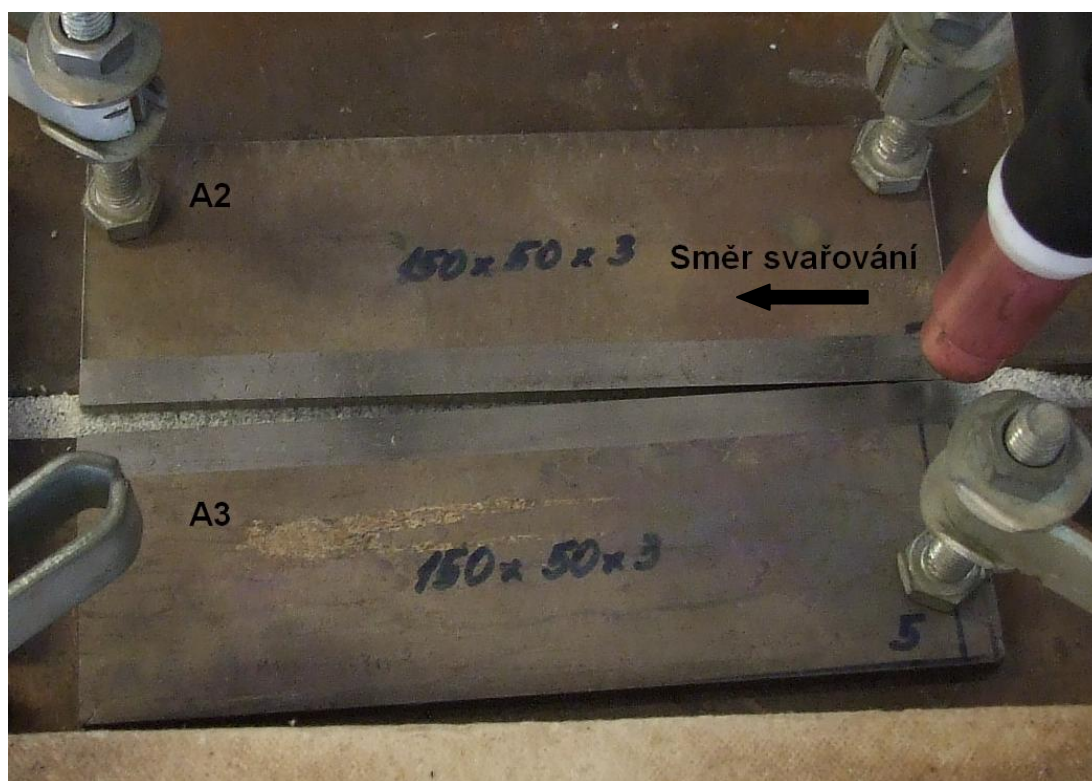
Obr. 3.20 Mikroskop

3.3 Svařování vzorků A1 a A2

Povrchová oxidace byla v místech svaru odstraněna ručním opilováním. První svar byl proveden ze vzorků A1 a A2 (Tab. 3.4). Vzorek A2 byl upnut napevno, vzorek A1 byl upevněn jen na jedné straně kvůli deformacím vznikajícím při svařování. Mezera mezi vzorky na konci svaru činila 5mm. Materiál byl předehřátý na 200°C. Pod kořenem svaru bylo v drážce tavidlo (obr. 3.21). Zdroj byl nastaven na střídavý proud 90A. Elektroda byla zvolena 3,2 mm, WT 20. Elektrický oblouk se zapaloval kontaktně přes grafitovou příložku. Posuv byl nastaven na 0.525 mm·s⁻¹.

Tab. 3.4 Rozměry vzorků

Označení vzorku	Rozměry [mm]
A1	150x50x4
A2	150x50x4

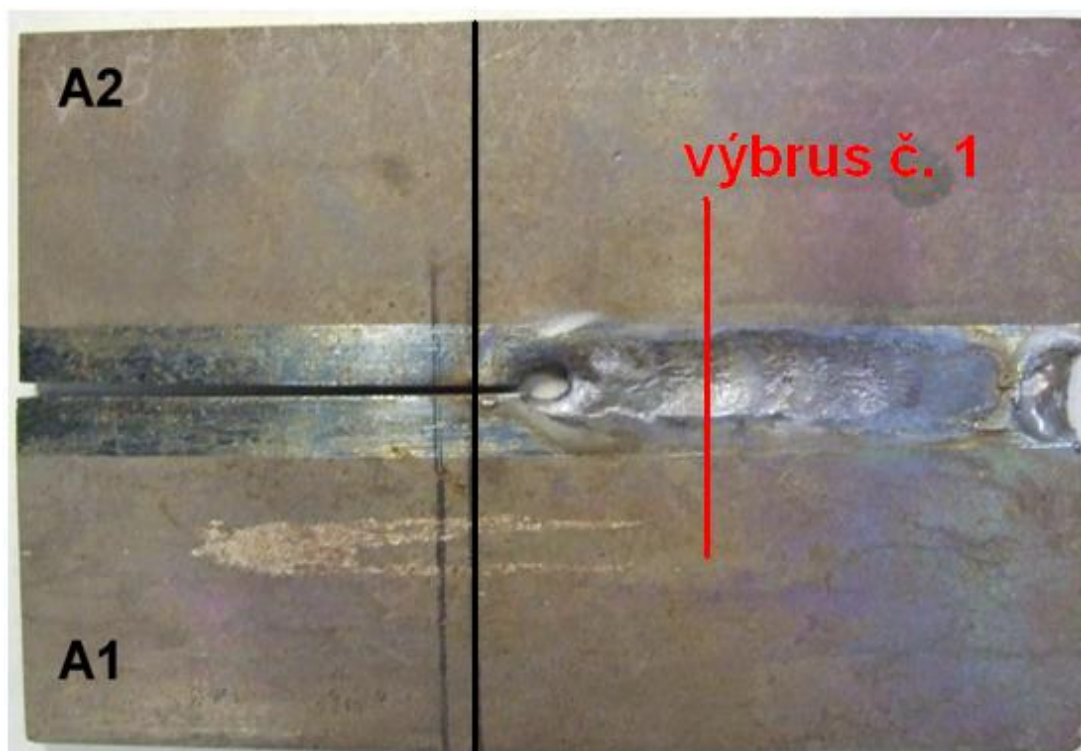


Obr. 3.21 Ustavené vzorky A2 a A3

3.3.1 Průběh svařování

Během svařování se ukázalo, že posuv je nedostačující. Posuv se během svařování zvyšoval po $0,075 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ až na hodnotu $0,825 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Zrychlování posuvu však nestačilo. Důsledkem čehož došlo k propálení materiálu, zhasnutí elektrického oblouku a ukončení svařování (obr. 3.22). Svařenec byl okamžitě vložen do pece vyhřáté na 750°C . Na této teplotě byla pec udržována 2h. Poté byla vypnuta a vzorek ponechán v peci 21h až do úplného vychladnutí.

Ze zaznamenaných grafů (obr. 3.23) jsem odečetl následující hodnoty. Spuštění záznamu odpovídá času $t = 0$. Zapálení elektrického oblouku nastalo v čase $t = 78\text{s}$. Svařování bylo ukončeno v čase $t = 180\text{s}$ a ukončení záznamu v čase $t = 400\text{s}$. celková doba svařování byla $t = 102\text{s}$.



Obr. 3.22 Svařené vzorky A1 a A2 s vyznačeným místem výbrusu



Obr. 3.23 Zaznamenané hodnoty pro svar 1

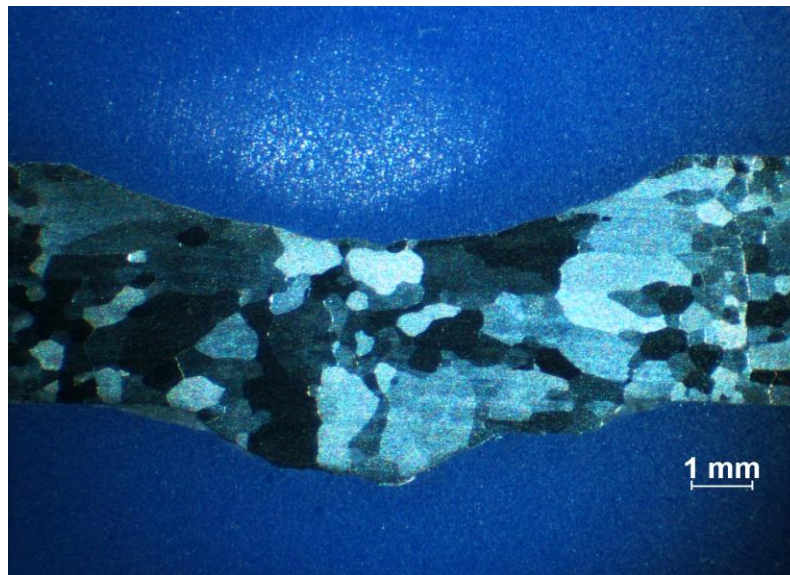
3.3.2 Vyhodnocení prvního experimentu

- Vnesené teplo nelze určit přesně. V průběhu svařování se zvyšovala rychlost posuvu. Čas změny posuvu nebyl zaznamenán, tudíž nelze vypočítat přesnou hodnotu vneseného tepla.

- Metalografický výbrus č. 1

Výbrus byl proveden v místě vyznačeném na (obr. 3.22) červenou čarou. Řez byl proveden opatrně úhlovou bruskou. Na obrázku 3.24 je vidět značně proláklý tvar svaru. To bylo zapříčiněno nez hutněným tavidlem na ochranu kořene svaru a velkým elektrickým proudem v kombinaci s malou svařovací

rychlostí. Ve struktuře jsou vidět vnitřní trhliny. Tyto trhliny vznikaly až po svařování a vychladnutí vzorku. Byly doprovázeny zvukovými efekty signalizujícími vznik trhlín. Svar vykazuje hrubší strukturu jak základní materiál, díky čemuž lze určit hranice svarové lázně.



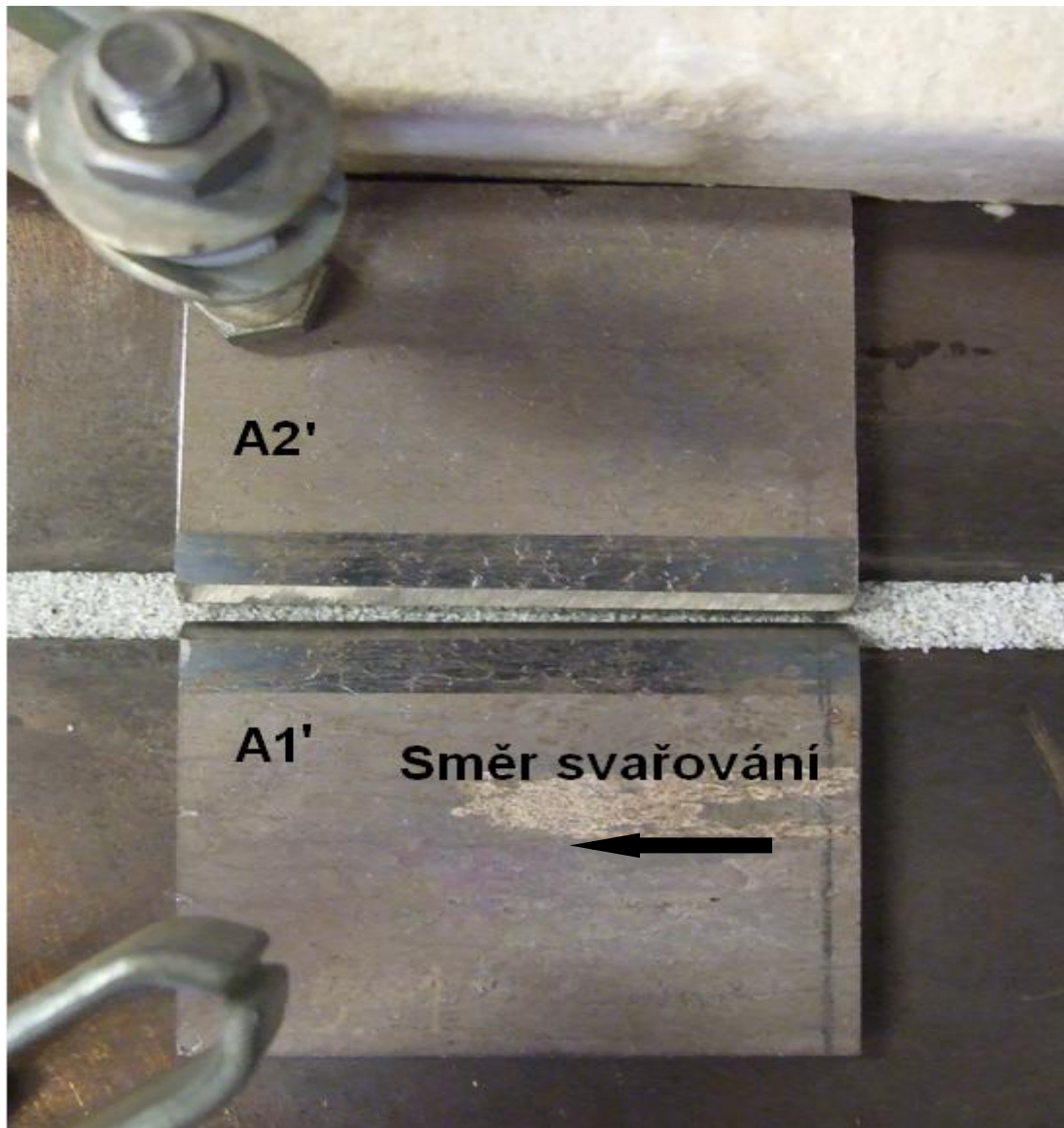
Obr. 3.24 Makrostruktura svaru č. 1 – 1,25x8

3.4 Svařování vzorků A1' a A2'

Pro druhý pokus byl použit materiál odříznutý ze vzorku A1 a A2. Na obrázku 3.22 je řez naznačen černou čarou. Úhel zkosení byl 60°. Mezera mezi vzorky byla na začátku svaru 0,8 mm, na konci svaru 1,6 mm. Rozměry vzorků jsou uvedeny v tabulce 3.5. Vzorek A2' byl ke stolu připevněn napevno, vzorek A1' byl volný kvůli deformacím vznikajícím při svařování (obr. 3.25). Vzorky byly přehřáté na 200°C. Tavidlo na ochranu kořene svaru bylo zhuťněno, aby nedošlo k propadnutí svaru. Svařovalo se ručně, zdroj byl nastaven na střídavý proud 90A. Jako přídatný materiál se použil aluminid podobného složení jako základní materiál. Elektroda byla zvolena 3,2 mm, WT 20. Elektrický oblouk se zapaloval kontaktně přes grafitovou příložku.

Tab. 3.5 Rozměry vzorků

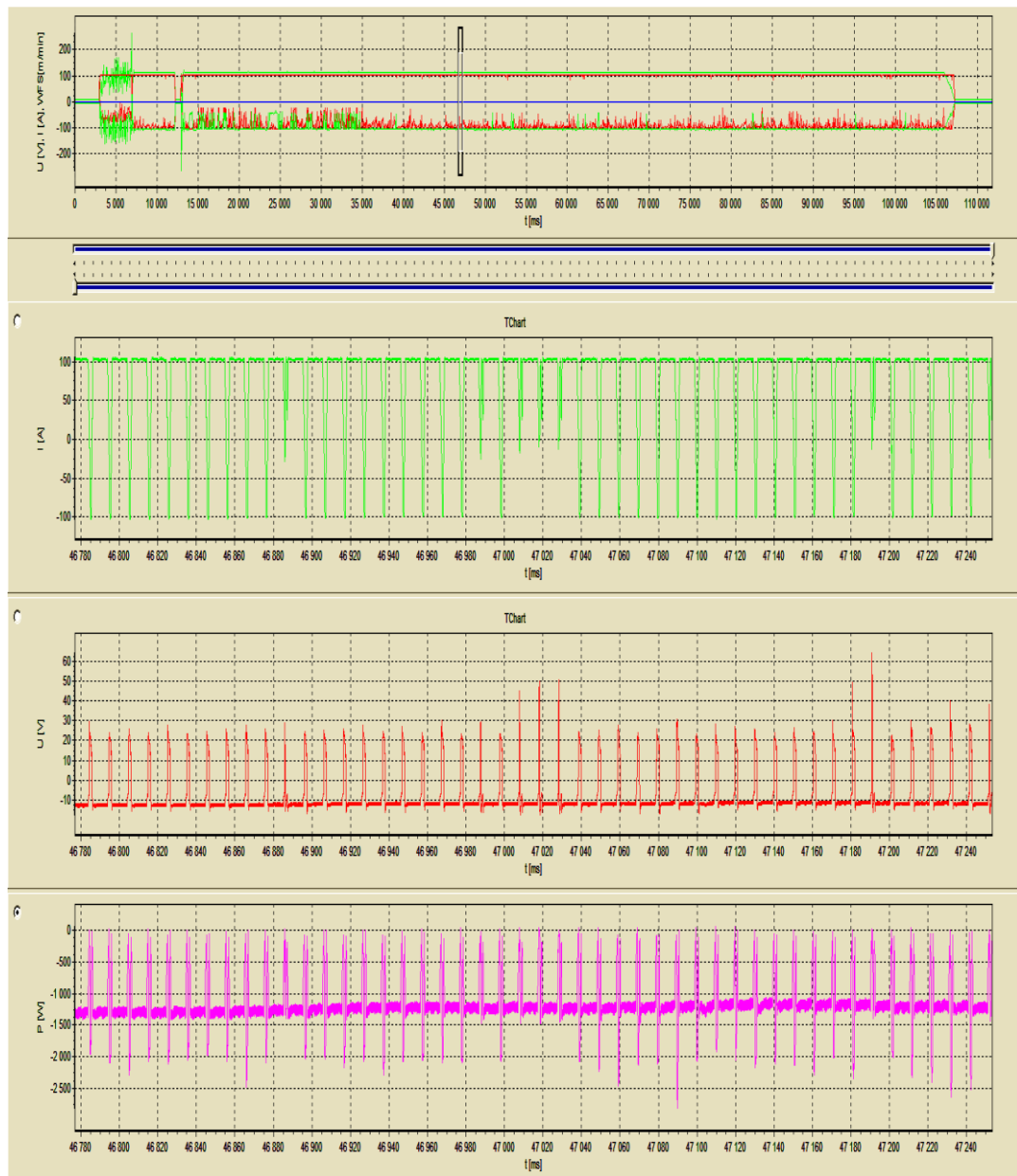
Označení vzorku	Rozměry [mm]
A1'	84x50x4
A2'	84x50x4



Obr. 3.25 Ustavené vzorky A1' a A2'

3.4.1 Průběh svařování

Ruční svařování s přídavným materiálem proběhlo bez větších komplikací (obr. 3.26). Spuštění záznamu v programu odpovídá času $t = 0$. V čase $t = 3$ s začalo svařování a skončilo v čase $t = 107$ s. Celková doba svařování byla $t = 104$ s. Po ukončení svařování byl svařенец okamžitě vložen do pece vyhřáté na 750°C . Na této teplotě byla pec udržována 2h. Poté byla vypnuta a vzorek ponechán v peci 21h až do úplného vychladnutí.



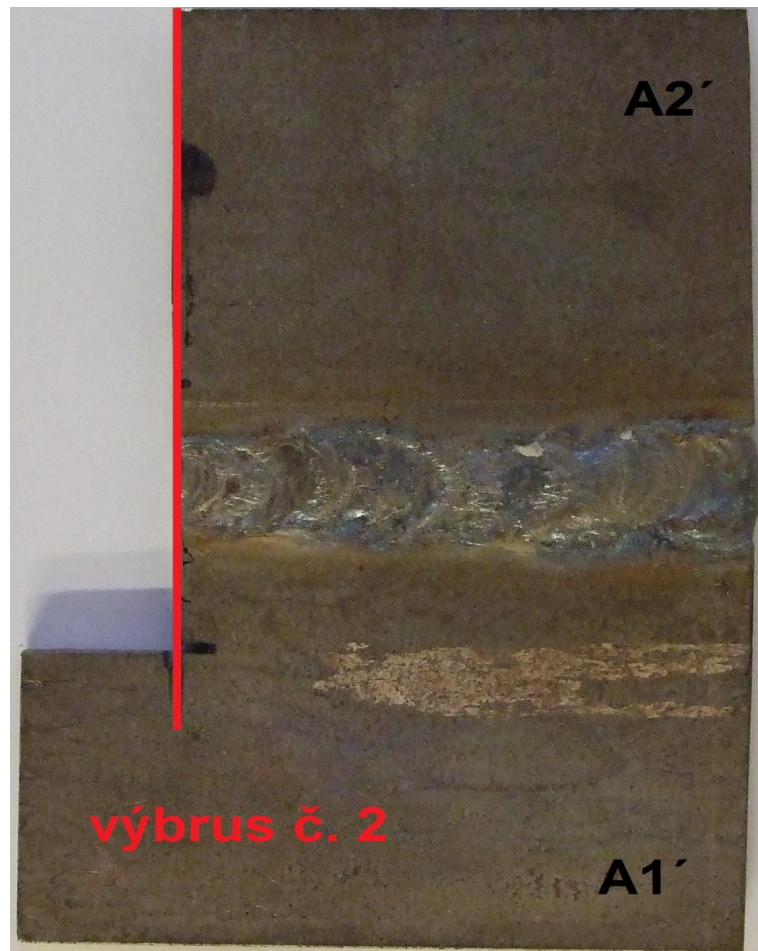
Obr. 3.26 Zaznamenané hodnoty pro svar 2

3.4.2 Vyhodnocení druhého experimentu

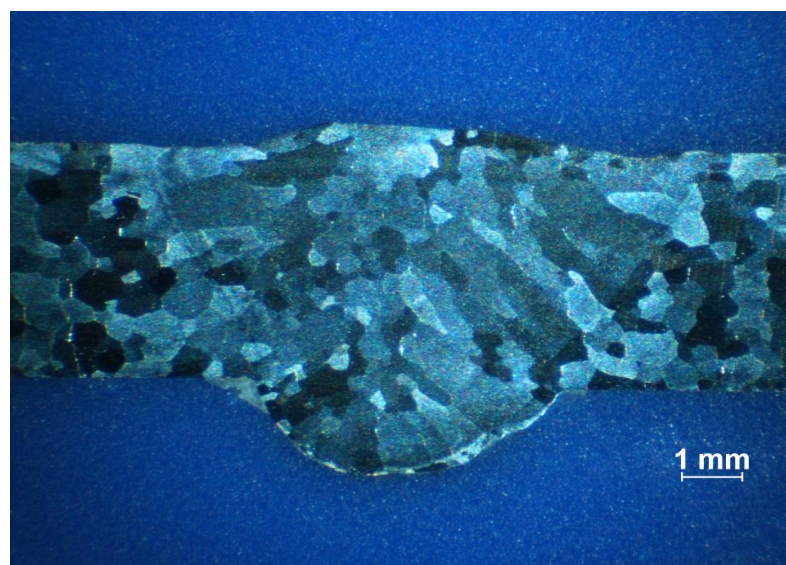
- Vnesené teplo nelze u ruční metody svařování s přesností vypočítat.
- Metalografický výbrus

Vzorek pro výbrus 2 byl opatrně odříznut úhlovou bruskou v místě vyznačeném červenou čarou na obrázku 3.27. Svar je značně proláklý i přes udusané tavidlo. Povrch svaru je převýšený, což je zapříčiněno přidavným materiálem. Na okraji svaru lze pozorovat hrubší strukturu oproti základnímu materiálu, díky čemuž lze určit hranice svarové lázně. Uprostřed svaru se struktura nezměnila. Trhliny v materiálu nevznikly při samotném svařování.

Vznikly až po úplném vychladnutí materiálu. Při přípravě materiálu na metalografický výbrus, bylo slyšet zvukové jevy, jež signalizovaly pnutí v materiálu a vznik trhlin.



Obr. 3. 27 Svařené vzorky A1' a A2'



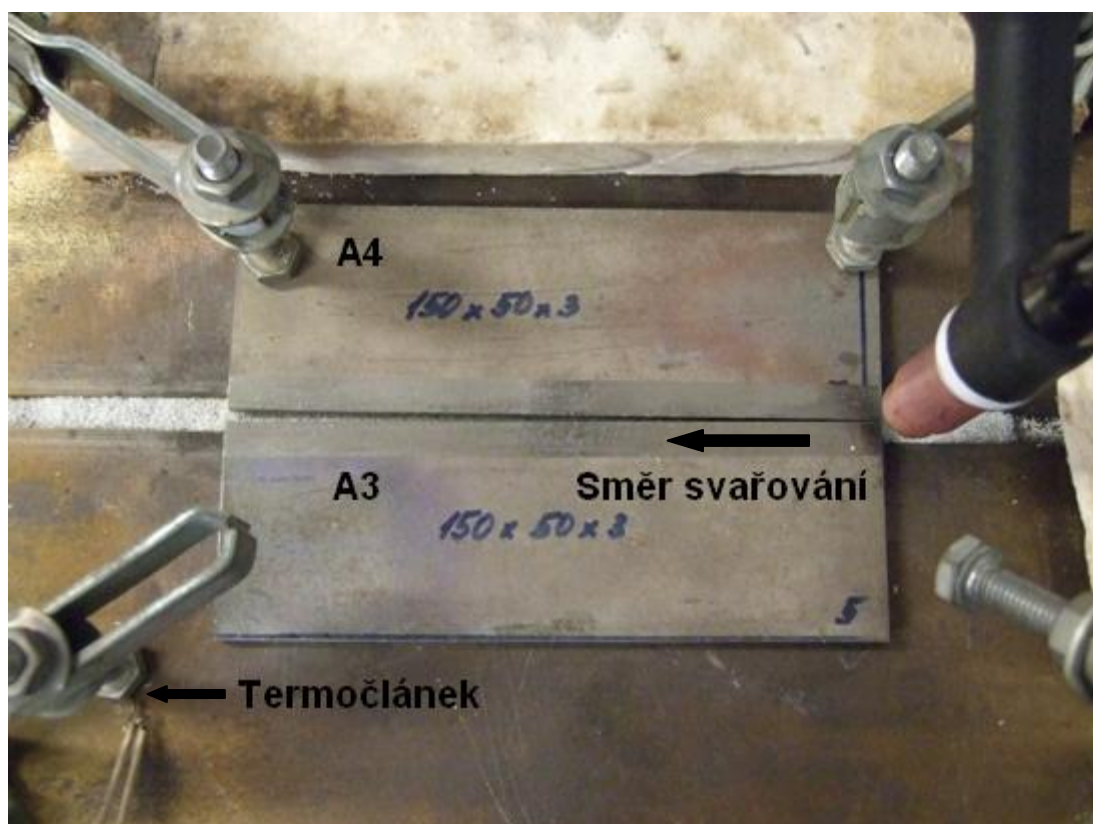
Obr. 3.28 Makrostruktura svaru č. 2 – 1,25x8

3.5 Svařování vzorků A3 a A4

Ustavení vzorků A3 a A4 je na obrázku 3.29, rozměry jsou uvedeny v tabulce 3.6. Povrchová oxidace v místech svaru byla odstraněna ručním opilováním. Vzorek A4 byl ke stolu uchycen napevno. Vzorek A3 byl připevněn jen na jedné straně kvůli deformacím vznikajícím při svařování. Mezera mezi vzorky na konci svaru činila 2,5 mm. Oba vzorky byly přehřátý na 200°C. Rychlost svařování byla $35\text{Hz} = 0,525\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Začalo se svařovat střídavým proudem 90A. Tavidlo na ochranu kořene svaru bylo zhutněno, aby nedošlo k propadnutí svaru. Elektroda byla zvolena 3,2 mm, WT 20. Elektrický oblouk se zapaloval kontaktně přes grafitovou příložku. K upínací desce byl připojen termočlánek pro záznam vývoje teplot.

Tab. 3.6 Rozměry vzorků

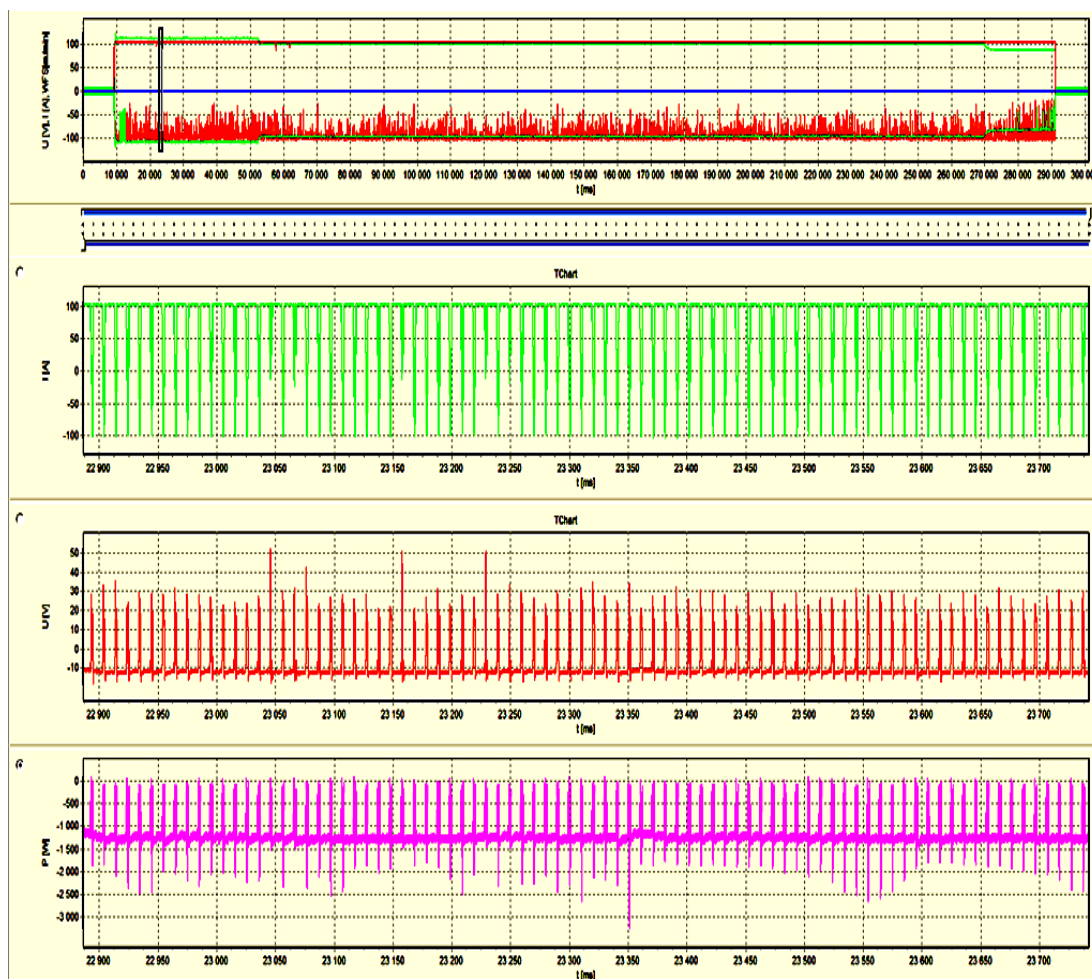
Označení vzorku	Rozměry [mm]
A3	150x50x4
A4	150x50x4



Obr. 3.29 Ustavené vzorky A3 a A4

3.5.1 Průběh svařování

Spuštění záznamu odpovídá času $t = 0$ s. Svařování začalo v čase $t = 10$ s současně se spuštěním dráhy. První změna proudu z 90A na 80A proběhla v čase $t = 52$ s. Druhá změna proudu z 80A na 70 A proběhla v čase $t = 270$ s. Konec svařování nastal v čase $t = 290$ s. Celý průběh je zaznamenán na obrázku 3.30. Celková délka svařování byla $t = 280$ s. Proud se postupně snižoval, podle velikosti svarové lázně. Po ukončení svařování byl svařenec okamžitě vložen do pece vyhřáté na 750°C . Na této teplotě byla pec udržována 2h. Poté byla vypnuta a vzorek ponechán v peci 21h až do úplného vychladnutí.



Obr. 3.30 Zaznamenané hodnoty pro svár 2 (obr. 30)

3.5.2 Vyhodnocení třetího experimentu

Na obrázku 3.31 je vidět neprovaření kořene u konce svaru. To bylo zapříčiněno prohnutím obou vzorků (již před svařováním) a snížením svařovacího proudu. Trhliny viditelné okem (Obr. 3.31 a 3.32) nevznikly při svařování. Objevily se až při přípravě vzorku pro metalografický výbrus. Bylo slyšet zvukové efekty indikující vznik trhlin.



Obr. 31 Neprovařený kořen

- Vnesené teplo

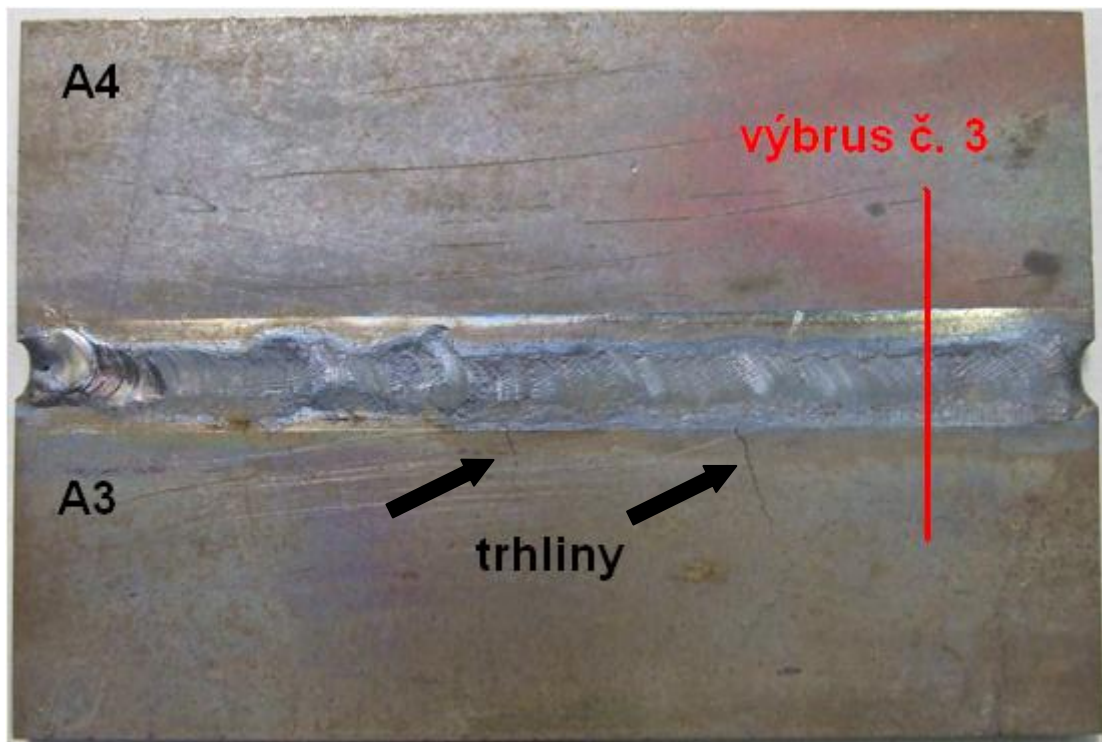
Vnesené teplo se určilo podle vzorce (1). Vypočítané hodnoty vneseného tepla jsou uvedeny v tabulce 3.7.

Tab. 3.7 Vnesené teplo

Veličiny	Výchozí stav	Změna 1	Změna 2
η [-]	0,6	0,6	0,6
U [V]	13,1	12,7	12,3
I [A]	90	80	70
v_s [mm·s ⁻¹]	0,525	0,525	0,525
Q [kJ·mm ⁻¹]	1,347	1,161	0,984

- Metalografický výbrus

Vzorek pro metalografický výbrus (Obr. 3.33) byl opatrně odříznut úhlovou bruskou v místě znázorněném na (Obr. 3.32). Tvar svaru je mírně proláklý. Svar vykazuje hrubší strukturu jak základní materiál. Z výbrusu lze určit hranice svarové lázně. Žádné zásadní vady nebyly na výbrusu pozorovány.



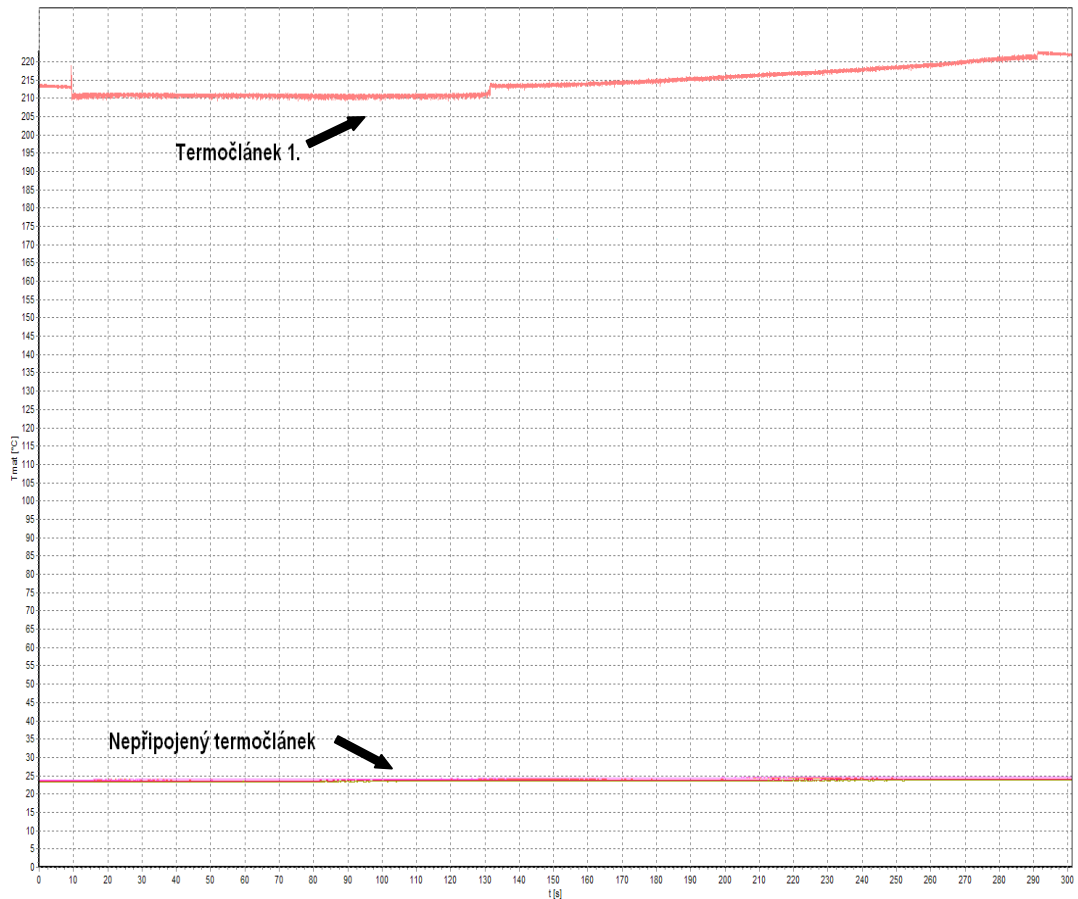
Obr. 3.32 Svařené vzorky A3 a A4



Obr 3.33 Metalografický výbrus 3- 1,25x8

- Průběh teplot

Průběh teplot u svařování 3 byl zaznamenán termočlánkem. Termočlánek byl připevněn k upínací desce (obr. 29). Průběh teplot je zaznamenán na grafu (Obr. 3.34). Předehřev měl být 200°C, rozdíl mezi reálnými a zaznamenanými hodnotami, může být dán setrvačností zahřívacího zařízení.



Obr. 3.34 Průběh teplot

4 Závěr

V této bakalářské práci se ověřovala svařitelnost aluminidu železa legovaného niobem. Byly provedeny celkem tři svary za různých svařovacích podmínek. Svary byly hodnoceny vizuálně a z každého svaru se zhotovil metalografický výbrus ve vybraném místě. K vyhodnocování byly k dispozici grafy s časovými závislostmi základních veličin. Následně se opticky vyhodnocovala jejich kvalita. Pozornost byla věnována trhlinám ve svarech.

Výsledné svary nemají výrazně pozměněnou strukturu. Materiál se podařilo svařit bez vzniku trhlin ve svaru. Trhliny ovšem vznikaly po vychladnutí materiálu v okolí svaru. Ve srovnání s dříve realizovaným zkouškám s materiálem legovaným Ce se předpokládalo, že niob bude příznivě ovlivňovat svařitelnost. Předpokládané vlastnosti materiálu legovaného niobem odvozené i z literatury se však nepotvrdily. Všechny svary mají propadlý kořen svaru. Provaření kořene bylo vyhovující, až na třetí experiment kde se kořen na konci vzorku nepodařilo úplně provařit. Otázka vhodné geometrie svaru zatím nebyla rozhodujícím kritériem, prioritní bylo zhotovení svaru bez trhlin.

V dalších postupech bych doporučil zaměřit se také na metalurgii a výrobu samotného materiálu, aby neobsahoval trhliny a necelistvosti již před samotným svařováním. Dále bych doporučil pro tuto metodu dořešit vhodnou ochranu kořene svaru, aby nedocházelo k propadnutí kořene.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] *Svařování prakticky a s nadhledem* [online]. 15.6 2006 [vid. 28. 12. 2011]. Dostupné z: www.svarbazar.cz
- [2] HORÁK, O. *Mechanizované svařování tupých svarů aluminidu železa metodou 141*. Technická univerzita v Liberci: Diplomová práce, 2009
- [3] NEUMANN, H. a KRATOCHVÍL, P. *Struktura a vlastnosti WIG svarů aluminidu typu Fe₃Al*. Technická univerzita v Liberci, 2005
- [4] ŠEDIVÁ, I. *Vlastnosti slitiny Fe₂₈Al₄Cr z hlediska použití za vysokých teplot*. Technická univerzita v Liberci: Dizertační práce, 2003.

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 diplomové práce a konzultantem.

Datum 6. 1. 2012

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Col. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, school Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date 6. 1. 2012

Signature