



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav strojírenské technologie

Difúzní svařování korozivzdorné oceli s Al
slitinou

Diffusion welding of stainless steel with Al
alloy

DIPLOMOVÁ PRÁCE
2024

Kamil WICK

Studijní program: Výrobní inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Wick** Jméno: **Kamil** Osobní číslo: **491519**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Difúzní svařování korozivzdorné oceli s Al slitinou

Název diplomové práce anglicky:

Diffusion welding of stainless steel with Al alloy

Pokyny pro vypracování:

- Analýza problematiky difúzního svařování kombinovaných spojů, popis hlavních procesních parametrů difúzního svařování
- Výběr vhodných materiálů pro tvorbu spoje
- Návrh experimentu pro vytvoření svarových spojů – stanovení mezních hodnot svařovacích parametrů
- Vyhodnocení kvality vytvořených spojů
- Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kazakov, N.F.: Difúzní svařování. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983
- [2] Turňa, M.: Speciálne metódy zvarovania, Alfa, Bratislava, 1989, 384 s. ISBN 80-05- 00097-9
- [3] Kolařík, L.: Difúzní svařování titanu s korozivzdornou ocelí v inertní ochranné atmosféře, Habilitační práce, ČVUT v Praze, Praha, 2015
- [4] Shizardi, A.A. Diffusion Bonding Aluminium Alloys and Composites: New Approaches and Modeling, Cambridge, Thesis UoC, 1997

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Miroslav Sahul, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **05.04.2024** Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Bc. Kamil Wick

Název práce: Difúzní svařování korozivzdorné oceli s Al slitinou

Anglický název: Diffusion welding of stainless steel with Al alloy

Rozsah práce:

102 stran

90 obrázků

32 tabulek

Akademický rok: 2023/2024

Ústav: 12 133 Ústav strojírenské technologie

Studijní program: Výrobní inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Klíčová slova: Difúzní svařování, korozivzdorná ocel, hliníková slitina, heterogenní spoj, speciální metody svařování

Keywords: Diffusion bonding, diffusion welding, stainless steel, aluminium alloy, heterogenous join, special methods of welding



Abstrakt

Diplomová práce se zabývá difúzním svařováním austenitické korozivzdorné oceli 1.4301 a hliníkové slitiny EN AW 5083. Navazuje tak na předchozí výzkumné práce na Ústavu strojírenské technologie. Úkolem bylo úspěšně aplikovat tuto metodu svařování na oba materiály a vyhodnotit kvalitu svarového spoje. Konkrétně byla zkoumána mikrostruktura difúzního rozhraní a jeho vliv na mechanické vlastnosti spoje.

V první části diplomové práce je shrnuta teorie difúze a její mechanismy. Také je uveden materiálový sortiment korozivzdorných ocelí a hliníkových slitin. Další kapitoly se věnují popisu metody difúzního svařování a jednotlivých částí svařovacích zařízení.

V praktické části je popsána příprava vzorků a průběh experimentu difúzního svařování. Svařené vzorky byly vyhodnoceny metalograficky. Na vybraných vzorcích byla dále realizována EDX analýza na elektronovém mikroskopu a zkouška tvrdosti. Práce potvrdila, že vytvoření spoje vybraných materiálů je velmi problematické a na závěr bylo doporučeno využití mezivrstev pro další výzkum v této oblasti.

Abstract

The thesis deals with the diffusion welding of austenitic stainless steel 1.4301 and aluminum alloy EN AW 5083. It builds upon previous research work at the Institute of Engineering Technology. The task was to successfully apply this welding method to both materials and evaluate the quality of the welded joint. Specifically, the microstructure of the diffusion interface and its effect on the mechanical properties of the joint were examined.

The first part of the thesis summarizes the theory of diffusion and its mechanisms. It also provides an overview of the range of stainless steels and aluminum alloys. The following chapters describe the diffusion welding method and the components of the welding equipment.

The practical part describes the preparation of samples and the course of the diffusion welding experiment. The welded samples were evaluated metallographically. Selected samples were further analyzed using EDX analysis on an electron microscope and underwent a hardness test. The work confirmed that creating a joint between the selected materials is very problematic, and in conclusion, the use of interlayers for further research in this topic was recommended.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: “Difúzní svařování korozivzdorné oceli s Al slitinou ” vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Kolaříka, Ph.D., IWE, a to pouze s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu literárních zdrojů, v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

(podpis autora)



Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE a panu Ing. Miroslavu Sahulovi, Ph.D. za jejich cenné odborné rady, trpělivost a profesionální přístup. Dále bych poděkoval panu Ing. Jakobovi Karmáčkovi a paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE, za jejich pomoc s přípravou vzorků pro experimentální část diplomové práce.

V neposlední řadě mé poděkování náleží i panu Ing. Tomáši Burketovi za provedení EDS analýz a za jeho ochotný přístup.

Závěrem chci poděkovat své rodině a svým nejbližším za morální podporu.



Obsah

Úvod.....	10
1 Difúze a její teoretické poznatky	11
1.1 Atomová teorie difúze	12
1.2 Fenomenologická teorie difúze	14
1.2.1 Obecné pojetí	14
1.2.2 Fickovo pojetí.....	15
1.2.3 Darkenovo pojetí	15
1.3 Mechanismy difúze.....	15
2 Difúzní svařování	19
2.1 Průběh difúzního svařování	19
2.2 Parametry difúzního svařování.....	20
2.2.1 Teplota.....	20
2.2.2 Svařovací tlak.....	20
2.2.3 Svařovací čas.....	21
2.3 Ostatní vlivy	21
2.4 Teorie a hypotézy difúzního svařování.....	22
2.4.1 Rekrystalizační hypotéza	22
2.4.2 Energetická hypotéza	22
2.4.3 Dislokační hypotéza	22
2.4.4 Difúzní hypotéza	23
2.5 Mezivrstvy.....	23
3 Typy zkoušek pro hodnocení kvality difúzních spojů	24
3.1 Mechanické vlastnosti	24
3.1.1 Pevnost v tahu	24
3.1.2 Tvrdost.....	25
3.1.3 Zkouška rázem v ohybu	28
3.2 Metalografické zkoušky	30
3.2.1 Světelná mikroskopie	30
3.2.2 Skenovací elektronový mikroskop (SEM)	31
3.2.3 Transmisní elektronová mikroskopie (TEM).....	33
4 Korozivzdorné oceli	34



4.1 Feritické korozivzdorné oceli	34
4.2 Martenzitické korozivzdorné oceli	35
4.3 Austenitické korozivzdorné oceli.....	36
4.4 Duplexní (Austeniticko-feritické) oceli	37
5 Hliník a jeho slitiny.....	38
5.1 Slitiny hliníku ke slévání.....	39
5.2 Slitiny hliníku k tváření	40
6 Konstrukce zařízení pro difúzní svařování	42
6.1 Svařovací (vakuová) komora.....	42
6.2 Vývěvy.....	42
6.3 Ústrojí pro ohřev.....	43
7 Návrh experimentu.....	45
7.1 Volba hliníkové slitiny	45
7.1.1 Porovnání hliníkové slitiny EN AW 5083 s EN AW 6082.....	46
7.2 Volba korozivzdorné oceli	47
7.3 Příprava vzorků pro difúzní svařování	49
7.4 Svařovací zařízení	53
7.4.1 Popis ovládání svařovacího zařízení	55
7.4.2 Umístění vzorků do zařízení	56
7.5 Návrh svařovacích parametru	57
8 Průběh svařování a výsledky	59
8.1 Výsledky svařování	62
9 Metalografické zkoušky	63
9.1 Příprava metalografických výbrusů	63
9.2 Analýza na světelném mikroskopu	65
9.3 EDS analýza.....	68
9.3.1 Hliníková slitina.....	69
9.3.2 Korozivzdorná ocel	81
9.4 Měření mikrotvrdosti	89
Závěr	92
Seznam použitých literárních zdrojů	94
Seznam obrázků.....	99



Seznam tabulek	101
Seznam zkratek.....	102



Úvod

Konvenční způsoby svařování jsou obecně v porovnání s ostatními výrobními procesy považovány jako jedny z nejmladších. Prapůvodcem těchto technologií spojování materiálů je kovářské svařování. Až na přelomu 19. a 20. století se začaly objevovat nové metody, které se dnes běžně využívají v různých průmyslových odvětvích jako například svařování plamenem, elektrickým obloukem či elektrickým odporem. (1)

V současné době tyto technologie zpracovávají přibližně 25 % kovových materiálů ve strojírenském průmyslu, což z nich činí jedny z významných výrobních procesů, které značně zasahují do výrobních nákladů. (2)

Svařováním jsme schopni měnit strukturu ve svarovém kovu i v tepelně ovlivněné oblasti a tím tak ovlivňovat především mechanické vlastnosti v místech svaru a jeho okolí. Technický vývoj jde dopředu a díky tomu přicházejí nové technologie a trendy ve výrobních postupech, na které jsou kladeny vyšší nároky z pohledu ekologie, spolehlivosti svarových spojů a produktivity. Mezi nové metody spojování materiálů patří magnetické pulzní svařování, A-TIG svařování, hybridní svařování a laserové svařování. (2)

S tím souvisí i vývoj nových moderních materiálů a tím i potřeba jejich spojování, což je mnohdy konvenčními metodami svařování nerealizovatelné. Proto se pro vytváření těchto tzv. heterogenních spojů často využívají právě speciální technologie svařování.

Jedním ze způsobů, jak vytvořit dostatečně odolný spoj mezi dvěma rozdílnými materiály je i difúzní svařování. Této metodě se již v 60. a 70. letech 20. století intenzivně věnoval ruský strojný inženýr Nikolaj Fedotovič Kazakov. Výhodou této technologie je možnost spojovat materiály s výrazně odlišnou teplotou tání, chemickým složením či strukturou. (3)
(4)

Cílem této diplomové práce vytvoření svarového spoje mezi korozivzdornou austenitickou ocelí a Al slitinou. Dále zvolit vhodné materiály ze sortimentu hliníkových slitin, které nepodléhají degradaci mechanických vlastností za vysokých teplot, a to zejména v oblasti spoje.

Celý experiment proběhne na dostupných přístrojích a laboratorních zařízeních, kterými disponuje fakulta strojná. Dalším úkolem je získat informace o vnitřní struktuře vytvořeného spoje a jejím vlivu na mechanické vlastnosti.



1 Difúze a její teoretické poznatky

Difúze je fyzikální jev, při kterém dochází k přesunu hmoty z jednoho místa na druhé. Předmětem zkoumání jsou částice, které se přesouvají z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací.

K tomu, aby k samotné difúzi došlo, je zapotřebí dodat příslušnou energii zkušebnímu tělesu nebo laboratornímu vzorku. (5) (6)

$$D = D_0 \cdot e^{\frac{\Delta H}{RT}} \quad (\text{Rovnice 1})$$

Rovnice 1 značí závislost difuzivity D na teplotě a aktivačnímu teplu ΔH , kde D_0 je konstanta. Hodnota R je molární plynová konstanta a T je teplota.

Tab. 1 - Hodnoty D_0 a ΔH vybraných prvků v modifikacích železa (7) (8) (9)

Difuzní prostředí	Difundující prvek	D_0 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	ΔH [kJ/mol]
Fe α	H	$(0,9 - 0,2) \cdot 10^{-7}$	10–16
	C	$(0,4 - 2,0) \cdot 10^{-6}$	76–88
	N	$(0,5 - 7,0) \cdot 10^{-7}$	75–78
	Fe	$(0,1 - 6,0) \cdot 10^{-4}$	197–250
	W	$3,8 \cdot 10^{-2}$	293
	Al	$1,6 \cdot 10^{-4}$	305
Fe β	H	$(1,1 - 1,5) \cdot 10^{-6}$	42–50
	C	$(0,4 - 0,6) \cdot 10^{-5}$	113–157
	N	$(0,3 - 9,0) \cdot 10^{-5}$	118–145
	Fe	$(0,1 - 1,0) \cdot 10^{-4}$	264–285
	W	0,1	377
	Al	$4,5 \cdot 10^{-5}$	273
Fe γ	H	$0,63 \cdot 10^{-6}$	43
	C	$2,3 \cdot 10^{-6}$	138
	N	$0,34 \cdot 10^{-6}$	145
	Fe	$6,5 \cdot 10^{-5}$	279
	W	$2,4 \cdot 10^{-4}$	342
	Al	$1,2 \cdot 10^{-5}$	236



Difúze materiálů se dělí na samodifúzi a heterodifúzi. Samodifúze popisuje děj, kdy atomy či molekuly téhož druhu samovolně migrují a ukládají se do krystalické mřížky. Aby to bylo možné, tak je zapotřebí splnit alespoň jednu z podmínek jako je například vznik teplotního nebo koncentračního gradientu. Heterodifúze je přesun atomů přes fázovou hranici a vyskytuje se u slitin. (3) (5) (6)

Difúzní jevy mohou mít za příčinu i změny v chemickém složení. Taková difúze vedoucí ke změně koncentračních rozdílů se nazývá obrácená difúze. (7)

1.1 Atomová teorie difúze

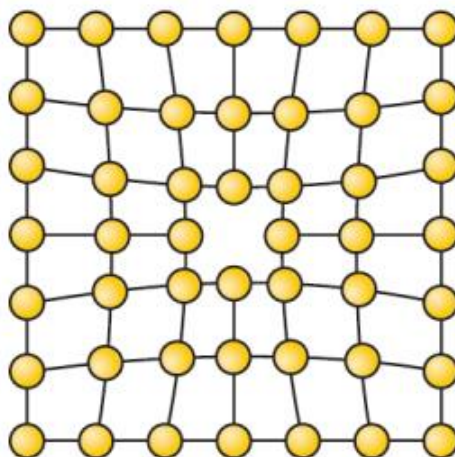
Tato teorie pracuje s předpokladem, že se částice (atomy) pohybují přeskokem prostřednictvím mřížkových poruch (5).

Za přítomnosti hybné síly dochází k usměrnění přeskoků. Jejich směr a velikost je dán frekvencí přeskoků atomů. Hybné síly se dělí na fyzikální a termodynamické. Fyzikální hybné síly působí na jednotlivé částice, zatímco termodynamické jsou gradienty potenciálů. (4)

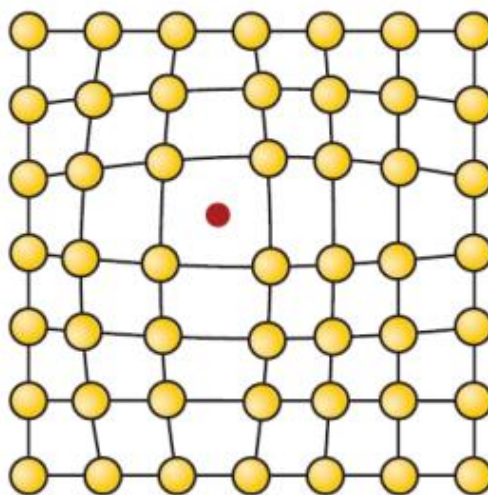
Ovšem migrovat mohou také vakance (5) (6). Jedná se o bodovou poruchu krystalické mřížky, kdy atom v uzlovém bodě chybí. Tato porucha ovlivňuje blízké okolí mřížky (viz Obr. 1).

Jedním z číselných údajů této teorie difúze je i tzv. střední přemístění atomů. Udává průměrnou vzdálenost, kdy se každý atom přemístí ze své výchozí polohy do místa mřížkové poruchy jako jsou třeba vakance nebo intersticiály. (5)

Intersticiály jsou bodové poruchy krystalické mřížky, kdy se cizí nebo vlastní atom nachází mimo uzlový bod. Tím se rozlišuje vlastní a cizí intersticiál. Kolem této poruchy se vytváří v blízké vzdálenosti napěťové pole, které ovlivňuje rovnoměrné rozložení energie v mřížce (5).

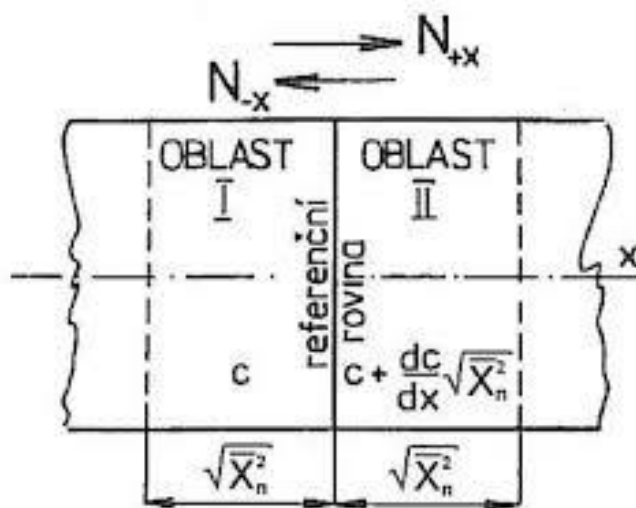


Obr. 1 – Ukázka zobrazení vakance v krystalové mřížce (10)



Obr. 2 – Intersticiální prvek v krystalové mřížce (10)

Další numerický ukazatel této teorie je jednorozměrný difúzní tok. Ve své podstatě se jedná o počet procházejících atomů skrz určitý průřez za jednotku času (5). Z toho lze odvodit difuzivitu a také 1. Fickův zákon (Rovnice 4).



Obr. 3 – Jednorozměrný difúzní tok (5)

1.2 Fenomenologická teorie difúze

Na rozdíl od atomární teorie, která tvrdí, že difúzní tok je tvořen částicemi materiálů, fenomenologická teorie pojednává o toku termodynamických veličin daným průřezem za jednotku času. (5)

1.2.1 Obecné pojetí

Kdyby se měla i -tá termodynamická veličina přesunout z jednoho systému do druhého, tak na celý proces toku bude mít vliv hybná síla X_j a také kinetický součinitel L_{ij} . (5)

$$J_i = \sum_j L_{ij} \cdot X_j \quad (\text{Rovnice 2})$$

K sestavení (Rovnice 2) se předpokládá, že rychlost soustavy vracející se do rovnovážného stavu je úměrná rychlosti vychýlení z tohoto stavu, tedy velikosti všech termodynamických hybných sil. Tyto síly jsou gradienty (∇) teploty T , tlaku p , chemického potenciálů μ a dalších vhodně zvolených potenciálů ϕ . (7)

Toky termodynamických veličin složek A, B až N lze vyjádřit takto:

$$\begin{aligned} J_A &= -L_{AA}\nabla\mu_A - L_{AB}\nabla\mu_B - \dots - L_{AT}\nabla T - L_{Ap}\nabla p - L_{A\phi}\nabla\phi & (\text{Rovnice 3}) \\ J_B &= -L_{BA}\nabla\mu_A - L_{BB}\nabla\mu_B - \dots - L_{BT}\nabla T - L_{Bp}\nabla p - L_{B\phi}\nabla\phi \\ J_N &= -L_{NA}\nabla\mu_A - L_{NB}\nabla\mu_B - \dots - L_{NT}\nabla T - L_{Np}\nabla p - L_{N\phi}\nabla\phi \end{aligned}$$

Tento přístup je vhodný k vyjádření toku jedné termodynamické složky při působení více termodynamických hybných sil a toku více termodynamických složek včetně toku vakancí vlivem příslušných chemických potenciálů. (3)



1.2.2 Fickovo pojetí

Fenomenologickou teorií se v minulosti zabývalo mnoho vědců a jedním z nich, který přinesl to nejzákladnější pojetí difúze byl německý lékař Adolf Eugen Fick. Jeho první (Fickův) zákon (Rovnice 4) o difúzi říká, že difundující látkové množství je závislé na gradientu koncentrace c v kolmém směru x stykové plochy a přímo úměrný difuzivitě D . Zde stojí za povšimnutí jisté analogie z (Rovnice 2) a (Rovnice 4), kdy kinetický součinitel je zde představen jako difuzivita D a hybnou sílu příslušný koncentrační gradient. (5)

První Fickův zákon popisuje jednorozměrný tok a platí pro pevné izotropní látky. Nepředpokládá proměnný gradient koncentrace, teploty, napětí a nepřihlíží k přítomnosti krystalických poruch. (7)

$$J = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Rovnice 4})$$

Druhý Fickův zákon (Rovnice 5) se věnuje nestacionární difúzi, kdy je koncentrace proměnná s časem. Tento tvar Fickova zákona předpokládá izotropní prostředí. (5)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{Rovnice 5})$$

Zde levá strana rovnice znázorňuje gradient koncentrace c závislý na čase t . Na pravé rovnice difuzivita D představuje hybnou sílu. Písmeno x určuje vzdálenost a směr od difúzního rozhraní.

Nicméně v obou Fickových zákonech je difuzivita vyjádřena jako konstanta. Ve skutečnosti je funkcí teploty a také symetrie krystalové mřížky. Pro triklinickou, monoklinickou a orthorombickou krystalovou mřížku se difuzivita liší v každém směru. U tetragonální a hexagonální je rozdílná pouze v jednom směru a kubická mřížka má difuzivitu stejnou ve všech směrech. (7)

1.2.3 Darkenovo pojetí

Darkenovo pojetí (Rovnice 6) pojednává o tom, že hybná síla je způsobená gradientem chemického potenciálu μ_A . (5)

$$\frac{\partial \mu_A}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_A^0 + R \cdot T \cdot \ln a_A) = R \cdot T \cdot \frac{\partial \ln a_A}{\partial x} \quad (\text{Rovnice 6})$$

Souřadnice x popisuje vzdálenost od fázového rozhraní. Nachází se zde molární plynová konstanta R , konstanta závislá na volbě standardního stavu μ_A^0 a aktivita složky v tuhém roztoku a_A . Dále vztah uvádí termodynamickou teplotu T .

1.3 Mechanismy difúze

Při difúzi dochází k přemístění atomů z jedné polohy do druhé. Jak již bylo uvedeno, výměna poloh je realizována přeskoky atomů. Jejich délka je rovna přibližně jednomu atomovému průměru, tj. desetině nanometru. (3)



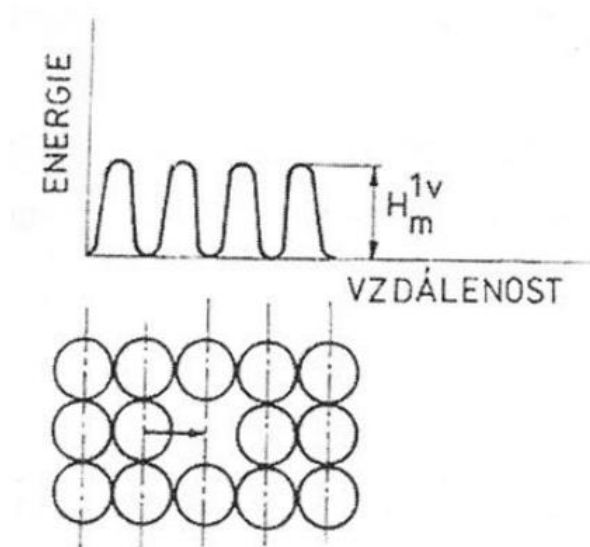
Aby k částicovému přeskupení došlo, je zapotřebí aktivace difuzního procesu. Spočívá to v dodání aktivační energie k příslušnému zkoumanému materiálu. Ta je nejčastěji dodávána vzorku v podobě tepla Q . Je nám známo, že při zahřátí, mění pevná tělesa svůj objem V či délku.

$$dH = dU + P \cdot dV = \delta Q \quad (\text{Rovnice 7})$$

Tudíž je dodané teplo spotřebováno na práci potřebnou ke zvětšení objemu $P \cdot dV$ a na vnitřní energii U . Vnitřní energie popisuje souhrn energií všech částic v tělese. Bylo pozorováno, že atomy v krystalické mřížce kmitají kolem své polohy, a tudíž mají svou potenciální a kinetickou energii. Při dodání tepla se zvýší vnitřní energie, a to se projeví intenzivním rozkmitáním částic. V tomto stavu jsou schopny vymanit se z vazebních sil mřížky a jsou schopny přesunu.

Nachází-li se migrující atom na volném povrchu, tak částice uniká mimo krystalickou mřížku. Dochází k sublimaci. (3)

Jak již bylo zmíněno, tak atom bude migrovat v případě, že bude mít dostatečnou energii. Ta je dána aktivační energií a představuje jakousi energetickou bariéru, kterou musí atom překonat. (3) (5)

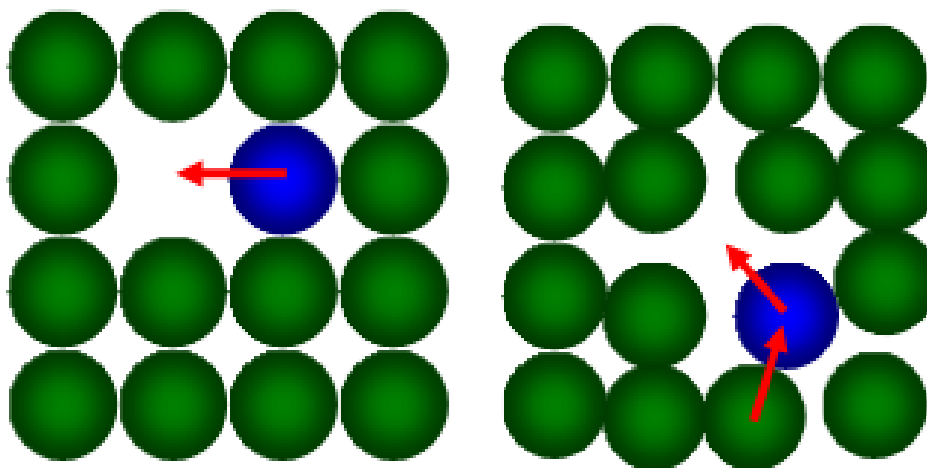


Obr. 4 – Schéma přeskočení atomu na místo vakance (5)

O tom, jaký difuzní mechanismus bude dominovat, rozhoduje konkrétní hodnota aktivační energie. Ta se u každého materiálu liší. Zároveň záleží také jaký typ mřížkových poruch v krystalické mřížce převládá. (3)

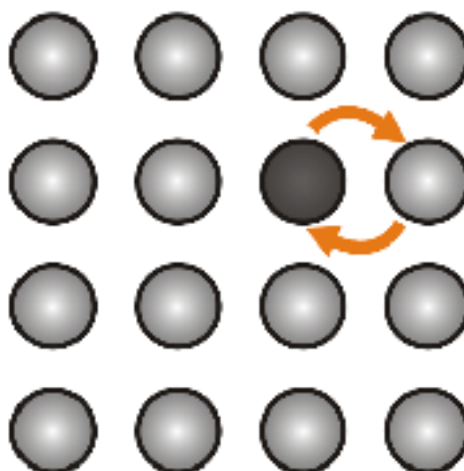


Mechanismus difúze se dělí na individuální a skupinový. Mezi individuální patří přemísťování po vakancích a intersticiální přesun. (3) (5)

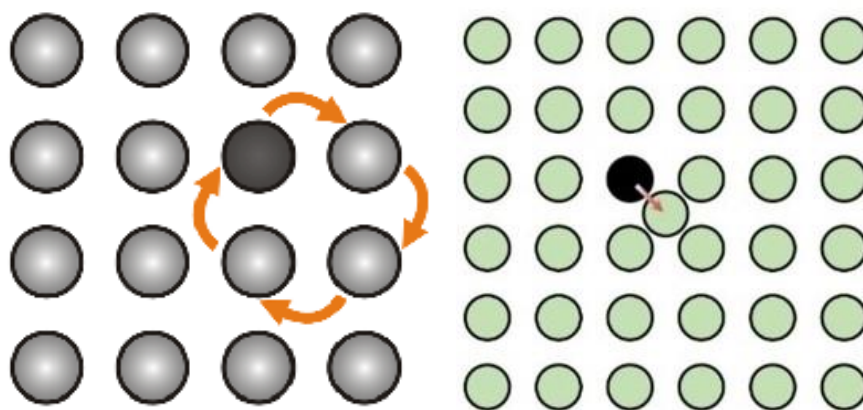


Obr. 5 – Přemísťování po vakancích (vlevo) a intersticiální přesun (vpravo) (11)

Do skupinového mechanismu se řadí přímá výměna poloh, kruhový a nepřímý intersticiální mechanismus. (7)



Obr. 6 – Přímá výměna poloh (12)



Obr. 7 – Kruhová výměna a nepřímý intersticiální mechanismus (12) (13)

Pro orientaci, jak jsou tyto hodnoty aktivačních energií přibližně velké, uvádí Tab. 2, která obsahuje hodnoty aktivačních energií difúzních mechanismů pro měď.

Tab. 2 – Hodnoty aktivačních energií pro měď (3)

Aktivační energie [J/mol]	
Intersticiální přesun	$966 \cdot 10^3$
Přemísťování vakancí	$269 \cdot 10^3$
Kruhová výměna	$378 \cdot 10^3$
Vzájemná výměna	$1008 \cdot 10^3$



2 Difúzní svařování

Difúzní svařování je jedna z nekonvenčních metod, jak spojovat různorodé materiály. Proces se řadí mezi tlakové metody svařování, protože probíhá současně za zvýšené teploty a tlaku, kdy mezi oběma spojovanými povrchy vymizí původní rozhraní ve snaze o vyrovnání energií rovnovážné struktury. (14)

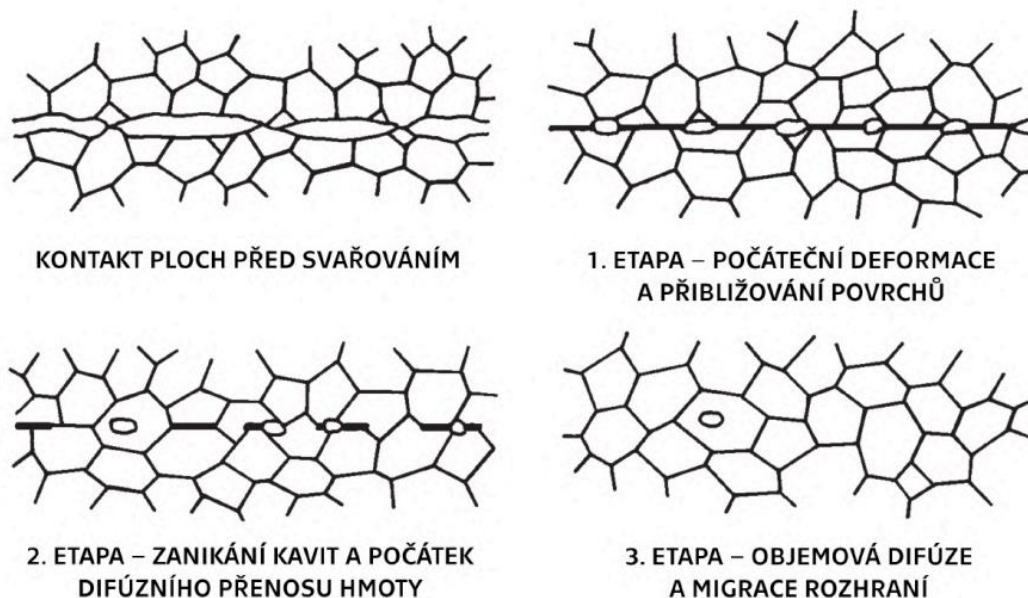
K tomu, aby svar splnil konkrétní specifikace a zaručil dostatečnou kvalitu, je důležité správně nastavit procesní parametry. Tři základní z nich jsou: teplota, tlak a čas svařování (tzn. doba působení teploty a tlaku). Nicméně jsou tu další faktory, které ovlivňují průběh svařovací operace a zároveň kvalitu spoje. (3) (14)

Jsou například nároky na čistotu povrchu. S tím se také pojí i nutnost svařovat ve vakuu nebo v ochranné atmosféře, neboť okolní atmosféra má velký vliv na samotné provedení spoje.

2.1 Průběh difúzního svařování

Průběh procesu svařování lze rozdělit to tři etap (viz Obr. 8): (4) (14)

- 1) Počáteční kontakt povrchu a první deformace povrchových nerovností
- 2) Přemísťování vakancí a dislokací. Zanikání kavit a počátek difúze atomů
- 3) Objemová difúze a vymizení původního rozhraní mezi spojovanými materiály



Obr. 8 – Etapy difúzního svařování homogenního spoje (4)

U první etapy se deformují výstupky a nerovnosti (mikroskopická deformace), které se zde mohou vyskytovat z důvodu předchozího opracování povrchu. Proces probíhá za tepla a působení tlaku. Dochází k částečnému rozpouštění oxidů spolu s deformací plastickou a



creepovou. Na konci první etapy se oba povrchy materiálů přiblíží na vzdálenost působení meziatomárních sil. Na úsecích rozhraní, kde povrchy nedosednou, vznikají kavity. (4)

Při druhé etapě dochází ke dvou mechanismům přenosu hmoty (objemové difúze), a to buď hranicemi zrn či povrchovou difúzi. Difúzní tok hranicemi zrn má za následek zánik kavit a materiálovou výměnu. Na rozhraní začínají zanikat původní zrna a vznikají nová. Na konci této etapy dochází k vymizení zbytkových kavit. (4)

Ve třetí etapě objemové difúzní pochody probíhají do doby, kdy mají atomy dostatečnou energii a hnací sílu. Rozhraní obou materiálů zanikne. Tohoto stavu se dosáhne při dlouhých svařovacích časech, kdy se termodynamické rozdíly postupně vyrovnávají a s tím tak současně klesá intenzita hnacích sil a pohyb atomů se zpomaluje. (4)

Časově se všechny etapy částečně překrývají, tudíž nelze přesně stanovit, kdy začínají a kdy končí. (4)

2.2 Parametry difúzního svařování

Jak již bylo zmíněno, tak parametry ovlivňují kvalitu spoje. Proto je podstatné, aby se volily na základě vlastností spojovaných materiálů a zkušeností s tímto typem svařování.

2.2.1 Teplota

Je to velice podstatný parametr, neboť za vysokých teplot dochází k aktivaci tepelných procesů. Konkrétně se ovlivňuje schopnost hmoty materiálu difundovat.

Difuzivita je totiž závislá na aktivační energii a absolutní teplotě (Rovnice 1). Konkrétní číselný údaj se volí dle teploty tavení spojovaného materiálu, a to v rozmezí $(0,6 T_t - 0,8 T_t)$ (14).

2.2.2 Svařovací tlak

Tlak působící kolmo na svařovanou plochu zajistí blízký kontakt obou materiálů. (14)

Při působení tlakové síly musí být povrch co nejvíce geometricky rovný. V opačném případě by se velice zkomplikoval kontakt svařovaných vzorku a jejich následné difúzní pochody, neboť by se s největší pravděpodobností vzorky nesvařily po celém průřezu.

V určité vzdálenosti vrcholky nerovností obou povrchů materiálů začnou na sebe působit. To se projeví mikrodeformací vrcholků za současného působení svařovací teploty. Nastává tečení materiálu (creep). (14)

Nežádoucím jevem jsou zde makroskopické deformace, které mohou přivodit nežádoucí poškození, popřípadě znehodnotit svarový spoj. Aby se tomu předešlo, je zapotřebí příslušný tlak omezovat. (14)



Při vyšších tlakových silách vznikají pevné spoje. To ovšem platí do určitého limitu, kdy po jeho překročení dochází ke vzniku intermediálních fází, které příslušnou pevnost snižují a svary vykazují křehkost. (14)

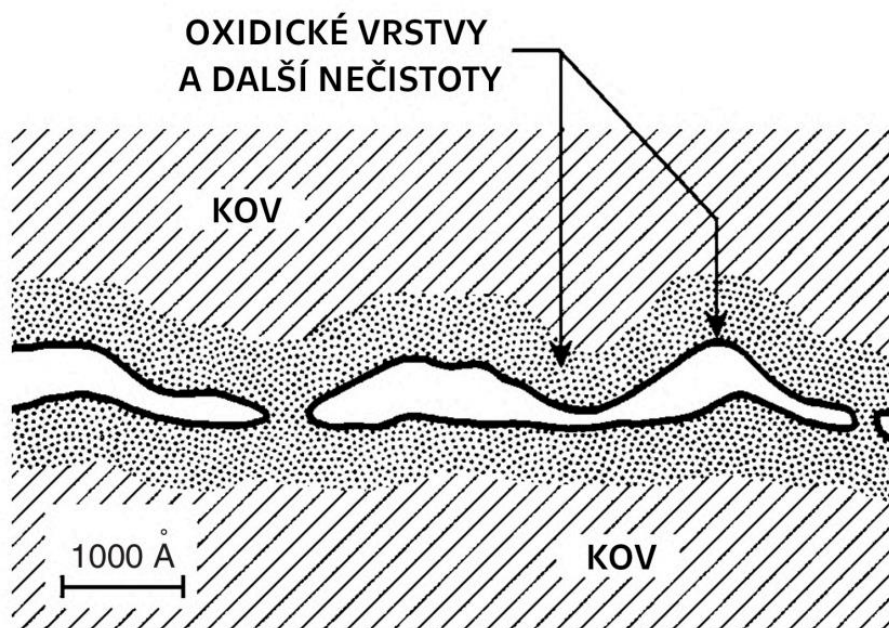
2.2.3 Svařovací čas

Je to doba setrvání na svařovací teplotě za současného působení tlaku. Čím delší bude doba svařování tím klesá efektivita. Proto parametry, jako jsou teplota a tlak, ovlivňují samotný svařovací proces podstatně více než svařovací čas. Nicméně i přesto, že se pracuje s již zmíněnými veličinami, tak i při vyšších hodnotách tlaků a časů se může do jistých mezí dosáhnout relativně pevných spojů. (14)

2.3 Ostatní vlivy

Jak již bylo zmíněno, tak samotné difúzní svařování ovlivňují nejenom parametry, ale také prostředí, ve kterém se svařování realizuje. V praxi se nejčastěji svařuje ve vakuu o tlaku ($10^{-1} - 10^{-2}$) Pa. Toto opatření se provádí z důvodu zabránění přístupu vzdušných plynů, které by mohly se svařovanými vzorky reagovat a vytvářet na povrchu nežádoucí oxidické vrstvy. Případný výskyt oxidů by vytvořil bariéru, která by difúzní pochody ztěžovala, ne-li znemožňovala. (3) (14)

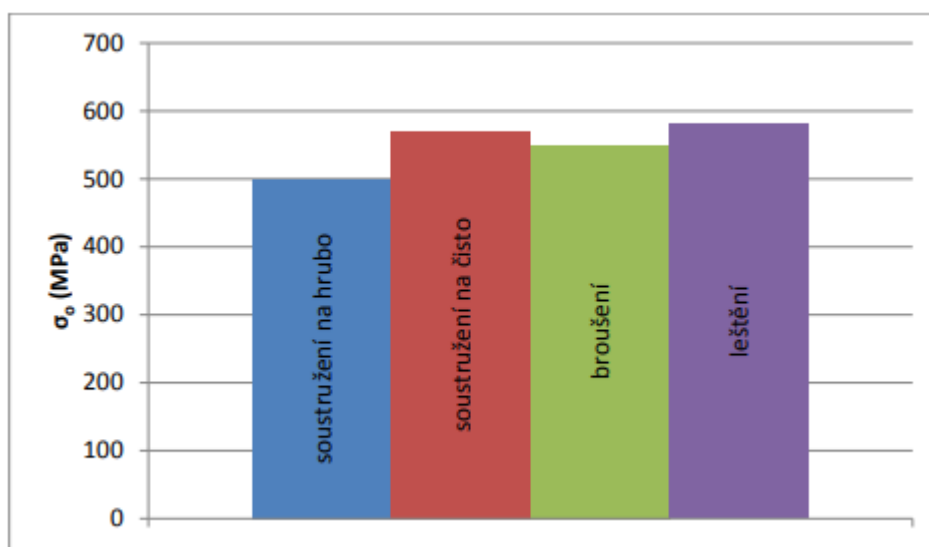
S tím se pojí i vlastnosti svařovací plochy, popřípadě její kvalita. Menší výstupky na povrchu umožní větší přiblížení obou vzorků. Svařovací plochy musí být čisté, bez mastnot a oxidů. Nečistoty by stály v cestě migrujícím částicím. (15)



Obr. 9 – Vrstvy oxidů a nečistot na svařovacím povrchu (4)



Pevnost svaru ovlivňuje i technologie, která byla použita na výrobu a přípravu svařovacích ploch. Výzkumy difúzního svařování oceli ČSN 12 050 prokázaly, že nejlepší pevnostní vlastnosti vykazovala plocha soustružená na čisto a plocha leštěná (viz Obr. 10).



Obr. 10 – Závislost pevnosti spoje u oceli ČSN 12 050 na technologii obrobění povrchu (15)

Jako další vliv se uvádí i způsob ochlazování, který rozhoduje o době difundování a zároveň může ovlivnit i to, zdali difúze proběhla ve všech místech materiálu rovnoměrně. Zároveň správná volba ochlazování může zabránit vzniku nežádoucích struktur a fází, které by negativně ovlivnily mechanické vlastnosti. (14)

2.4 Teorie a hypotézy difúzního svařování

V minulosti při bližším zkoumání této svařovací technologie vzniklo několik hypotéz, kde se začínaly objevovat první názory o tom, že by spoj mohl být realizován přesunem částic. Tyto myšlenkové pochody položily základy difúzního svařování.

2.4.1 Rekrystalizační hypotéza

Tato hypotéza předpokládá přesun hmoty až na samotné rozhraní dvou materiálů (hranici přechodu). Zde započnou rekrystalizační procesy, kdy se v tomto rozhraní vytvářejí nová zrna, která jsou společná pro oba materiály. (3)

2.4.2 Energetická hypotéza

Ta pracuje s myšlenkou, že se v místě rozhraní obou materiálů (na tzv. energetickém prahu) vytvoří kovové vazby. Zároveň v místě spoje zaniká jejich různorodost. (3)

2.4.3 Dislokační hypotéza

Hypotéza tvrdí, že při působení tepla a tlaku, vznikají ve stykových plochách plastické deformace v důsledku dislokací, které snižují odpor materiálu. Mikrodeformace a teplotní



creep umožní vytvoření spoje. Kombinace obou faktorů způsobí, že plastická směs obou materiálů zacelí veškeré spáry a dutiny v místě kontaktu. Tím tak vzniká spoj. (3)

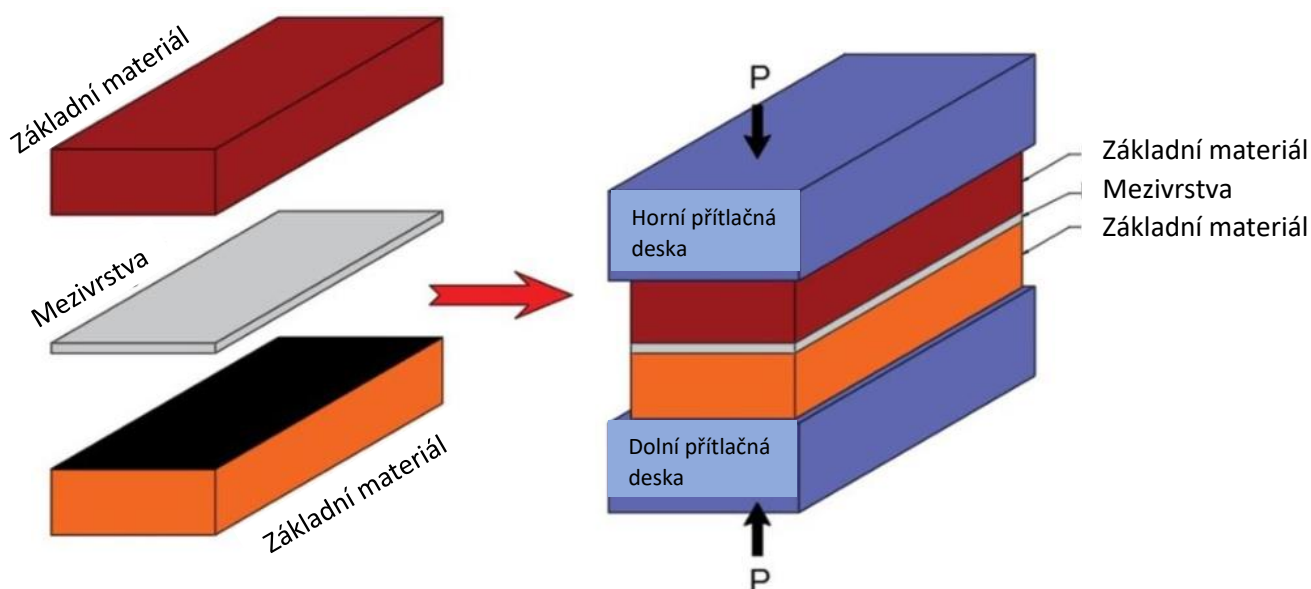
2.4.4 Difúzní hypotéza

Difúzní hypotéza počítá s přesunem atomů z volných povrchů vzorku. Příčina tohoto jevu jsou atomární vazby, které jsou z důvodu absence další atomové roviny nenasycené. Tudíž jsou schopny působit na další atomy či molekuly cizího prvku v dostatečné vzdálenosti.

Intenzita vazeb může být zvýšena s rostoucí kvalitou povrchu. (3)

2.5 Mezivrstvy

Přídavné materiály se u difúzního svařování obvykle nepoužívají. Nicméně v případech, kdy potřebujeme svařovat materiály s velmi rozdílnými vlastnostmi, je možné použít přídavný materiál ve formě mezivrstev, které zabrání vzniku křehkých intermetalických fází. Mohou být použity v podobě tenkých plíšků, prášků, galvanicky nanášených vrstev či žárových nástřiků, které se nanášejí na místech určených k difúzi (dotyk obou materiálů). V průmyslu se využívají kovy s dobrými plastickými vlastnostmi jako např. nikl (Ni), titan (Ti), kobalt (Co), měď (Cu), železo (Fe). (14)



Obr. 11 – Použití mezivrstvy při difúzním svařování (16)

Uvedené přechodové materiály mohou zajistit čištění povrchů, správný průběh difúze při nižších teplotách, plastické tečení, přizpůsobení povrchů při nízkých hodnotách tlaků a zamezení vzniku intermetalických sloučenin. (14)



3 Typy zkoušek pro hodnocení kvality difúzních spojů

Jsou-li příslušné součásti spojeny difúzním svařováním, tak je potřeba vyhodnotit kvalitu vytvořených spojů. Konkrétně se nejčastěji zkoumají: mechanické vlastnosti či vnitřní struktura. Používají se destruktivní zkoušky, při kterých se vzorek poškodí. Také se aplikují zkoušky nedestruktivní jako například zkouška ultrazvukem. Díky nim jsme schopni predikovat chování spoje za určitých podmínek v provozu.

3.1 Mechanické vlastnosti

Převážně pojednávají o odolnosti materiálu vůči vnějšímu mechanickému namáhání jako je tah, tlak, krut, stříh a ohyb. Tato namáhání mohou působit jednotlivě nebo kombinovaně. (17)

U statických zkoušek se zatížení mění pozvolna a působí po dobu několika minut, zatímco u dynamických se zátěžová síla mění nárazově. (17)

3.1.1 Pevnost v tahu

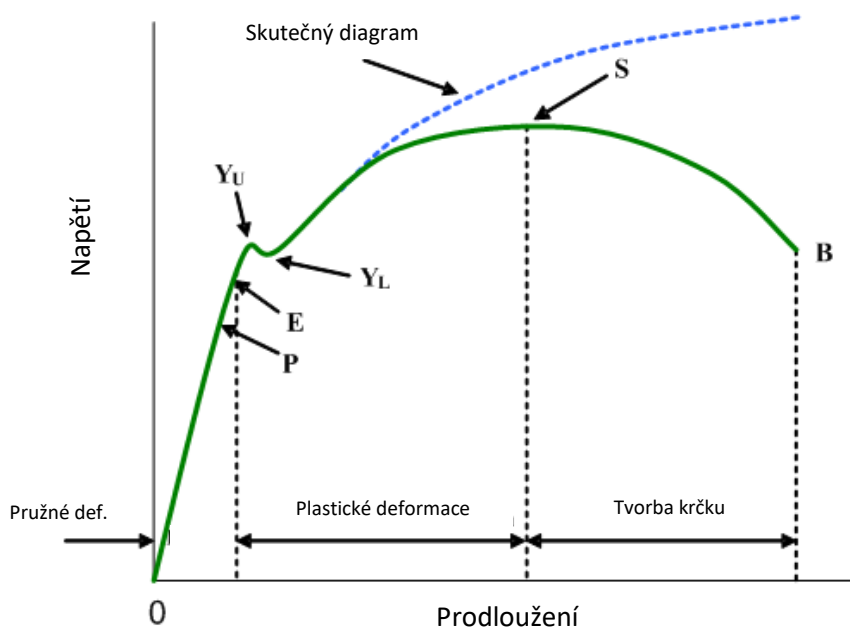
Pevnost je odolnost materiálu vůči vnitřnímu napětí způsobené vnějšími silami, aniž by došlo k jeho porušení soudržnosti. (18)

Zkouška tahem (ČSN EN 10002-1) je statická a vykonává se na trhacím stroji. (17)

Jejím výstupem je tzv. tahový diagram. Ten popisuje závislost vnitřního napětí (nebo zatěžující síly) na deformaci. Rozlišujeme diagram smluvní, skutečný a pracovní. Rozdíl mezi smluvním a skutečným činí průřez vzorku, neboť u smluvního diagramu jsou hodnoty napětí a deformace vztaheny na počáteční průřez S_0 a u skutečného diagramu zaznamenané hodnoty vycházejí z okamžitého průřezu S . Na moderních testovacích zařízeních se operuje s pracovním diagramem, který zaznamenává aktuální hodnoty při zkoušce. Na příslušném pracovním diagramu jsou odečítány číselné údaje zátěžových sil a absolutních (prostých) prodloužení.



Tahový diagram



Obr. 12 – Tahový diagram získaný ze zkoušky tahem (zelená plná čára – smluvní, modrá čerchovaná čára – skutečný) (19)

Z pracovního diagramu se hodnoty sil F a prodloužení ΔL přepočítávají na napětí R a poměrné prodloužení ε jako to je v případě smluvního diagramu.

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (\text{Rovnice 8})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Rovnice 9})$$

U skutečného tahového diagramu jsou hodnoty skutečného napětí σ a skutečného prodloužení φ vztaženy vůči okamžitým rozměrům jako třeba okamžitý průřez S a délka L .

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{Rovnice 10})$$

$$\varphi = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (\text{Rovnice 11})$$

Tahová zkouška svarových spojů je v podstatě stejná, nicméně uprostřed na zkušební vzorku se nachází svarový spoj. Hodnotí se maximální síla při přetržení a místo porušení.

3.1.2 Tvrdość

Tvrdość lze definovat jako odolnost materiálu vůči vniknutí cizímu tělesu.

Zkoušky tvrdosti se také řadí mezi statické. Existuje mnoho způsobů, jak je realizovat, ale pro strojírenství jsou nejpoužívanější vnikací zkoušky, kdy na materiál působí indentor specifického tvaru a zatížení. Číselné hodnoty jsou uváděny bez jednotek. Uvádí se pouze písmenné značení zkoušky za číselným údajem tvrdosti. (17)



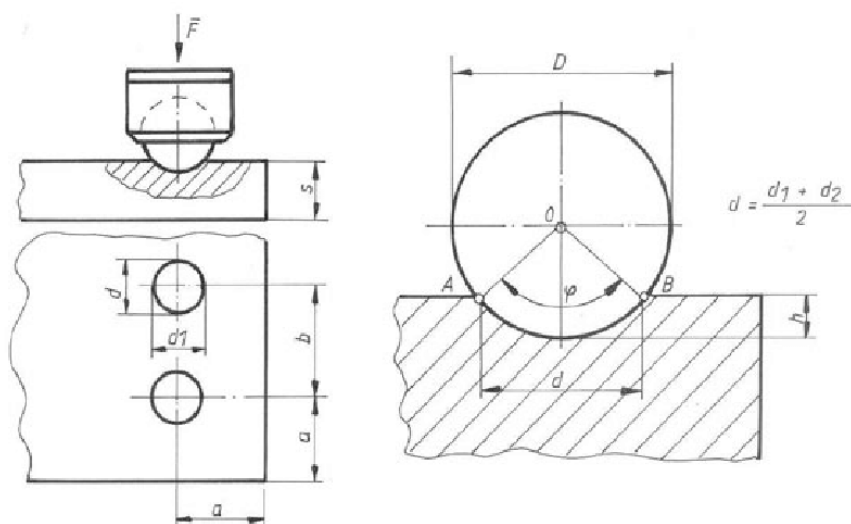
Pro svarové spoje je podstatné zkoušení mikrotvrdosti, kdy se síla zatížení pohybuje v hodnotě (0,1 – 10) N a stanovuje se tvrdost jednotlivých strukturních složek. (20)

Pro měření mikrotvrdosti se nejčastěji používá zkouška dle Vickerse či Knoopa.

Zkoušky dle Brinella (ČSN EN ISO 6506), Rockwella (ČSN EN ISO 6508) a Vickerse (ČSN EN ISO 6507) se řadí mezi nejpoužívanější metody ve strojírenství. Každá z nich je vhodná pro určitý druh materiálu. (17)

Při zkoušce podle Brinella se jako indentor volí kulička z tvrdokovu o průměru D v rozmezí (1 – 10) mm. Vzorek je podroben zkušebnímu zatížení po dobu (10 – 15) s. Po odlehčení se změří rozměry vtisků (jejich průměry) a z nich se určí aritmetický průměr. Ze síly zátěže a z rozměrů stopy vtisku se spočítá výsledná tvrdost.

Zkouška dle Brinella se nejčastěji používá pro měření tvrdosti neželezných kovů jako například pro měď či hliník a jejich slitiny. (17) (20)



Obr. 13 – Zkouška tvrdosti dle Brinella (21)

U zkoušky podle Rockwella lze použít tři metody nesoucí označení HRA, HRB a HRC. Liší se rozdílným indentorem a zkušebním zatížením. Používá se diamantový kužel (pro HRA, HRC) nebo kulička (pro HRB).

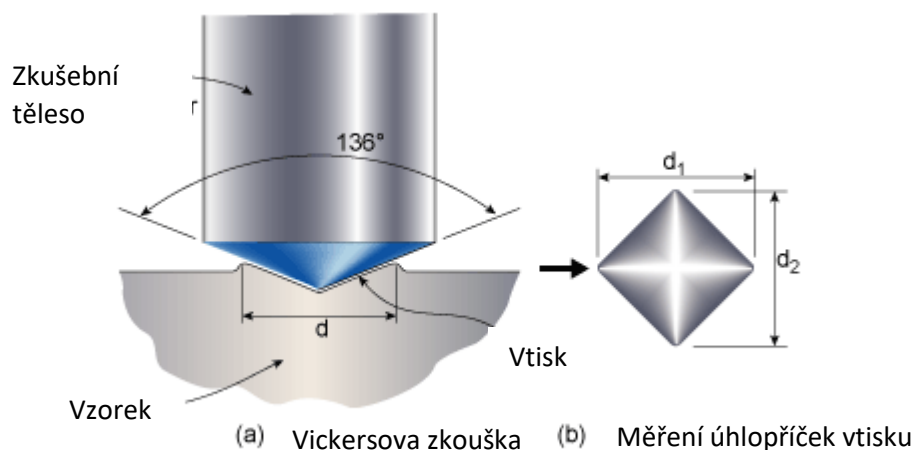
Zkouška dle Rockwella se provádí u tvrdých a kalených materiálů. Používá se u velkých sérií výrobků. (17)

Nejprve se zkušební těleso zatíží předběžnou silou a dále se pozvolna zvyšuje zatěžující síla na určitou hodnotu. Pro každou metodu zkoušky tvrdosti dle Rockwella se velikost zatěžující síly liší.

Po (10– 15) s se síla zmenší zpět na předběžné zatížení F_0 . Zjistí se hloubka vtisku a z měřicí stupnice se odečtou hodnoty potřebné k výpočtu tvrdosti.



Zkouška podle Vickerse se provádí diamantovým jehlanem, jehož vrcholový úhel činí 136° . Ten je zatačován do vzorku pod silou F . Doba plného zkušebního zatížení se pohybuje kolem (10 – 15) s, kdy je po její dosažení těleso odlehčeno a následně změřeny uhlopříčky vtisku. Ty se zprůměrují a dosadí do výpočtového vztahu pro tvrdost či mikrotvrdost (viz. Rovnice 12). (17) (20) (22)



Obr. 14 – Zkouška tvrdosti dle Vickerse (23)

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (\text{Rovnice 12})$$

U Rovnice 12 se v čitateli zlomku nachází zkušební zatížení F a ve jmenovateli aritmetický průměr délek uhlopříček. (20)

Zkouška dle Knoop je dosti podobná jako Vickersova. Rozdíl je ve tvaru indentoru, který má podobu kosočtverce. Vrchol ve směru delší uhlopříčky činí $172,5^\circ$ a ve směru kratší uhlopříčky 130° . (24)

Indentor je vtačován do materiálu po určitou dobu a poté odlehčen. Tvrdost dle Knoop se odečítá podle početního vztahu (viz Rovnice 13). (22) (24)

$$HK = 0,102 \cdot \frac{F}{C \cdot D_1^2} \quad (\text{Rovnice 13})$$

Figuruje zde konstanta indentoru C , která vychází z geometrických tvarů kosočtverce. Jeho hloubka vtisku odpovídá zhruba $1/30$ délky delší uhlopříčky D_1 . (24)

$$C = \frac{\tan\left(\frac{130^\circ}{2}\right)}{\tan\left(\frac{172,5^\circ}{2}\right)} = 0,07028 \quad (\text{Rovnice 14})$$

U svarových spojů se měří průběh tvrdosti ve všech oblastech (ZM1, TOO1, SK, TOO2, ZM2), zatímco u materiálů se tvrdost měří pouze na povrchu.



3.1.3 Zkouška rázem v ohybu

Jedná se o dynamickou zkoušku, kdy síla rázově roste. Určuje tranzitní chování jak materiálů, tak i u svarových spojů. Výstupní data jsou hodnoty energie, které jsou potřebné k porušení vzorku, známá také jako spotřebovaná nárazová práce. (17) (20)

O tom, zdali materiál bude náchylný k houževnatému či křehkému lomu rozhoduje teplota okolí. Graf znázorňující přechod od houževnatého ke křehkému lomu v závislosti na teplotě se nazývá tranzitní křivka. (20)

Zkouška je realizována na Charpyho kladivu. Vzorky jsou odebrány z tyčí čtvercového průřezu tyčí, které jsou spojené tupým svarovým spojem. Vzorky jsou odebrány na různých místech (ZM, TOO, SK) viz. Obr. 15. Do vzorku je vyhotoven vrub ve tvaru U nebo V o určité hloubce. Způsob umístění vrubu vůči svaru a postup pro tuto zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 9016. Zkouška je značena 5 znaky. (25)

Každý znak udává podrobnější informace o průběhu a provedení zkoušky: (25)

- 1. znak udává tvar vrubu

Tvar – U

Tvar – V

- 2. znak udává umístění vrubu

Vrub ve svarovém kovu – W

Vrub je v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) – H

- 3. znak udává orientaci vrubu

Povrch tyče s vrubem je rovnoběžný s povrchem spoje – S

Vrub kolmo k povrchu – T

- 4. znak udává vzdálenost v mm středu vrubu od referenční linie (hodnota a)
- 5. znak udává vzdálenost v mm mezi horním povrchem svarového spoje a bližším povrchem zkušební tyče

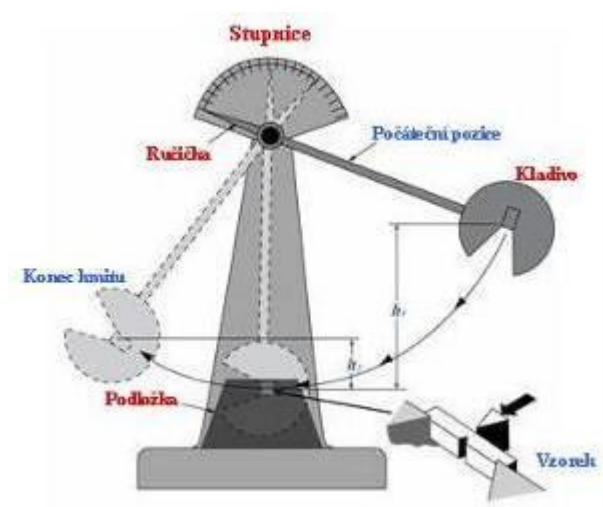


Obrázek různých typů tyčí s vrubem kolmým k povrchu

Odkaz	Střed sváru	Odkaz	Linie natave / svaru
Značení	Znázornění	Značení	Znázornění
VWT 0/b		VHT 0/b	
VWT a/b		VHT a/b	

Obr. 15 – Značení zkoušky (25)

Vzorek je umístěn do Charpyho kladiva. Těžké kladivo o tíhové síle G se z počáteční polohy h_1 pohybuje po kruhové dráze, přerazí vzorek a zastaví se v konečné poloze h_2 . Na příslušném stroji je na číselníku odečtena hodnota nárazové práce. Ta se může také spočítat z obecného vzorce. (17)



Obr. 16 – Charpyho kladivo s umístěním vzorku (26)

$$K = G \cdot (h_1 - h_2) \quad (\text{Rovnice 15})$$

Energie vztažena na jednotku průřezu S_0 se nazývá vrubová houževnatost. Je to ukazatel křehkosti materiálu, který je zásadní, pokud materiál bude pracovat při nízkých teplotách. (17)

$$KC = \frac{K}{S_0} \quad (\text{Rovnice 16})$$



3.2 Metalografické zkoušky

Toto odvětví se věnuje zkoumáním vnitřních struktur. Lze hodnotit strukturní podíl fází či velikosti zrn. Lze také pozorovat kvalitu či tloušťku povlaků. (20)

Výzkum probíhá na předem připravených metalografických vzorcích, které ještě před zkoumáním, musí projít jistou úpravou. Při odběru materiálu se musí dbát na to, aby vzorek nebyl tepelně ovlivněn. Fixace se nejčastěji provádí především u menších vzorků, kdy se zalitím či zalisováním za tepla do pryskyřice, ustálí jejich poloha. Poté následuje broušení povrchu za účelem eliminace povrchových nerovností. Při této operaci mohou vzniknout rýhy, které by mohly ztěžovat pozorování. Proto se vzorky dále leští. K odhalení strukturního rozložení se broušený povrch leptá chemikáliemi. Pro každé materiály se aplikují různá leptadla jako například kellerovo či wackovo činidlo (20)

Mikrostruktura naleptaného vzorku se následně pozoruje na mikroskopech při různých zvětšeních. (20)

3.2.1 Světelná mikroskopie

Světelná mikroskopie využívá světelných paprsků (elektromagnetické optické záření) k pozorování vzorku. Jejich základní charakteristika je vlnová délka, která určuje barvu světla. Jako nástroj pozorování se používá světelný mikroskop. (27)

Tento typ mikroskopu je schopen zachytit objekty, které pouhým okem nelze vidět. Principem funkce je zvětšení obrazu a zvýšení ostroty za pomoci čoček, světla a clon.

Skládá se z částí optické, světelné a mechanické.

Optická část je soustava čoček umístěných od sebe v určitých vzdálenostech. Mají za úkol zvětšit obraz, ovlivnit rozlišení či zorné pole anebo zajistit, aby se co nejvíce světelných paprsků podílelo na tvorbě obrazu. (28)

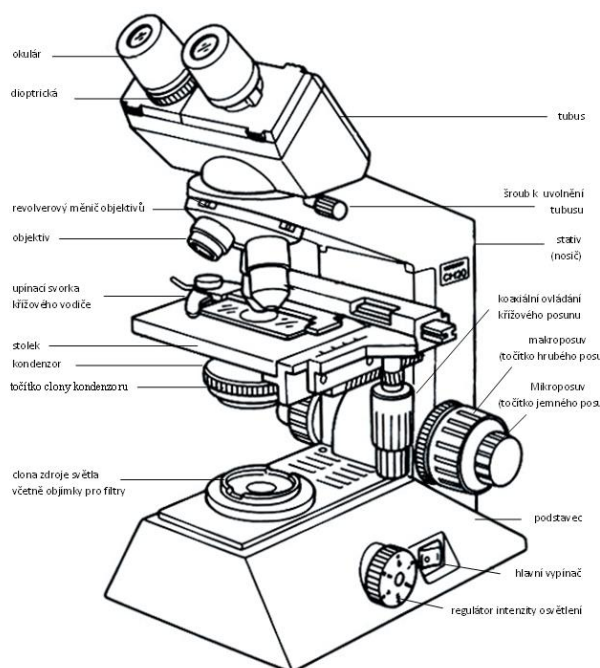
Část osvětlovací se zabývá světelným zdrojem a jeho efekty. Kupříkladu se pracuje se světelnými filtry a zrcátky, které mají za cíl nasměrovat odrazem dopadající světelné paprsky. Dalším účelem je také ochrana zraku uživatele vůči UV záření. (28)

Mechanická soustava se stará o samotnou kostru a její pohyblivé části, které nastavují stolek se vzorkem do požadovaných poloh. (28)

Světelný paprsek o vlnové délce (420 – 760) nm vycházející ze světelného zdroje prochází skrz soustavou čoček a vzorku do objektivu. Zvětšení těchto mikroskopů je obvykle v rozmezí (40 - 1000) X. Detaily lze rozlišit až na úrovni 0,2 μm . Tyto vlastnosti jsou dány povahou světla nikoliv čoček. Kvalitnější obraz zajišťuje kondenzor, který se stará o to, aby paprsek procházel preparátem. (28) (29)



Obraz může být pozorován buď binokulárním okulárem nebo kamerou. K další moderní prostředky sloužící k obrazové analýze jsou například softwary jako IC Capture, IC Measure či ImageJ. (29)



Obr. 17 – Popis světelného mikroskopu (28)

3.2.2 Skenovací elektronový mikroskop (SEM)

Zde jsou nosiči obrazů převážně signály vyvolané odraženými elektrony od vzorku.

Primární svazek emitovaný ze zdroje je usměřován a ovládán elektromagnetickými cívkami. Průchodem elektrického proudu v cívkách se vytváří v jejich okolí magnetické pole, které vychýlí paprsek elektronů do požadovaného směru. (30)

Signál je tvořen odraženými elektrony. Ty jsou následně zachyceny detektorem. Zde dochází k transformaci dopadajících částic na elektrický signál s informací o vzorku. Sekundární elektrony jsou částice, které jsou vyraženy ze svého atomového obalu cizí částicí. V tomto případě se jedná o elektron pocházející z primárního paprsku dopadající na povrch vzorku.

Nicméně vlivem energie dopadající elektronů a interakcí primárního svazku se vzorkem, mohou vznikat další částice či fotony, které jsou nosičem rentgenového záření. Záleží na energii primárního svazku elektronů, neboť ovlivňuje, do jaké hloubky paprsek pronikne. (30)

Existuje několik druhů detektorů, které se využívají k různým zkoumáním materiálu. Díky nim jsme schopni pozorovat mikrostrukturu, topologii povrchu či chemické složení: (31)



- SE detektor
- BSE detektor
- EDS/WDS detektor

SE detektor zachycuje sekundární elektrony. Ty vznikají interakcí elektronů primárního svazku na vzorek, který vyrazí elektrony z vnějších slupek obalu atomů vzorku.

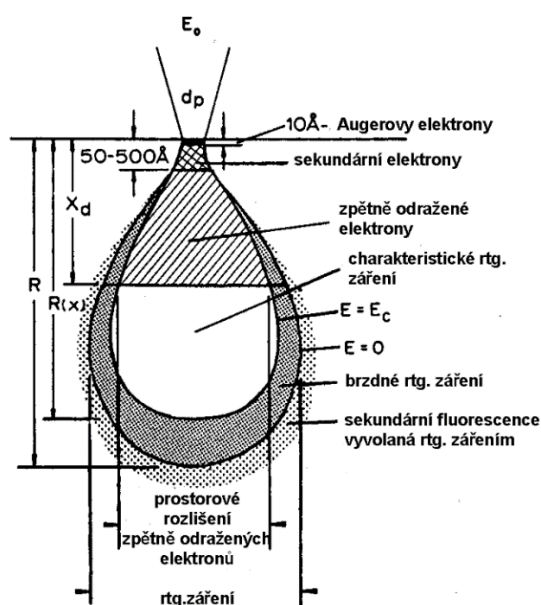
Množství zachycených sekundárních elektronů závisí na úhlu dopadu primárního svazku. Čím větší úhel, tím roste interakční objem a šikmé hrany a plochy se jeví jako světlejší místa. Obraz dostává podobu 3D reliéfu, který je informačně podstatný pro topologickou optimalizaci. (31)

BSE detektor detekuje zpětně odražené elektrony, které vznikají pružnou srážkou s atomovým jádrem vzorku. Ve své podstatě proletí elektron primárního svazku kolem jádra a následně dojde ke směrovému vychýlení.

Atomy s vyšším protonovým číslem odráží více elektronů, a tudíž se místa na vzorku jeví jako světlá. Získáváme tím údaje o fázovém rozložení vzorku. (31)

EDS/WDS detekuje rentgenové záření vznikající vyražením elektronu z atomu vzorku. Vyražený elektron pochází z vnitřní slupky atomového obalu. Jejich místo bude zaplněno jiným elektronem z vnějších energetických hladin. Při tomto procesu dochází k emisi rentgenového záření.

Výstupem EDS/WDS analýzy je spektrum četnosti rentgenového signálu v jednotlivých energetických oknech. Jedná se o píky jednotlivých chemických prvků, jejichž výška je úměrná koncentraci ve vzorku. Dostáváme informace o chemickém složení. (31)



Obr. 18 – Oblasti emisí různých fyzikálních signálů (32)



3.2.3 Transmisní elektronová mikroskopie (TEM)

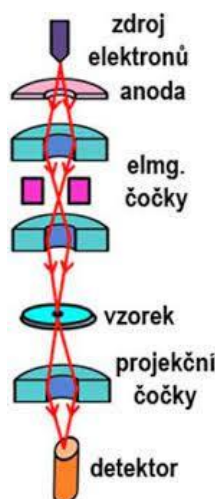
Podobně jako u SEM tak i zde působí emitovaný svazek elektronů vycházející z elektronového děla. Rozdíl od skenovací mikroskopie je ten, že zde elektrony prochází skrz materiál, kde nastává jejich rozptýl. (30)

Tyto druhy mikroskopů mají dva vizuální režimy. První mód se nazývá zobrazovací. Poskytuje nám detailní informace o povrchu vzorku. (33)

Pro metodu BF (Světlé pole) elektrony dopadající na materiál se sráží s jeho atomy. Energie elektronů bude snížena. O tom, jak moc bude ovlivněna energie rozhoduje hmotnost obou sražených těles, a to hmotnost atomu materiálu vzorku a dopadajícího elektronu. Těžší atomy ve vzorku pohltí víc energie dopadajících elektronů (místo se jeví jako tmavší). (33) (30)

U DF (Tmavé pole) je aperturní clona umístěna v určité pozici tak, aby propouštěly pouze vybrané paprsky, u nichž dochází při průchodu k difrakčnímu maximu. (33)

Další zobrazovací mód se jmenuje difrakční režim. Zde jsou nosičem informací prošlé elektrony, které se srazily s atomy vzorku. Avšak energie primárních elektronů byla minimální až zanedbatelná. Z tohoto důvodu je možné mluvit o pružných srážkách, které nejsou úplně ideální. Samotná krystalografická struktura materiálu způsobí difrakci světla, která se promítne na příslušném difraktogramu. (33)



Obr. 19 – Schéma TEM mikroskopu (34)

Zásadní rozdíl mezi SEM a TEM je v tom, že u SEM jsou nosiči informací o materiálu částice, které jsou odráženy od povrchu vzorků, zatímco u TEM jsou to částice elektronového svazku, které projdou vzorkem. Proto musejí být vzorky transmisní elektronové mikroskopie dostatečně tenké, aby skrze ně záření mohlo projít.

Transmisní elektronová mikroskopie se používá k pozorování mikrostruktury a krystalické mřížky (difraktogram).



4 Korozivzdorné oceli

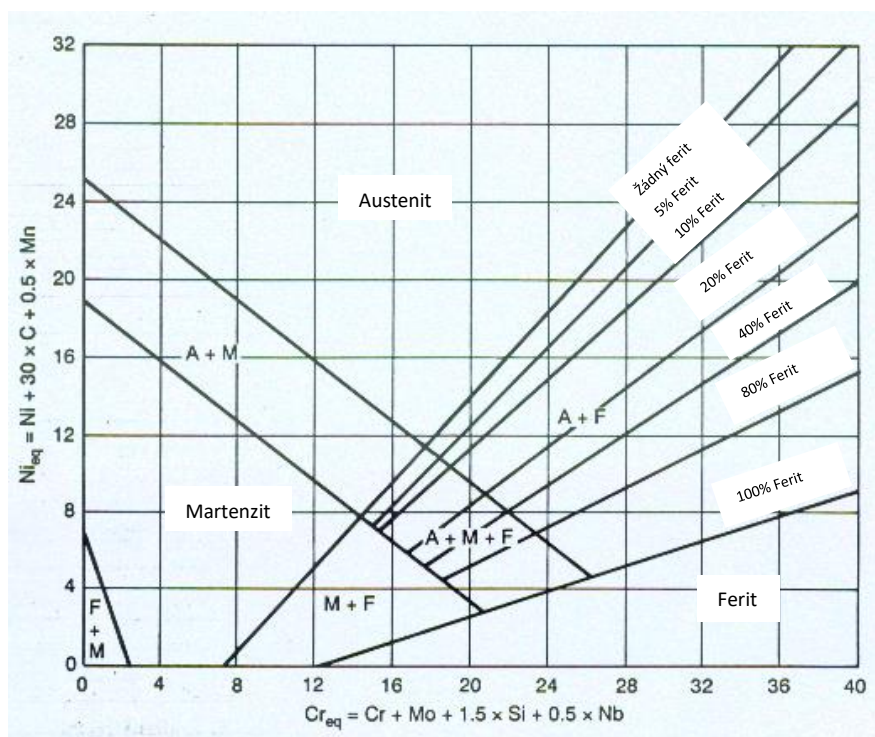
Obecně ocel je slitina železa (Fe) a uhlíku (C) s min. 50 hmot. % a max. 2,14 hmot. % C.

Korozivzdorné oceli jsou charakteristické tím, že minimální obsah chromu (Cr) musí činit alespoň 12 % a mají naopak nízký obsah uhlíku (C) okolo 0,1 %. Nad touto hranicí obsahu chromu je ocel schopna pasivovat. Na povrchu se v důsledku chemických reakcí se vzduchem vytváří pasivační vrstva oxidu chromitého. Díky tomu, že je plně kompatibilní se základním materiálem, tak zaručuje ochranu oceli vůči okolnímu prostředí a dalšími korozními činidly. Dále se u těchto ocelí vyskytují další prvky jako je niob (Nb), nikl (Ni), molybden (Mo), titan (Ti) a jiné. (35)

Tyto oceli patří mezi vysoce legované, neboť obsah legur činí více než 10 %.

Dle strukturního složení se korozivzdorné oceli dělí na austenitické, feritické, martenzitické a duplexní (dvoufázové).

Konkrétně záleží na množství austenitotvorných (niklový ekvivalent) a feritotvorných prvků (chromový ekvivalent). Schaefflerův diagram znázorňuje závislost obou ekvivalentů na výslednou strukturu (viz. Obr. 20).



Obr. 20 – Schaefflerův konstituční diagram (36)

4.1 Feritické korozivzdorné oceli

Tyto oceli obsahují uhlík pod 0,1 % s obsahem chromu (13 – 20) %. Při teplotách 550 až 800 °C dochází k vylučování křehké σ fáze a ke hrubnutí zrna. Z toho vyplývá, že jsou tepelně



nezpracovatelné. Jediná možnost, jak ovlivnit mechanické vlastnosti je deformace za studena s následným rekrystalizačním žiháním. (5)

Stabilizovány jsou feritotvornými prvky jako jsou třeba titan a niob. Ty zamezují vzniku křehkých fází a hrubnutí zrn. (5) (35)

Krystalická mřížka je kubická prostorově středěná (BCC). S touto krystalickou strukturou se pojí vlastnosti jako schopnost magnetizovat, tranzitní lomové chování, tepelná roztažnost či tvárnost. BCC mřížka má ve srovnání s FCC mřížkou méně skluzových systémů, tudíž tvárné vlastnosti u feritických ocelí jsou nižší ve srovnání s austenitickými. Výskyt niklu je zde minimální. Pro lepší svařitelnost se u feritických korozivzdorných ocelí limituje obsah síry (S). Nelze je tepelným zpracováním zpevnit. (37)

Při svařování korozivzdorných feritických ocelí se v tepelně ovlivněné oblasti projevuje růst zrn, a to při teplotách nad 1100 °C. Při růstu zrna se zvyšuje přechodová teplota na hodnoty pokojových teplot. Tyto dva děje jsou příčinou křehnutí spoje. Doporučuje se příslušný svařenec předežhřát na 200 °C a tepelně zpracovat při teplotách (750 – 850) °C. Toto opatření slouží ke snížení zbytkového napětí při svařování nikoliv k zabránění vzniku nežádoucí mikrostruktury. Svařuje se s přídatnými materiály stejného chemického složení jako ZM nebo se používají austenitické svařovací materiály. (38) (39)

Dále jsou svařence z této oceli náchylné na mezikrystalickou korozi v oblasti svaru, kdy je zapotřebí po svařování tepelné zpracování. (38)

Tab. 3 – Přehled vybraných feritických korozivzdorných ocelí a jejich značení (40)

Značení dle EN 10088	Značení dle DIN	Značení dle ČSN
1.4000	X6Cr13	17020
1.4016	C6Cr17	17040
1.4510	X3CrTi17	-
1.4113	X6CrMo17-1	-
1.4105	X6CrMoS17	-

4.2 Martenzitické korozivzdorné oceli

Jedná se o skupinu ocelí s obsahem chromu (Cr) kolem (12–18) % a uhlíku (C) v rozmezí (0,1 – 1,5) %, což je příčinou toho, že dokážou nabýt martenzitické struktury (tetragonální krystalická mřížka α'). Vedle martenzitu se ve struktuře nachází méně jak 10 % zbytkového austenitu či feritu. Je-li obsah feritu vyšší (rostoucí Cr, Mo) tak se jedná o oceli s částečnou fázovou přeměnou (poloferitické oceli). V případě zvyšování obsahu niklu (4 – 6) % roste



obsah austenitu. To se projeví zvýšenou plasticitou, korozivzdorností, ale i svařitelností. (41)

Tyto oceli se tepelně zpracovávají kalením a následným popouštěním. Při zchlazení se rozpadá austenit na další nerovnovážné fáze jako martenzit. K redukci zbytkového austenitu se ještě ocel popouští v rozmezí teplot (670 – 750) °C. Dále se tyto oceli mohou žíhat na měkko. Cílem žíhání je zabránit vzniku martenzitu, a tak se rychlost ochlazování musí pohybovat nejvýše do 30 °C/h a do teplot 650 °C. (41)

Oceli obecně dosahují vysoké pevnosti a také tvrdosti. Zároveň jsou křehké a náchylné k popouštěcí křehkosti. Svařitelnost je podmíněná. Doporučuje se svařovat přídatnými materiály. (5) (39)

Tab. 4 – Příklady martenzitických korozivzdorných ocelí a jejich značení (40)

Značení dle EN 10088	Značení dle DIN	Značení dle ČSN
1.4006	X12Cr13	17021
1.4021	X20Cr13	17022
1.4028	X30Cr13	17023
1.4031	X39Cr13	17024
1.4034	X46Cr13	17024
1.4122	X39CrMo17-1	-

4.3 Austenitické korozivzdorné oceli

Jedním z nepoužívanějších korozivzdorných materiálů jsou oceli austenitické. Tyto oceli jsou legované austenitotvornými prvky jako je například nikl (Ni), mangan (Mn), a dusík (N). Díky nim je tento materiál schopen si zachovat austenitickou strukturu i za pokojových teplot. Obsahují uhlík do 0,1 %. Chrom je zde obsažen v množství (16–22) % a nikl (Ni) min. 6 %. (35) Austenitické oceli vykazují velmi dobrou korozivzdornost, která je obecně vyšší než u feritických ocelí. Nejsou kalitelné, a tak se zpevňuje tvářením za studena či legováním. Jsou nemagnetické a mají dvojnásobnou tažnost než oceli feritické. (35)

Jsou náchylné na mezikrystalovou korozi, kdy se na hranicích zrn spojitě či nespojitě vylučují karbidy a nitridy. Vyloučené precipitáty ochuzují své okolí o složku, která způsobuje korozivzdornost (např. chrom). Mezikrystalová koroze vzniká nejčastěji v rozmezí teplot 500 a 950 °C. K jejímu zabránění se příslušný materiál stabilizuje titanem (Ti) či niobem (Nb). Oba stabilizační prvky mají větší afinitu s uhlíkem (C) než chrom (Cr). To způsobí přednostně



precipitaci karbidů titanu a niobu a tím tak nedochází k chromovému ochuzování materiálu. (35) (41)

Do této skupiny patří zejména chromniklové oceli. Nikl a mangan jsou austenitotvorné prvky, které zlepšují pasivační efekt. Nicméně nikl je poměrně drahá surovina, tak byly zde snahy o jeho nahrazení dalšími austenitotvornými prvky: např. dusíkem, manganem. (41)

Chromniklové oceli obsahují (0,01–0,15) % uhlíku, (12-25) % chrómu a (8-38) % niklu. Vyskytuje se zde titan na stabilizaci a také legující prvky jako křemík, dusík a molybden. (35)

Svařují se s přídavným materiálem stejného či podobného chemického složení. Svařuje se bez přehřevu a je zapotřebí limitovat vnesené teplo. Teplota interpass nesmí být vyšší než 150 °C. (39)

Tab. 5 – Příklad austenitických korozivzdorných ocelí a jejich značení (40)

Značení dle EN 10088	Značení dle DIN	Značení dle ČSN
1.4301	X5CrNi18-10	17240
1.4306	X2CrNi19-11	17249
1.4310	X10CrNi18-8	17241
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	17346
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	17349
1.4435	X2CrNiMo18-14-3	17350

4.4 Duplexní (Austeniticko-feritické) oceli

Tyto oceli mají snížený obsah niklu (Ni) na úroveň (4,5 – 6,5) %. Prvky, které podporují tvorbu austenitu či feritu musí být zde v jisté rovnováze, aby bylo umožněno vzniku dvou fází současně. (35)

Díky 40 – 50 % podílu feritu se dosahuje relativně dobrých mechanických vlastností jako je pevnost a houževnatost. Z toho vyplývá, že je zde velký vliv chemického složení. (35)

Dále je zde zastoupen chrom (22–23) %, molybden (3 – 3,5) % podporující korozivzdornost a jiné prvky. (35)

Ovšem austeniticko-feritické oceli mají svá omezení. Při dlouhodobé teplotní zátěži okolo (280–500) °C dochází k vytvrzování materiálu a k jeho zkřehnutí. (35) (41)



5 Hliník a jeho slitiny

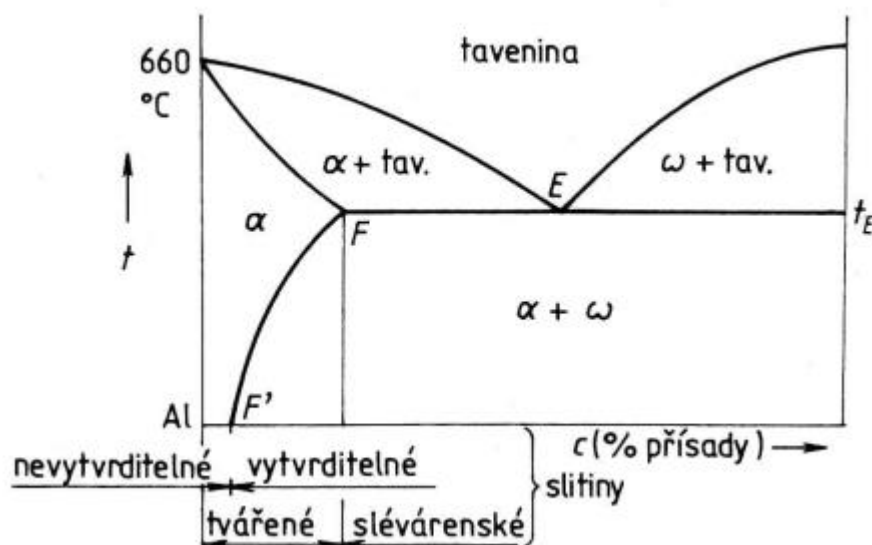
Čistý hliník obsahuje v porovnání se slitinami velmi malé množství příměsových prvků jako například železo (Fe) a křemík (Si). Od 0,05% železa (Fe) se na hranicích zrn vylučuje eutektikum (α +Al₃Fe), které zhoršuje tvárnost a korozivzdornost. Vysoká rozpustnost křemíku zapříčiní vznik precipitátu fáze β . Při současném znečištění jak železem (Fe), tak i křemíkem (Si) vzniká komplexní fáze Al_mFe_nSi. Korozivzdornost je ovlivněna pasivitou. Za atmosférické teploty vzniká oxidická vrstva Al₂O₃, která je stálá jak na vzduchu, tak v mořské vodě. Neodolává však hydroxidům a halovým kyselinám. (41)

Tab. 6 – Mechanické vlastnosti čistého hliníku při polotvrdém stavu (H14) (41)

Označení		Mechanické vlastnosti			
Číselné	Chemické	R _{PO,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	HB [-]
EN AW 1050A	[Al99,5 (A)]	70	100 - 145	2 - 6	34
EN AW 1070A	[Al99,7 (A)]	70	100 - 140	4 - 7	32
EN AW 1199A	[Al99,99 (A)]	65	75	15	25
EN AW 1200A	[Al99,0 (A)]	80	100 - 155	1 - 6	37

Slitiny hliníku se dělí dle technologického zpracování. Konkrétně na slitiny hliníku určené k tváření a na slévárenské slitiny. Jejich hlavní legující prvky jsou křemík (Si), hořčík (Mg), měď (Cu), zinek (Zn) mangan (Mn) a další.

Slitiny k tváření se dále dělí do podkategorií vytvrditelných a nevytvrditelných. O tom, jestli je daná slitina vytvrditelná rozhoduje procentuální obsah legujících prvků.



Obr. 21 – Rozdělení slitin hliníku zobrazené v základním binárním diagramu (42)

5.1 Slitiny hliníku ke slévání

U těchto materiálů je hlavním přísadovým prvkem křemík (Si). Dále jsou zde další legující prvky jako je mangan (Mn), měď (Cu) a hořčík (Mg). Ovšem vyskytují se zde i nečistoty v podobě železa (Fe). Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny technologií odlévání. (41)

Nejsou vhodné ke svařování, protože mají hrubozrnnou strukturu.

Dělí se na skupiny podeutektické (4,5 – 10 % Si), eutektické (10–13 % Si), nadeutektické (nad 13 % Si).

Nejvýznamnější skupina slitin hliníku k odlévání jsou takzvané siluminy (Al-Si-Cu). Jsou to materiály eutektického složení s obsahem křemíku (cca. 12 %). Křemík zvyšuje tvrdost, pevnost, houževnatost a zlepšuje slévárenské vlastnosti. Siluminy mimo jiné obsahují i hořčík (Mg) a měď (Cu), které zlepšují mechanické vlastnosti. Lze použít na tvarově složité odlitky. Jsou schopny se vytvrzovat pod podmínkou, že se přidají přísady jako je mangan (Mn) a hořčík (Mg). Při vytvrzování se dotýčný vzorek po homogenizačním žíhání zchladí vodou na (60–90) °C. Poté následuje umělé stárnutí, kdy je materiál vystaven teplotě cca. 175 °C po dobu 12 hodin. Dochází k růstu precipitátu. (41) (43)

Slitiny s obsahem hořčíku a křemíku (Al-Mg) zlepšují slévárenské vlastnosti. Konkrétně zvětšují oblast mezi likvidem a solidem. S tím se ovšem pojí náchylnost na staženiny a oxidaci za tekutého stavu. Z tohoto důvodu se tavenina leguje beryliem (Be). Vnitřní struktura je tvořena fázemi α , precipitovanými částmi fáze β , částice nerozpustných fází a eutektikum $\alpha+\beta$. Samotný výskyt eutektika při určitém obsahu hořčíku (pod 12 % Mg) může způsobit nerovnovážnou koncentraci, což může zavinit degradaci pevnosti a tažnosti. (41)



Skupina slitin hliníku s mědí mají vyšší pevnost v porovnání se siluminy, ale mají horší slévárenské vlastnosti (špatná zabíhavost, široký interval tuhnutí, sklon k trhlinám). Jsou vytvrditelné. Do 5 % obsahu mědi (Cu) odolávají tečení až do teplot 250 °C. (41) (43)

5.2 Slitiny hliníku k tváření

Polotovary těchto slitin jsou vyrobeny tvářením a dělí se na slitiny vytvrditelné a nevytvrditelné. Vytvrzování je tepelné zpracování, které se uplatňuje především u hliníkových slitin. O tom, jestli je daný materiál vytvrditelný rozhoduje především výskyt požadovaných přísad a jejich množství jako hořčík (Mg) či mangan (Mn). U některých slitin, které jsou vytvrditelné se nemusí příslušný tepelný postup aplikovat, a to z toho důvodu, že by nemuselo být dosaženo optimálních mechanických vlastností. Tím pádem se nevytvrzují a řadí se tak do skupiny nevytvrditelných. (41)

Přítomnost hořčíku (Mg) v chemickém složení vytvrzování umožňuje, zatímco mangan (Mn) zamezuje růst zrn při homogenizačním žíhání. (41)

Nevytvrditelné slitiny mají dle diagramu v oblasti pokojových teplot (22 - 24 °C) strukturní fázi α . V této oblasti se nenachází žádná křivka rozpustnosti, kde by se vylučovala fáze $\alpha + A_m B_n$. Tím nelze dosáhnout nerovnovážné struktury a tím i precipitace, což je hlavní podstata vytvrzování. Jak již bylo zmíněno, tak mohou zde také patřit vytvrditelné slitiny u kterých se tento způsob tepelného zpracování nedoporučuje. Hořčík (Mg) se zde vyskytuje v množství do 7 %. Větší množství Mg by sice umožňoval podíl fáze $\alpha + Al_3Mg_2$ nicméně dojde k poklesu tvářitelnosti a korozivzdornosti. Jelikož zpevnění materiálů precipitátem není úplně možné, tak se zde provádí deformační zpevnění. Do této skupiny slitin patří slitiny Al-Mg a Al-Mn. U slitin Al-Mn se mangan (Mn) nachází do 1,5 %. Ve větších množstvích vznikají krystaly Al_6Mn , který zhoršují mechanické vlastnosti. Očkují se titanem (Ti) a zirkoniem (Zr), aby se potlačilo hrubnutí zrn. (41)

Vytvrditelné slitiny hliníku obsahují hořčík (Mg), ale také další legující prvky. Známou skupinou vytvrditelných slitin jsou například duraly (Al-Cu-Mg). Díky příměsím jako je železo (Fe), mangan (Mn) a křemík (Si) mohou ve struktuře vznikat komplexní fáze $AlCuFeMn$ či $Al_{12}Fe_3Si$, které ve fázi α nejsou rozpustné. Díky samotnému vytvrzování vznikají G-P zóny. Tyto slitiny se zpevňují precipitačními částicemi. Díky své dobré tvářitelnosti se vytvrditelné hliníkové slitiny mohou zpevnit i tvářením, a to jak za tepla, tak za studena. Dají se žíhat za účelem změkčení. Důsledkem precipitačního zpevnění a následného přirozeného stárnutí je výskyt fáze S'. Při přirozeném stárnutí teplotní výdrž činí 4 dny za pokojové teploty. V případě požadavku zvýšení pevnostních vlastností se provádí umělé stárnutí. Ovšem klesá tažnost a odolnost proti korozi. (41)



Další dost rozšířené slitiny hliníku v průmyslu jsou takzvané avialy (Al-Mg-Si), slitiny Al-Zn-Mg či Al-Zn-Mg-Cu. Ty jsou precipitačně zpevněny fází β' (Mg_2Si) na pevnost 300 MPa nebo lze zvýšit pevnost tvářením za studena. Pevnost se snižuje žíháním na měkko. (41)

Tab. 7 – Vybrané slitiny hliníku k tváření (44)

Jakost EN	Jakost EN AW
AlCu4PbMgMn	EN AW 2007
AlMg4,5Mn0,7	EN AW 5083
AlMg3	EN AW 5754
AlMgSiPb	EN AW 6012
AlSi1MgMn	EN AW 6082
AlZn5,5MgCu	EN AW 7075
AlFeSi(A)	EN AW 8011A



6 Konstrukce zařízení pro difúzní svařování

V této kapitole bude popsán princip fungování jednotlivých částí zařízení určených k difúznímu svařování.

Obecně se svařovací zařízení určené pro tento typ svařování, skládají z vakuové pracovní komory a jejich částí potřebné k vytvoření vakua jako například rotační vývěvy. Dále obsahují zdroje tepla (nejčastěji indukčního nebo odporového), hydraulický válec a další příslušenství sloužící k řízení svařovacích podmínek.

6.1 Svařovací (vakuová) komora

Jedná se o neprodyšně uzavřený a utěsněný pracovní prostor, kde probíhá samotné svařování dvou vzorků.

Stěny mohou být vyrobeny ze skla, kovu či z izolačního materiálu. (3)

Vakuum je prostředí, které má podstatně nižší tlak, než je tlak atmosférický. U difúzního svařování svařovací tlak v pracovní komoře činí ($13 \cdot 10^{-5} - 1,3 \cdot 10^{-5}$) Pa. K vytvoření tohoto prostředí je zapotřebí disponovat vývěvou nebo různými pohlcovači plynů. Lze tedy svařovat ve vakuu nebo v ochranné atmosféře. (3) Jsou zde velmi vysoké nároky na hermetické uzavření. Komora musí být tepelně pevná a tvarově stálá. (3)

Svařovací prostor je ohraničen rámem s chladícím pláštěm. Jako chladící medium se může použít voda. (3)

Svařovací zařízení se dělí též podle počtu vakuových komor. Jsou jednokomorové a vícekomorové přístroje. Větší počet komor vykazuje vyšší produktivitu a součinitel vytížení tepelného zdroje. (3)

6.2 Vývěvy

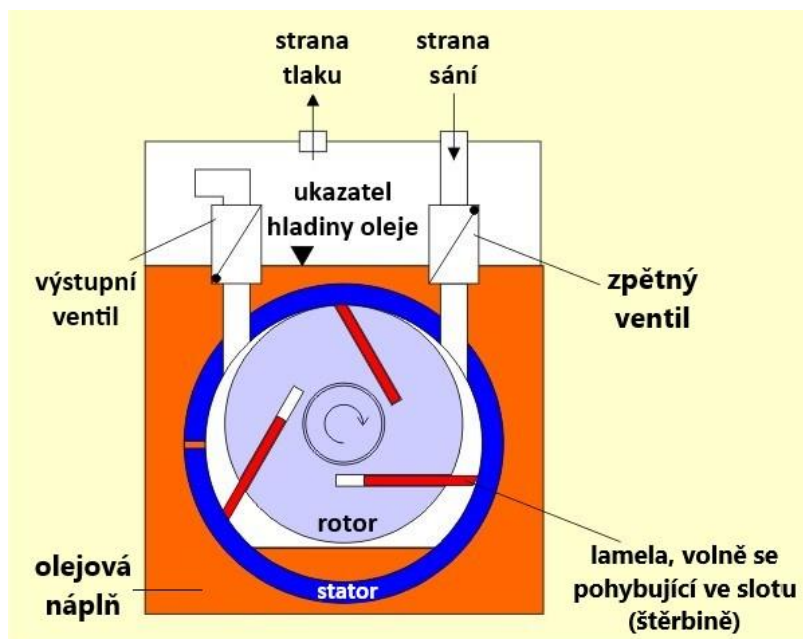
Máme několik druhů vývěv, ale přímo pro tuto aplikaci se používají například rotační lamelové, rotační olejové, turbomolekulární a paroproudové vývěvy. (3)

U rotační vývěvy je stator součástí skříně. Uvnitř se nachází dutina válcovitého tvaru s rotorem, který je excentricky uložen. Z něho vyčnívají lamely mající za úkol vymezit prostor pro nasátý vzduch s prostorem pro vzduch vytlačený. (45)

Rotující rotor nasává plyn ze vstupního ventilu a vytlačuje jej na výstupu. Tím tak dochází k odvodu vzduch z pracovního prostoru (vakuové komory).

Olejové vývěvy fungují na stejném principu jako rotační lamelové. Rozdíl je však v tom, že vývěva je zčásti zaplavena olejem, který funguje jako mazivo a těsnění zároveň. (45)

Jejich nevýhoda je však v tom, že olejové páry a další složky mísí mezi sebou. Tento jev se eliminuje za pomoci použití olejových lapačů. (3)



Obr. 22 – Rotační olejová vývěva (46)

Turbomolekulární vývěvy odsávají vzduch pomocí lopatek, které udávají plynu mechanický impuls a tím tak způsobují v komoře se vstupním ventilem podtlak. Molekuly plynu jsou odvedeny lopatkami na výstupní hrdlo. (47)

Konstrukce paroproudové vývěvy je stejná jako u ejektoru. Pracovní medium je zde pára. Ta proudí pod tlakem z trysky do výtlačného potrubí. V místě, kde je potrubí ejektoru zúženo se nachází sací potrubí. V těchto oblastech dojde vlivem změny průřezu k poklesu tlaku. Vzniká podtlak, který nasaje vzduch ze sacího potrubí.

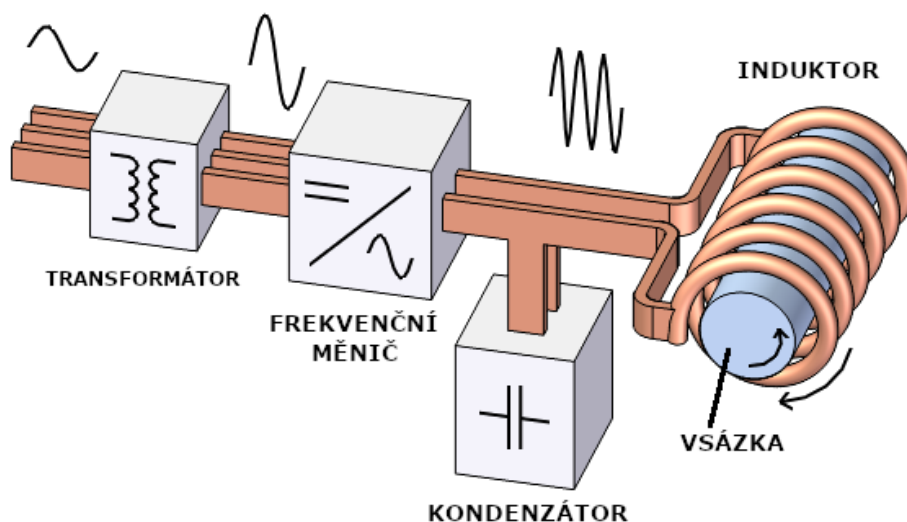
Dále existují odpařovací vývěvy. Ty fungují na základě absorpčních vlastností kovových prášků. Plyn se v nich rozpustí a poté je odpařen. (3)

Kryogenní vývěvy mají stejnou konstrukci jako molekulární vývěvy s tím, že jsou chlazeny heliem (He) či vodíkem (H). To způsobí kondenzaci odsátých plynů. (3)

6.3 Ústrojí pro ohřev

Existuje několik způsobů, jak docílit ohřevu vzorku na příslušnou teplotu. Lze například použít ohřev indukční, odporový, sálavý a ohřev elektronovým svazkem. (3)

Nejčastěji je v praxi využíván indukční ohřev, kdy jsou vzorky pomocí induktoru vystaveny proměnlivému magnetickému poli. Ve vzorcích se indukují vířivé proudy, které jsou příčinou ohřevu. (3) (48)



Obr. 23 – Indukční ohřev (48)

U odporového ohřevu je zdrojem elektrický transformátor. Jeho proud prochází skrz vodivý materiál, a tudíž jej zahřívá. (3)

Zařízení se sálavým ohřevem využívá elektrické topné těleso vyrobené z niobu. (3)

U ohřevu elektronového paprsku dochází k přeměně kinetické energie ze svazku elektronů, na energii tepelnou. K energetické přeměně dochází v místě dopadu částic paprsku. K samotné tvorbě a následné emisi elektronového paprsku dochází v elektronovém dělu. To se skládá ze žhavené wolframové katody a anody. Elektrony uvolněné z katody jsou následně pomocí anody urychlovány. Ovládání směru dopadu svazku je realizováno elektromagnetickými cívkami. (3) (49)



7 Návrh experimentu

7.1 Volba hliníkové slitiny

Z předešlé práce (4), která byla realizována na ÚST, FS, ČVUT v Praze se doporučovalo volit hliníkovou slitinu, která není náchylná na vysoké teploty. Míjí se tím to, aby u materiálu po působení tepla v průběhu svařování co nejméně degradovali jeho mechanické vlastnosti.

Byla tedy zvolena nevytvrditelná slitina hliníku typu EN AW 5083 ve stavu H112 (žíhaný a mírně deformačně zpevněný) v podobě kruhových tyčí, která je dobře svařitelná konvenčními metodami svařování. Podle chemického značení se jedná o slitinu AlMg4,5Mn0,7.

Tab. 8 – Rozměry tyčového polotovaru

Průměr d [mm]	Délka l [mm]
30	3000

Hodnoty mechanických vlastností a chemického složení byly odečteny z inspekčního certifikátu 3.1 dle ČSN EN 10204.

Tab. 9 – Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW 5083

Mez pevnosti [MPa], R_m	Smluvní mez kluzu [MPa], $R_{p0,2}$	Tažnost [%]
331	209	20

Tab. 10 – Chemické složení slitiny hliníku EN AW 5083 [%]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,11	0,24-0,25	0,01	0,6	4,6-4,7	0,1	0,02	0,05-0,06

Tab. 11 – Fyzikální vlastnosti slitiny hliníku EN AW 5083 (50)

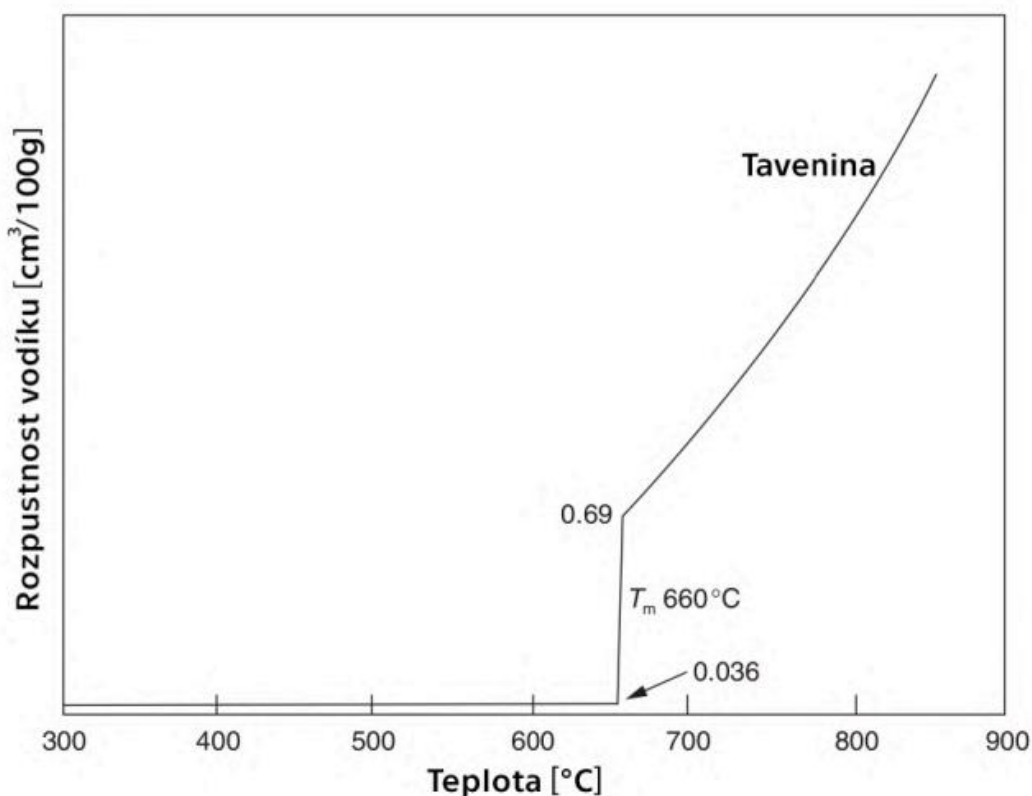
Měrná tepelná kapacita [J/g °C]	0,9
Tepelná vodivost [W/m K]	117
Interval tuhnutí [°C]	591–638

Príslušná hliníková slitina má dobrou svařitelnost pro svařování metodou MIG, TIG a pro odporové svařování. (51)



V místech svarového spoje a tepelně ovlivněné oblasti dochází k poklesu pevnosti. Nicméně pokles není tak výrazný v porovnání s vytvrditelnými slitinami. Příčinou degradace mechanických vlastností u nevytvrditelných hliníkových slitin je hrubnutí zrn. Tento jev probíhá za předpokladu, že ohřev je nad teplotou rekrystalizace. (52)

Dalším poznatkem je rozdílná rozpustnost vodíku ve slitinách hliníku v závislosti na teplotě. Ve své podstatě mají taveniny těchto slitin mnohem větší rozpustnost nežli ve stavu tuhém viz. (Obr. 24). Tento jev je příčinou vzniku porezity. Minimalizací vystavení materiálu vůči vodíku se náchylnost na tvorbu pórů snižuje. Přispívá k tomu vhodné skladovací podmínky materiálu, čistota ploch anebo nízká svařovací rychlost, resp. rychlost chladnutí. (53)



Obr. 24 – Rozpustnost vodíku ve slitině hliníku v závislosti na teplotě (4) (53)

Legující prvky a jejich koncentrace ovlivňují náchylnost vzniku trhlin za tepla. Přítomnost legur podporuje vznik fází s různými vlastnostmi jako je třeba teplota tuhnutí. Při intervalu tuhnutí může nastat segregace fází na hranicích zrn, která může způsobit iniciaci trhlin. K předejití vzniku trhlin za tepla se nejčastěji provádí dodržení koncentrací legujících prvků. (53)

7.1.1 Porovnání hliníkové slitiny EN AW 5083 s EN AW 6082

V této části je porovnávána hliníková slitina EN AW 6082 (AlSi1MgMn), která byla použita v předchozím výzkumu (4) se zvolenou slitinou EN AW 5083 (AlMg4,5Mn0,7).



Slitina hliníku EN AW 6082 byla dodána ve stavu T6511, což znamená homogenizačně žhánáno a uměle stárnuto. Z tohoto značení stavu vyplývá, že tato slitina je vytvrditelná, zatímco EN AW 5083 je nevytvrditelná. (4) (54)

Tab. 12 – Chemické složení litiny EN AW 6082 (4) (55)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
1,2	0,4	0,06	0,8	0,87	0,033	0,007	0,047

Tab. 13 – Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW 6082 (4) (55)

Mez pevnosti [MPa], R_m	Smluvní mez kluzu [MPa], $R_{p0,2}$	Tažnost [%]
310	255	9

Hliníková slitina EN AW 5083 má ve srovnání s EN AW 6082 vyšší smluvní mez kluzu, ale nižší mez pevnosti. Disponuje lepší tažností. V chemickém složení jsou rapidní rozdíly v obsahu hořčíku (Mg), který je ve slitině EN AW 5083 o 5,5krát více obsažen než ve slitině EN AW 6082, protože se jedná o hlavní legující prvek řady 5000.

Obě slitiny jsou dobře svařitelné, ale u EN AW 6082 je zde riziko poklesu pevnostních vlastností, a to v důsledku zhrubnutí precipitátů způsobené přestárnutím. V případě EN AW 5083 tento jev nenastane, poněvadž je nevytvrditelná.

Dále má slitina EN AW 5083 lepší korozivzdorné vlastnosti a dokáže odolávat slané mořské vodě. (56)

7.2 Volba korozivzdorné oceli

Korozivzdornou ocel poskytl ústav strojírenské technologie ČVUT. Byla použita austenitická korozivzdorná ocel 1.4301 [X5CrNi18-10]. Příslušný materiál byl ve formě tyčového polotovaru s kruhovým průřezem o průměru 25 mm.

Tab. 14 – Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli 1.4301 (57)

Mez pevnosti [MPa], R_m	Smluvní mez kluzu [MPa], $R_{p0,2}$	Tažnost [%]
520 - 720	min. 210	min. 45



Tab. 15 – Chemické složení korozivzdorné oceli 1.4301 [%] (57)

C	Si	Mn	Cr	Ni	N	S	P
0,07	1	2	17,5-19,5	0,18 – 10,5	0,1	0,015	0,045

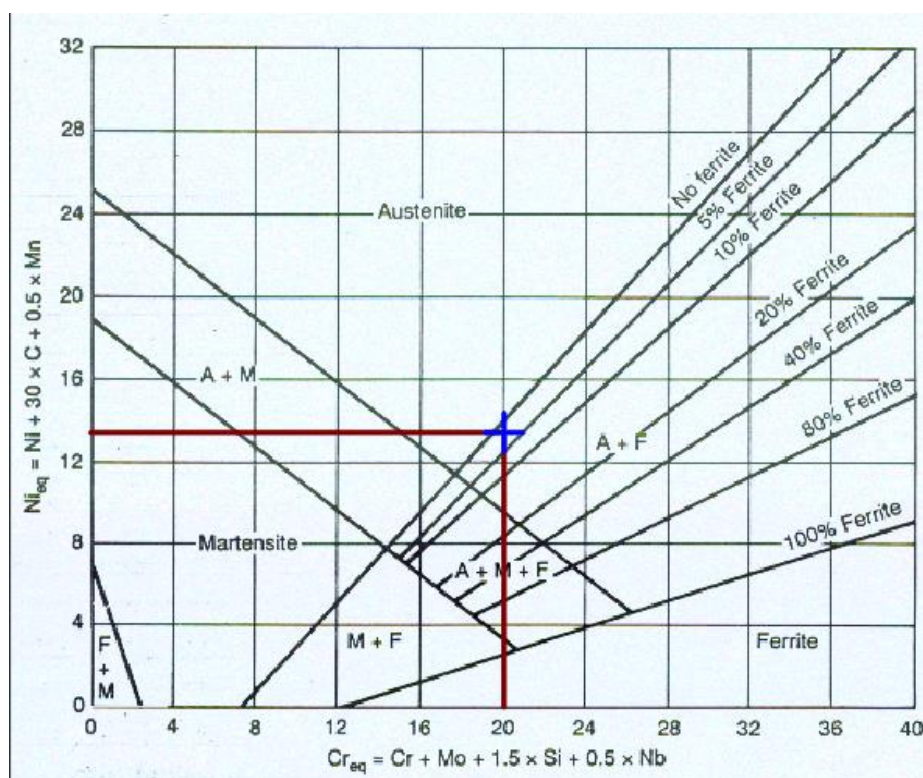
Pro názornost byly vypočítány (podle rovnic 17 a 18) chromový a niklový ekvivalent, které byly zaneseny do Schaefflerova diagramu.

$$Cr_{ek.} = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb \quad (\text{Rovnice 17})$$

$$Ni_{ek.} = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad (\text{Rovnice 18})$$

Tab. 16 – Chromový a niklový ekvivalent oceli 1.4301

$Cr_{ek.} [-]$	20,5
$Ni_{ek.} [-]$	13,1



Obr. 25 – Označení oblasti výskytu korozivzdorné oceli 1.4301 v Schaefflerově diagramu



Tab. 17 – Tepelné vlastnosti korozivzdorné oceli 1.4301 (57)

Tepelná kapacita [J/g °C]	0,5
Tepelná vodivost [W/m K]	16,2
Interval tuhnutí [°C]	1400–1450

Korozivzdorná ocel 1.4301 má výbornou svařitelnost. Lze ji svařovat bez přídavného materiálu, kdy se při tavném svařování vylučuje 2 % feritu δ , který byl rozpuštěn rozpouštěcím žiháním a chladnutím svarové lázně pod teplotou 800 °C. (4)

Malý obsah feritu δ snižuje sklon k trhlinám za tepla. Vzniká již zmíněným tepelným zpracováním (rozpuštěcím žiháním) nebo zvýšením obsahu chromu (Cr) a snížení niklu (Ni). Nachází-li se v austenitické oceli víc jak 25 % chromu, tak začíná vznikat σ fáze, která je tvrdá, křehká a pro svařovací proces nežádoucí. (58) (59) (60)

V případě svařování s přídavným materiálem se doporučuje, aby jeho chemické složení bylo velmi podobné základnímu materiálu. Důvod je promísení a zachování homogenní struktury. Je-li složení výrazně odlišné, tak se zvyšuje náchylnost svaru na galvanickou korozi. Proto je přídavný materiál ušlechtlejší nežli základní a tím tak koroduje základní materiál, kde vzhledem k výrazně větší ploše napadení lze dopady galvanické koroze zanedbat. (59) (60)

Při problému s trhlinami za tepla se používají PM s malým podílem delta feritu. Ze stejného důvodu je nutno limitovat tepelný příkon při svařování (optimálně do 1,5 kJ/mm) a svařovat bez přehřevu a u vícevrstvých svarů zvolit vhodně teplotu interpass.

Při svařování není tato ocel odolná vůči mezikrystalové korozi. K jejímu zamezení se provádí stabilizace titanem (Ti) nebo niobem (Nb). Lze svařovat běžnými metodami kromě svařování plamenem. (61)

7.3 Příprava vzorků pro difúzní svařování

Nejprve bylo zapotřebí nakoupit hliníkovou tyč EN AW 5083. Tyč byla tedy objednána u firmy ALCOM ALVAL. Průměr činil 30 mm a délka 3 m. Tento polotovar musel být dodatečně na soustruhu obroben na finální průměr 25 mm. Dále pomocí laboratorní pily Struers LABOTOM - 3 vyly nařezány vzorky o tloušťce 7 mm.



Obr. 26 – Laboratorní pila Labotom-3



Obr. 27 – Nařezané vzorky (o tloušťce 7 mm)

Poté byly vzorky vybroušeny na požadovanou drsnost. Podmínky a nastavení režimů broušení byly převzaty z předchozích výzkumných prací (4). Celý proces probíhal na brusce Phoenix Beta s automatickou hlavou Vector od výrobce Buehler (viz. Obr 28).



Obr. 28 – Bruska s automatickou hlavou

Tab. 18 – Parametry při broušení vzorků (4)

Operace	Otáčky	Zátěž	Rozložení zátěže	Směr otáčení	Oplach	Doba	Papír FEPA
Broušení 1	300 ot/min	30 N	Rovnoměrné	Sousledné	ANO	60 s	P180
Broušení 2	300 ot/min	30 N	Rovnoměrné	Sousledné	ANO	90 s	P500
Broušení 3	300 ot/min	30 N	Rovnoměrné	Sousledné	ANO	120 s	P1200

Na soustruhu byly poté uprostřed vzorků vytvořeny otvory pro vodící trn o průměru 5 mm.



Obr. 29 – Vzorky s vyvrtaným otvorem (horní řada hliníková slitina, spodní ocel)



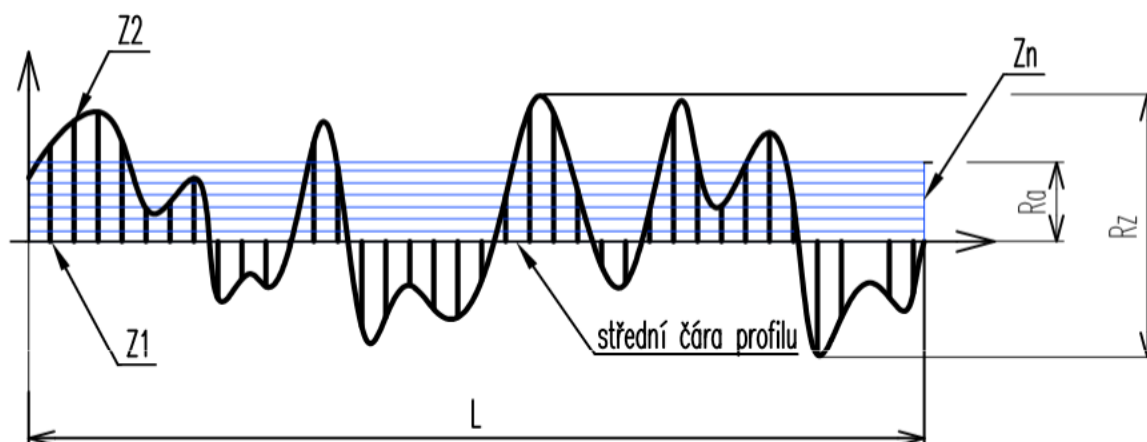
Následně u vzorků byla zjišťována kvalita povrchu dotykovým drsnoměrem značky MITUTOYO SJ-210. Změřeny byly parametry drsnosti Ra, Rz a Rq.

Tab. 19 – Změřené parametry drsnosti povrchu vzorků – Ra, Rz, Rq [μm]

	EN AW 5083	1.4301
Ra	0,18	0,07
Rq	0,24	0,09
Rz	1,55	0,56

Údaje z (Tab. 19) byly získány z měření na čtyřech vzorcích oceli a hliníkové slitiny. Měření u každém vzorku bylo provedeno na šesti místech. Výsledky byly zprůměrovány aritmetickým průměrem a zaneseny do příslušné tabulky.

Průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu (Ra) je aritmetický průměr absolutních hodnot výšek profilů. Nerovnosti jsou charakterizovány v určité délce l (Obr. 30). (62)



Obr. 30 – Ra a Rz parametr drsnosti povrchu (63)

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (\text{Rovnice 19})$$

Parametr Rz udává hodnotu rozdílu mezi maximální a minimální výškou profilu. (63) (64)

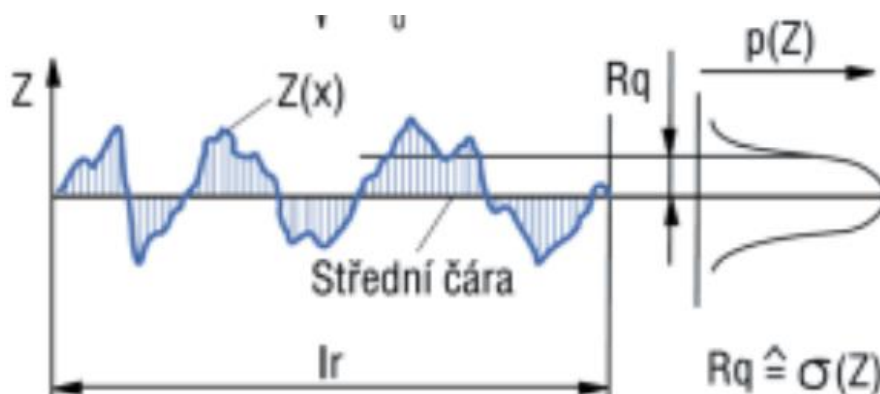
$$Rz = z_{max} - (z_{min}) \quad (\text{Rovnice 20})$$

Průměrnou kvadratickou odchylku profilu uvádí parametr Rq. Je citlivý na nežádoucí výstupky, proto vykazuje vyšší hodnoty než parametr Ra. Využívá se nejvíce v optickém průmyslu. (65)



$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z^2(x) dx}$$

(Rovnice 21)



Obr. 31 – Rq parametr drsnosti povrchu (64)

Oba vzorky byly, ještě před vložením do kelímku, broušeny a leštěny z důvodu odstranění oxidických vrstev.

7.4 Svařovací zařízení

Bylo použito zařízení Indutherm SU450, které bylo použito i v předchozím výzkumu.



Obr. 32 – Indutherm SU450 (66)



Tab. 20 – Technické parametry svařovacího zařízení Indutherm SU450 (66)

Technické parametry přístroje Indutherm SU450	
Kapacita	max. 6 kruhů
Teplota kelímku	max. 1400 °C s termočlánkem typu S
Výkon	4,9 kW
Síťový přívod	3x400 V/3x16 A, 50 nebo 60 Hz
Přípojka chladicího okruhu	2,5 – 6 bar/min. 200 l/h
Výstup chladicí vody	Beztlaký
Vstupní teplota chladicí vody	15 – 30 °C
Okolní teplota	10 – 35 °C
Relativní vzdušná vlhkost	20 – 80 %
Přípojka stlačeného vzduchu	7 - 8 bar
Přípojka ochranného plynu	1,5 až 2,0; čistý N ₂ nebo Ar
Vakuum	0 – 20 mbar absolutní min. 21 m ³ /h
Hmotnost	cca. 60 Kg
Rozměry (šířka x hloubka x výška)	500 mm x 680 mm x 810 mm

V zařízení se nachází pracovní komora s grafitovým kelímkem, vakuové čerpadlo, chladicí jednotka a přívody ochranného plynu. Dále přístroj obsahuje termostat s termočlánkem a indukční generátor. Ovládání a kontrolu provozu zde zajišťuje ovládací panel, hlavní vypínač, dokumentaci reálně dosažených parametrů kontrolní tiskárna a signalizaci dosažení konce programu kontrolní majáček. (67)



Obr. 33 – Ukázka otevřené pracovní komory (66)



7.4.1 Popis ovládání svařovacího zařízení

Nejprve bylo zapotřebí zapnout chladicí zařízení, otevřít ventil tlakové nádoby s inertním plynem (Argon) a poté zapnout samotný svařovací přístroj.



Obr. 34 – Ovládací panel

Na již spuštěném zařízení se jako první zapnou čerpadla tlačítkem Vacuum Pump. Jako další úkon se prostřednictvím pěti tlačítek, které se nacházejí pod displejem, nastaví program svařování.

Po smáčknutí tlačítka Program setup (tlačítko úplně vpravo) se přejde do režimu nastavení následujících parametrů:

- Teplota svařování (temperature)
- Počet proplachů svařovací komory pomocí inertní ochranné atmosféry (washing while heating)
- Čas výdrže pro stabilizaci teploty (heat up time)
- Přítlačná síla vyvozená grafitovým válcem opřeným o stěnu komory (sinter pressure)
- Čas svařování (sinter time)
- Maximální deformace (max. reduction per piece)
- Snížení teploty po absolvování svařovacího cyklu (lowering temperature)



Obr. 35 – Nastavení programu pro teplotu 600 °C, čas svařování 600 s a tlak 2,5 baru

Změna volby svařovacích parametrů probíhala pomocí nastavení teploty a času svařování. Ostatní parametry byly ponechány jako výchozí a nebyly měněny (Obr. 35).

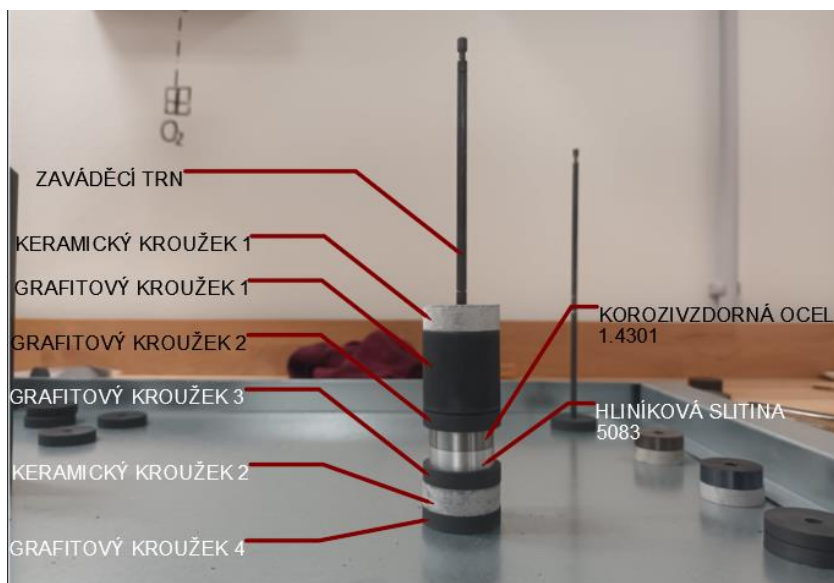
Poté byl spuštěn induktor (tlačítko Generator Start) a vyčkávalo se, dokud teplota ve svařovací komoře nedosáhla 300 °C. Při této teplotě (předehřevu pracovního kelímku) byly do komory umístěny vzorky (popis uspořádání vzorků je uveden v kapitole 7.4.2) a následně byl spuštěn nastavený program (tlačítko Automatic Start). Svařovací proces proběhl v ochranné atmosféře inertního plynu.

Po uplynutí doby svařování byl program zastaven (Automatic Stop) a následně vypnut induktor (Generator Stop).

Vzorky byly chlazeny ve svařovací komoře až do teploty 100 °C a poté byly vyndány z pracovní komory a chlazení následně probíhalo na vzduchu.

7.4.2 Umístění vzorků do zařízení

Sestava zkušebních vzorků byla postupně naskládána na vodící tyč (trn) a doplněna izolačními keramickými a grafitovými kroužky dle doporučení výrobce zařízení a dle zkušeností z předchozích výzkumných prací (4) (66), tak aby celková výška sestavy byla vždy stejná (viz. Obr. 36).



Obr. 36 – Vzorky v sestavě (bez přítlačného válečku)

7.5 Návrh svařovacích parametru

Dle teorie a dostupných publikací a literárních zdrojů má teplota pro difúzní svařování činit $(0,6 - 0,8) \cdot T_t$. Uvádí se nižší teplota tání materiálu ze svařované dvojice. (14)

V tomto případě se jedná o hliníkovou slitinu, která má nižší teplotu tání. Teplota solidu je 591 °C a teplota likvidu 638 °C. (50)

Z toho vyplývá, že difúzní pochody ve vzorcích by měly započnout kolem 380 °C. Optimální teploty difúzního svařování se pohybují v rozmezí (355–477) °C.

Parametry byly navrženy obdobně jako u předchozích výzkumných prací (4), a to z důvodu možné porovnatelnosti výsledků tohoto experimentu s předchozími realizovanými experimenty. Upřednostňovány byly především parametry, které se v předchozím výzkumu osvědčily:

- Teplota: 500 °C; čas: 150 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 500 °C; čas: 300 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 500 °C; čas: 600 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 500 °C; čas: 900 s; tlak: 2,5 bar

- Teplota: 525 °C; čas: 150 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 525 °C; čas: 300 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 525 °C; čas: 600 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 525 °C; čas: 900 s; tlak: 2,5 bar



- Teplota: 550 °C; čas: 150 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 550 °C; čas: 300 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 550 °C; čas: 600 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 550 °C; čas: 900 s; tlak: 2,5 bar

- Teplota: 575 °C; čas: 150 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 575 °C; čas: 300 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 575 °C; čas: 600 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 575 °C; čas: 900 s; tlak: 2,5 bar

- Teplota: 600 °C; čas: 150 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 600 °C; čas: 300 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 600 °C; čas: 600 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 600 °C; čas: 900 s; tlak: 2,5 bar

Dále byly voleny další parametry, které berou v potaz změny přítlačku a delší časy sintrace:

- Teplota: 575 °C; čas: 1200 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 575 °C; čas: 2700 s; tlak: 2,5 bar
- Teplota: 600 °C; čas: 600 s; tlak: 2,0 bar
- Teplota: 600 °C; čas: 300 s; tlak: 2,0 bar

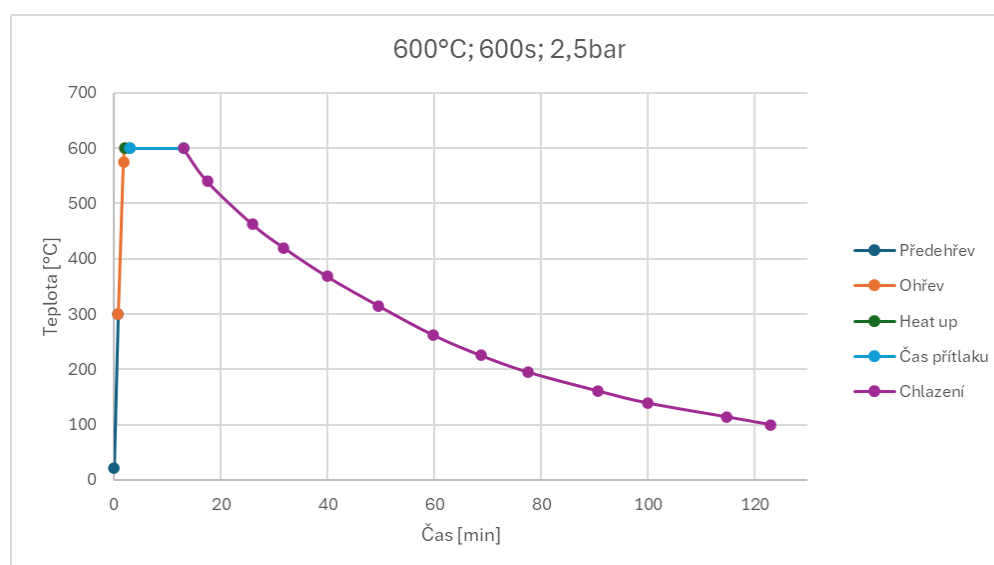


8 Průběh svařování a výsledky

Během svařovacího procesu byly zaznamenány veškeré teploty v závislosti na čase. Dle zkušeností z předchozích prací byl zvolen předehřev pracovního grafitového kelímku, a to z důvodu, aby doba mezi vložením vzorků do komory a počátkem difuzních pochodů byla co nejkratší, a zároveň aby byla zvýšena životnost kelímku. Zvolená hodnota předehřevu činila 300 °C.

Celá sestava byla vyjmuta za teploty 100 °C, aby oxidace vzorků byla minimální.

Po dobu difúzního svařování byla pomocí stopek zaznamenán čas v závislosti na teplotě. Tyto průběhy teplotního režimu byly následně přeneseny do grafu (viz Obr. 37).



Obr. 37 – Průběh svařování při 600 °C; 600 s; 2,5 bar

První procesní parametry byly zvoleny (teplota: 600 °C, doba svařování: 600 s), neboť tyto parametry dávaly dobré výsledky u Al slitiny EN AW 6082, která byla použita v (4).

Tab. 21 – Aplikované parametry a jejich úspěšnost

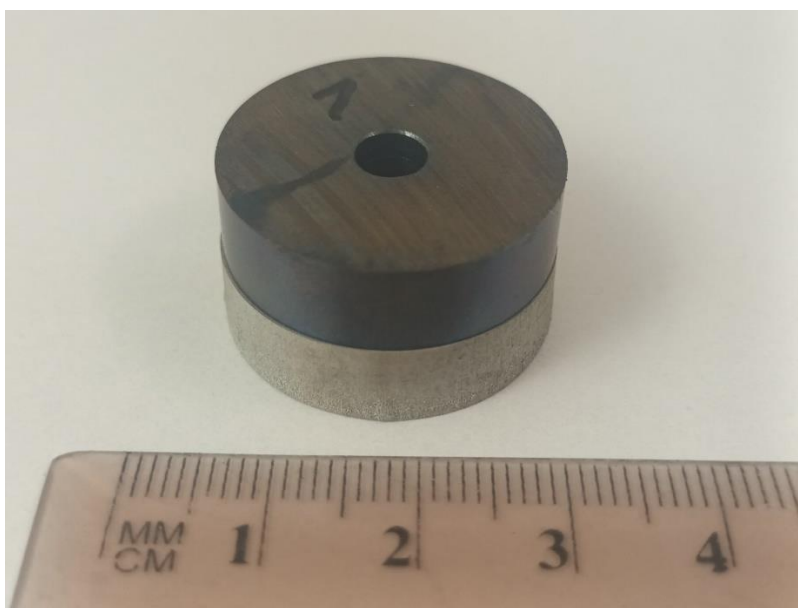
Přítlak	2,5 bar			
	150 s	300 s	600 s	900 s
Teplota/ Čas				
500 °C	-	-	-	-
525 °C	-	-	-	-
550 °C	-	2	-	3
575 °C	-	-	-	5
600 °C	-	-	1; 6	-



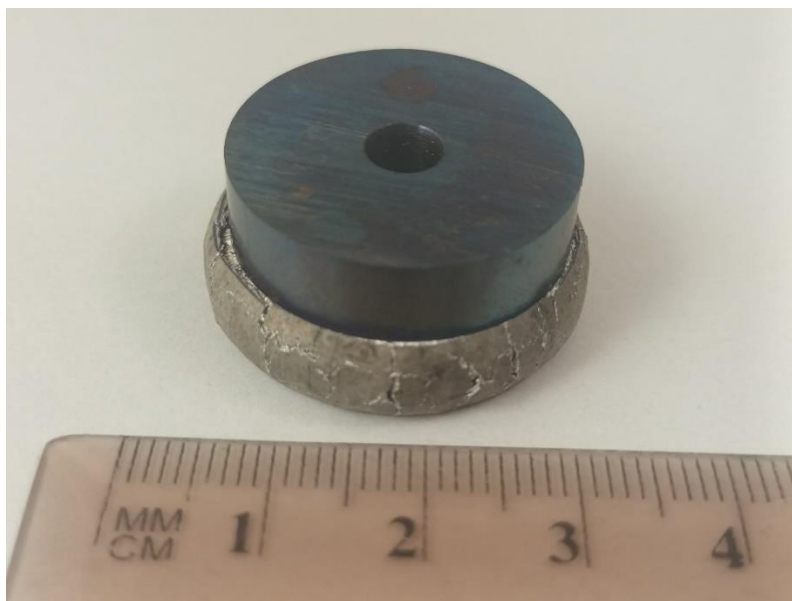
V (Tab. 21) jsou zaznamenané číselným symbolem pořadí parametrů, které byly postupně aplikovány. Barevné stínování políčka v tabulce značí, jestli oba vzorky za těchto daných svařovacích podmínek vytvořily odolný a soudržný difúzní spoj (červená: nespojeno; zelená: spojeno).

Jako první byl svařen vzorek číslo 1 (Teplota: 600 °C; čas svařování: 600 s; tlak: 2,5 bar), jehož svar si zachoval soudržnost. Později byla zjištěna závada přitlačného pístu ve svařovacím přístroji, která zapříčinila nesprávné hodnoty přitlaku. Nebylo tedy možné zjistit správné parametry, za kterých byl vzorek vytvořen. Nebyl funkční posuvný píst, vyvozuující tlak na přitlačný grafitový válec, tzn. svařované součásti byly v kontaktu, ale nepůsobil na ně nastavený tlak.

Po servisních opravách bylo možné opět začít svařovat, nicméně, než se podařilo odhalit příčinu problému a chybu zařízení, došlo ke značnému zdržení plánovaných experimentálních prací (proto výsledný experiment byl redukován dle časových možností autora DP). K ověření opakovatelnosti byly výše uvedené parametry (600 °C; 600 s; 2,5 bar) znovu použity na vzorku číslo 6. Byl tak vytvořen svarový spoj, ale vlivem vysoké teploty a vyššího přitlaku se hliníkový vzorek značně zdeformoval (viz. Obr. 39).



Obr. 38 – Svařený vzorek č. 1 (600 °C; 600 s; 2,5 bar)



Obr. 39 – Deformovaný vzorek č. 6 (600 °C; 600 s; 2,5 bar)

Před zkoušením různých variant procesních parametrů bylo nejprve přistoupeno k vyhodnocení vytvořených vzorků spojů (i přes jejich porušení), aby bylo možné zjistit, resp. vyhodnotit důvody vzniku porušení a dle toho zvolit další vhodný postup výroby svarových spojů.

Ukázalo, že zvolená slitina hliníku (EN AW 5083) je obtížně svařitelná. Bylo pozorováno, že při odejmutí svařované sestavy z kelímku (při 100 °C) se oba vzorky jevily jako spojené. Nicméně zhruba po dvou minutách chladnutí na vzduchu se oba vzorky samovolně rozpojily. Tento jev se vyskytl u drtivé většiny nastavených parametrů (červená pole v tabulkách parametrů).

Z toho plyne, že kombinace zvolených materiálů se chová podstatně odlišným způsobem než při použití slitiny typu EN AW 6082, která byla využita v předchozích výzkumných pracích. (4)

Proto byly dále použity nově navržené parametry (Tab. 22).

Tab. 22 – Aplikace nových parametrů a jejich úspěšnost

Parametr [Teplota; Čas; Přítlak]	Číslo vzorku
575 °C; 1200 s; 2,5 bar	7
575 °C; 2700 s; 2,5 bar	9
600 °C; 600 s; 2,0 bar	4
600 °C; 300 s; 2,0 bar	8



U vzorku číslo 7 byl zvolen delší čas svařování. Po vyjmutí z kelímku příslušný vzorek vykazoval stejné negativní chování jako u předchozích parametrů, kdy se po několika minutách hliníková slitina od oceli samovolně oddělila. Svařovaný povrch vypadal stejně jako na Obr. 40.

U vzorku číslo 4 byly zvoleny teplota a čas (600 °C, 600 s), které se pro spojení obou vzorků v tomto experimentu jako jediné osvědčily, nicméně s velkou deformací Al vzorku. Byl tedy zvolen nižší přítlak (tlak nastaven na 2,0 barů), aby nevznikaly příliš velké deformace jako u vzorku 6. U příslušného vzorku (č. 4) difúzní spoj vydržel a stopy po deformaci byly ve srovnání s číslem 6 minimální. Nicméně i u vzorku č. 4 došlo k porušení spoje, ale v důsledku vyvození tahového namáhání, které však bylo vyvozeno ručně, tedy pevnost vzorku byla velmi malá.



Obr. 40 – Vzorek č. 4 (600 °C; 600 s; 2,0 bar)

8.1 Výsledky svařování

Během experimentu bylo svařeno celkem devět dvojic korozivzdorné oceli a hliníkové slitiny. Ukázalo se, že příslušná hliníková slitina je v kombinaci s korozivzdornou austenitickou ocelí obtížně svařitelná přesto, že celkem u třech dvojic se podařilo vytvořit svarový spoj. Nicméně všechny svary u této materiálové kombinace byly velmi křehké a měly velmi nízké pevnostní vlastnosti.

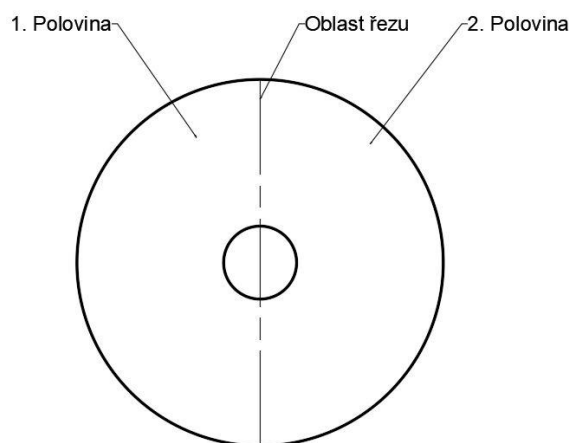
Experiment tedy následně pokračoval vyhodnocením mikrostruktury. Dále zkoumáním plochy svaru a také byla vyhotovena EDS analýza, aby se zjistilo, jaké fáze vznikly na materiálovém rozhraní.



9 Metalografické zkoušky

9.1 Příprava metalografických výbrusů

Svařené vzorky (č. 1, 4, 6) byly odejmuty a s pomocí laboratorní pily Labotom-3 přeříznuty zhruba v polovině (viz. Obr. 41).



Obr. 41 – Dělení difúzně svařeného vzorku

Vzorky bylo zapotřebí upevnit do kovové sponky, aby došlo k lepší fixaci obou materiálů. Dále byly všechny tři vzorky zality za studena do pryskyřice.

Poté následovalo broušení na laboratorní brusce Buehler Phoenix Beta s automatickou hlavou.

Tab. 23 – Parametry broušení pro metalografický výbrus

Operace	Otáčky	Směr otáčení	Oplach	Papír FEPA	Zátěž	Rozložení zátěže	Doba broušení
Broušení 1	300 ot/min	Sousledné	ANO	P180	30 N	Rovnoměrné	60 s
Broušení 2	300 ot/min	Sousledné	ANO	P1200	Broušeno ručně		
Broušení 3	300 ot/min	Sousledné	ANO	P2000	Broušeno ručně		

Vybroušené vzorky byly následně leštěny. Tato operace probíhala na stejném zařízení jako broušení.

Bylo zjištěno, že během chladnutí pryskyřice došlo k prasknutí svaru u vzorků (č. 1, 4) vlivem tepelných roztažností způsobené exotermickou reakcí při vytvrzování pryskyřice. Vznikla tak mezi slitinou hliníku a ocelí štěrbina do které se dostaly zbytky brusných zrn po



broušení. Z toho důvodu bylo zapotřebí použít ultrazvukové čištění, aby se případné nečistoty odstranily z příslušné štěrbině.



Obr. 42 – Ultrazvuková čistička

Tab. 24 – Parametry leštění pro metalografický výbrus

Operace	Otáčky	Směr otáčení	Oplach	Rozložení zátěže	Zátěž	Doba leštění
Leštění 1	150 ot/min	Sousledné	NE	Rovnoměrné	30 N	300 s
Leštění 2	150 ot/min	Sousledné	NE	Rovnoměrné	30 N	270 s
Leštění 3	150 ot/min	Sousledné	NE	Rovnoměrné	30 N	270 s
Leštění 4	150 ot/min	Sousledné	NE	Rovnoměrné	30 N	270 s
Leštění 5	150 ot/min	Sousledné	NE	Rovnoměrné	30 N	270 s

Tab. 25 – Použité leštící prostředky pro jednotlivé operace

Operace	Smáčedlo	Abrazivo (velikost zrna)
Leštění 1	Meta Di Fluid	Diamant monokrystal (1 μm)
Leštění 2	Meta Di Fluid	MASTER PREP (0,05 μm)
Leštění 3	Meta Di Fluid	MASTER PREP (0,05 μm)
Leštění 4	-	Koloidní silica
Leštění 5	-	Koloidní silica



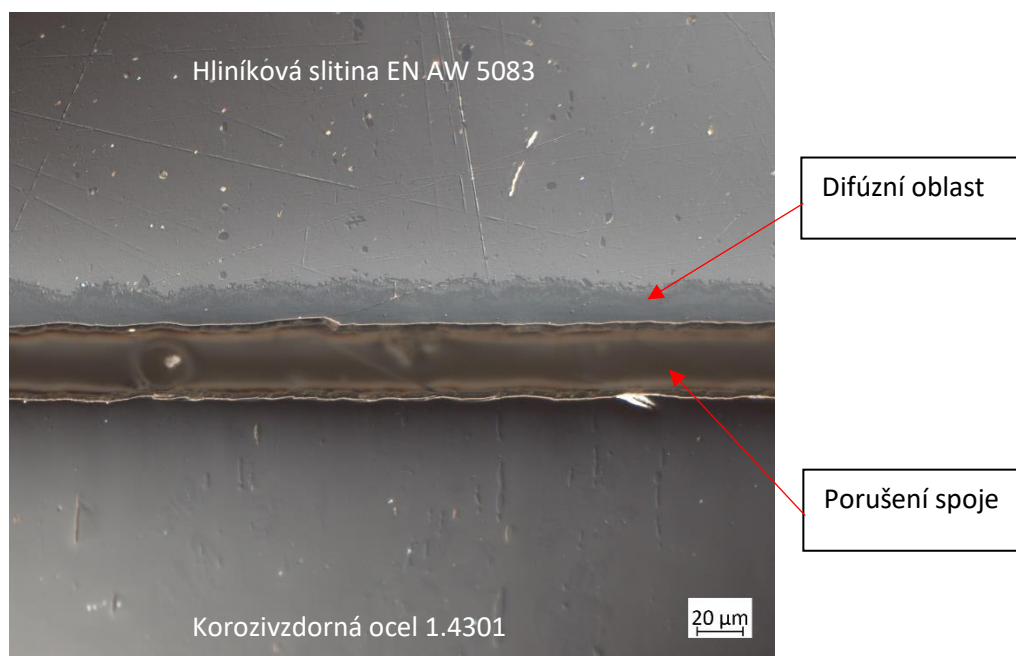
9.2 Analýza na světelném mikroskopu

Příslušné metalografické výbrusy vzorku č. 1, 4, 6 byly zkoumány na světelném mikroskopu značky Zeiss Axio Observer Dm1.

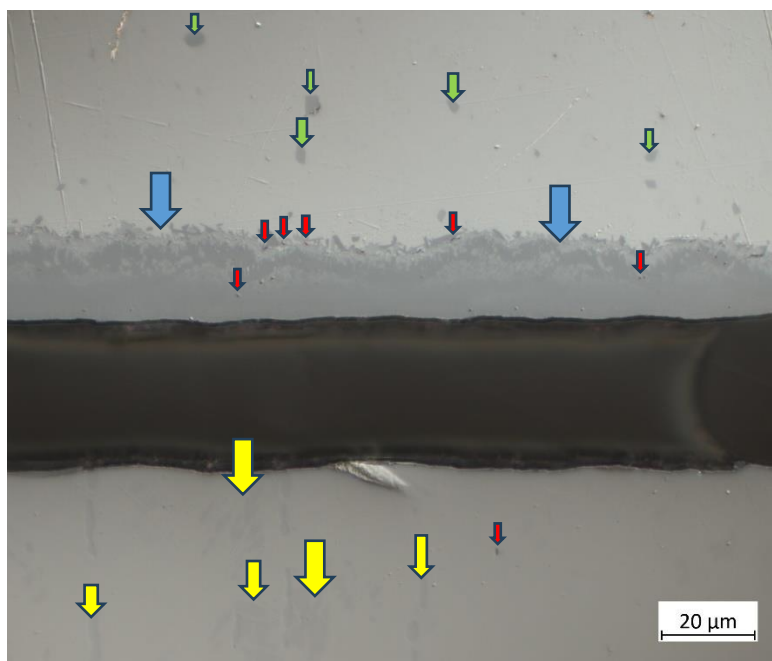


Obr. 43 – Světelný mikroskop Zeiss Axio Observer Dm1 (68)

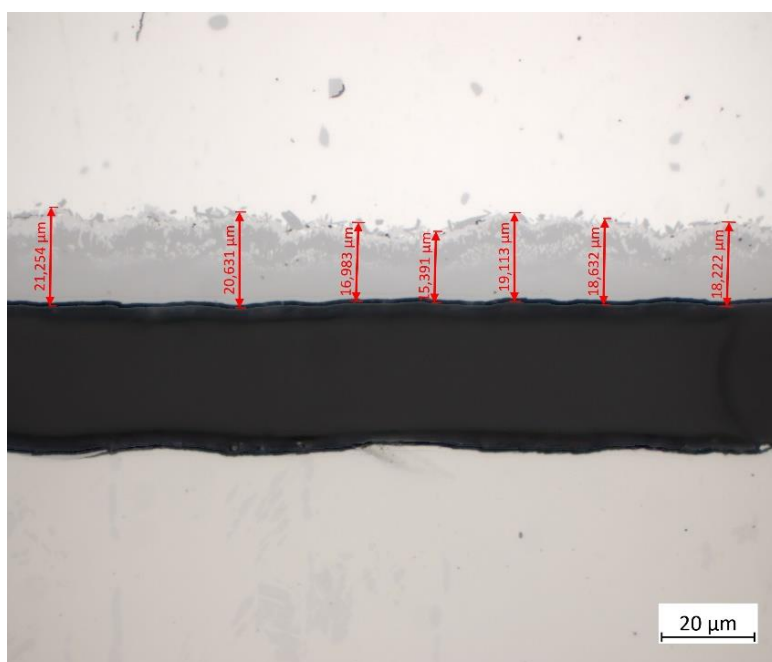
Na vzorku č. 1 nebyly výrazné známky po difúzi. Na následujících vzorcích (č. 4 a 6.) byly pozorovány difúzní pásma. Pro lepší znázornění byly snímky pořízeny za použití diferenciálního interferenčního kontrastu DIC. Na následujících obrázků (viz. Obr. 44 až Obr. 48) je v horní části hliníková slitina EN AW 5083 a ve spodní korozivzdorná ocel 1.4301.



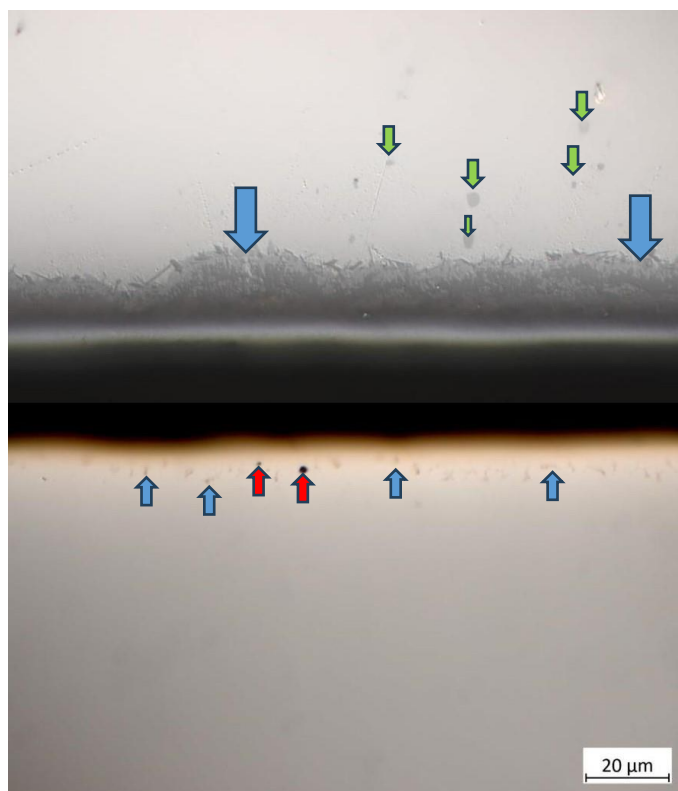
Obr. 44 – Rozhraní spoje u vzorku č. 4, zvětšení 500x, metoda zobrazení: DIC



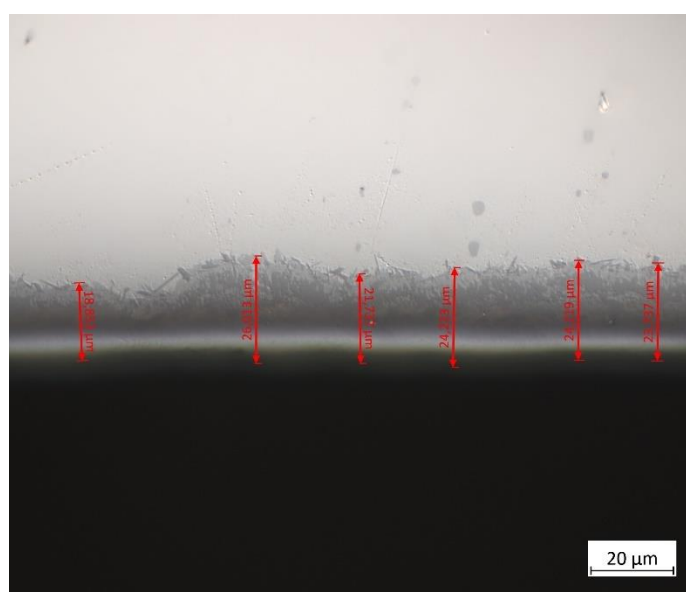
Obr. 45 -Rozhraní spoje u vzorku č. 4, zvětšení 1000x, metoda zobrazení: DIC



Obr. 46 – Rozhraní spoje u vzorku č. 4, měření šířky difúzního pásma



Obr. 47 - Rozhraní spoje u vzorku č. 6, zvětšení 1000X, metoda zobrazení: DIC



Obr. 48 - Rozhraní spoje u vzorku č. 6, měření šířky difúzního pásma

Bylo zjištěno, že na obou vzorcích se nacházejí stopy po difúzi (Obr. 45 a Obr. 47). Pozorovatelný je zde Kirkendallův jev, který se projevil ve formě posunutí difúzního rozhraní směrem k hliníkové slitině EN AW 5083. Z toho vyplývá, že atomy hliníku difundovaly rychleji než atomy oceli. Vytvořily se intermetalické fáze (modré šipky), které se nacházejí v difúzním rozhraní a také segregáty (zelené šipky) v matici slitiny hliníku.



Z předešlých výzkumných prací a vědeckých článků vyplývá, že příslušné intermetalické fáze jsou nejspíše na bázi Al-Fe. Přesnější složení těchto intermetalik a segregáčních částic bude určeno na základě analýzy na elektronovém mikroskopu. (4) (69) (70)

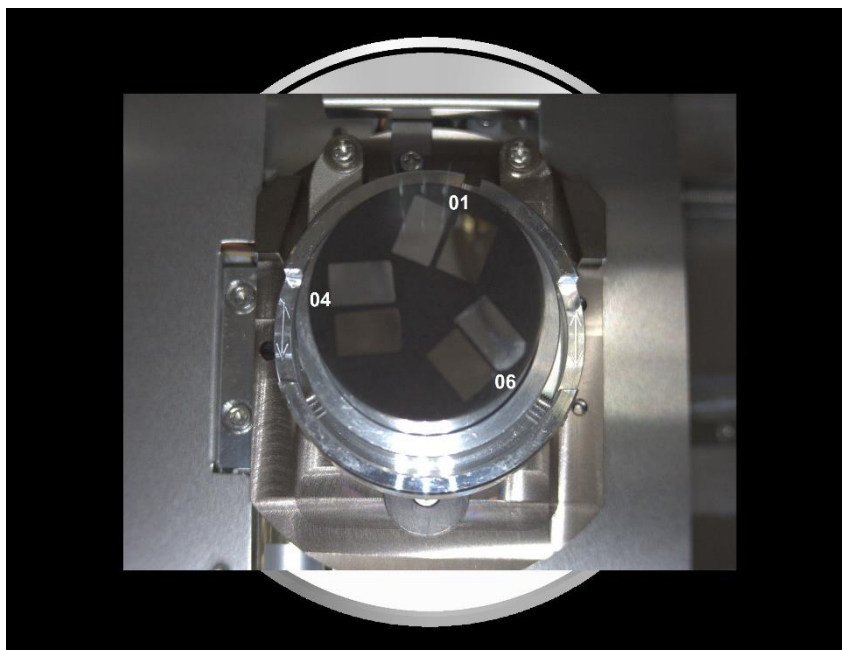
Výskyty pórů (červené šipky) v oblasti difúzního pásma jsou způsobena rozdílnou difuzivitou atomů hliníku a oceli. Tyto póry vzniklé v důsledku difúze se nazývají kirkendallovými značkami. (5) (69)

Stejně jako při svařování Al slitiny EN AW 6082 (4) se i zde v matici korozivzdorné oceli vyskytly tmavé pásy (žluté šipky). Jedná se o nově vytvořené fáze jiného původu než austenitického. Mohly vzniknout z důvodu ohřevu či chlazení při svařování, nebo příčinou vzniku těchto fází může být změna chemického složení při difúzních procesech. (4) (71)

U vzorku č. 4 průměrná šířka difúzního pásma byla 18,60 μm (Obr. 46), zatímco u vzorku č. 6 činila 23,13 μm (Obr. 48).

9.3 EDS analýza

Na všech třech vzorcích byla provedena EDS analýza, která byla realizována ve spolupráci se společností Škoda Auto a. s. na zařízení JEOL JSM-IT510. Jak již bylo zmíněno, tak tato analýza poskytuje informace o chemickém složení.



Obr. 49 – Metalografické výbrusy vložené do komory elektronového mikroskopu s číselným označením vzorků

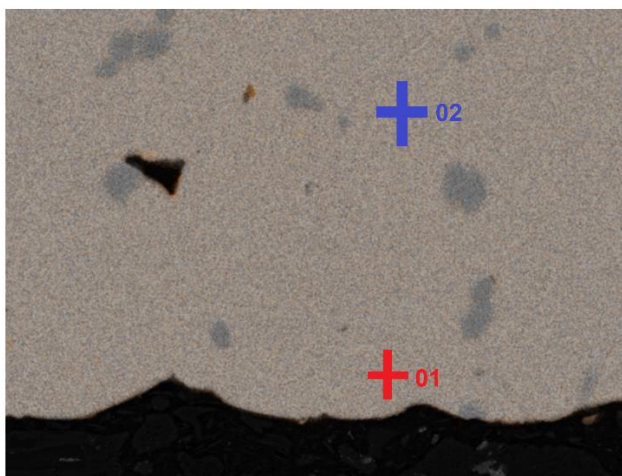
Byly vyhotoveny EDS mapy pro přibližnou orientaci výskytu daných prvků.

Každý vzorek byl zkoumán nejprve v místech poblíž difúzního spoje a poté dále v základním materiálu. Tento postup výzkumu proběhl stejným způsobem u hliníkové slitiny a u korozivzdorné oceli.

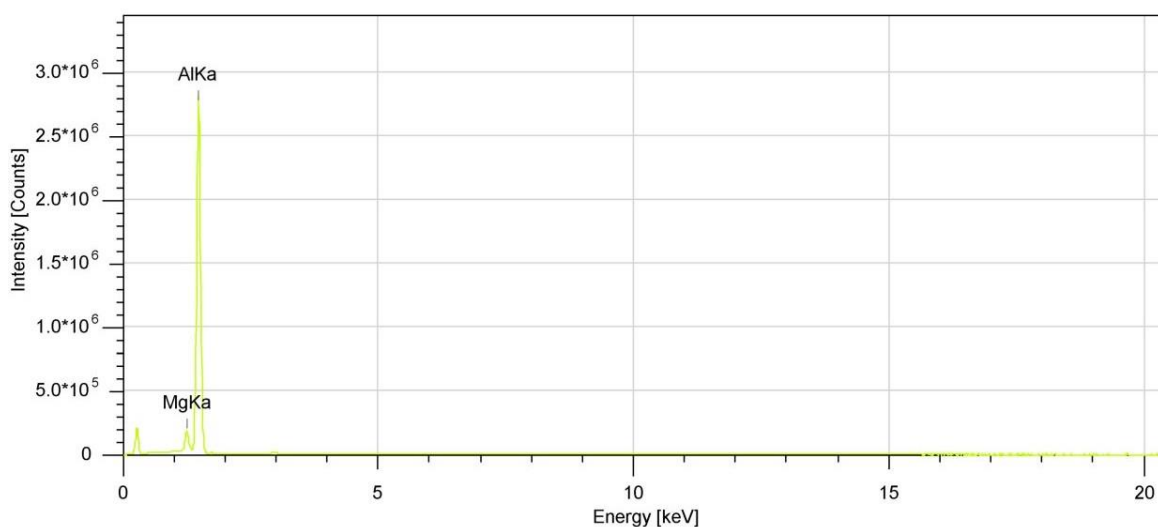


9.3.1 Hliníková slitina

Postupně byly pozorovány všechny 3 vzorky. A to jak ze strany Al slitiny, tak i ze strany oceli. Jako první byl zkoumán hliníkový vzorek č.1.



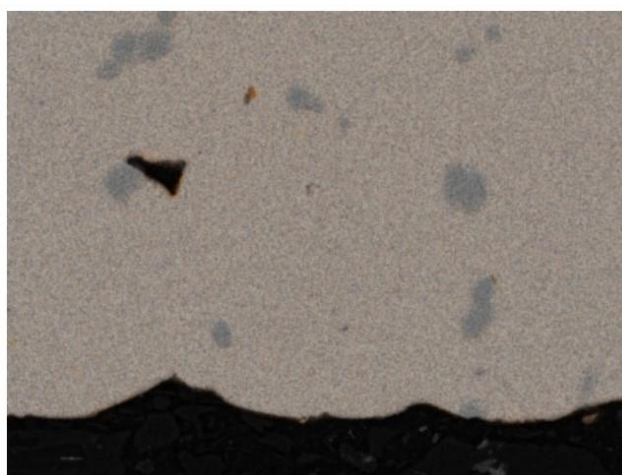
Obr. 50 - Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu hliníkového vzorku č. 1



Obr. 51 - Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 1 – část Al

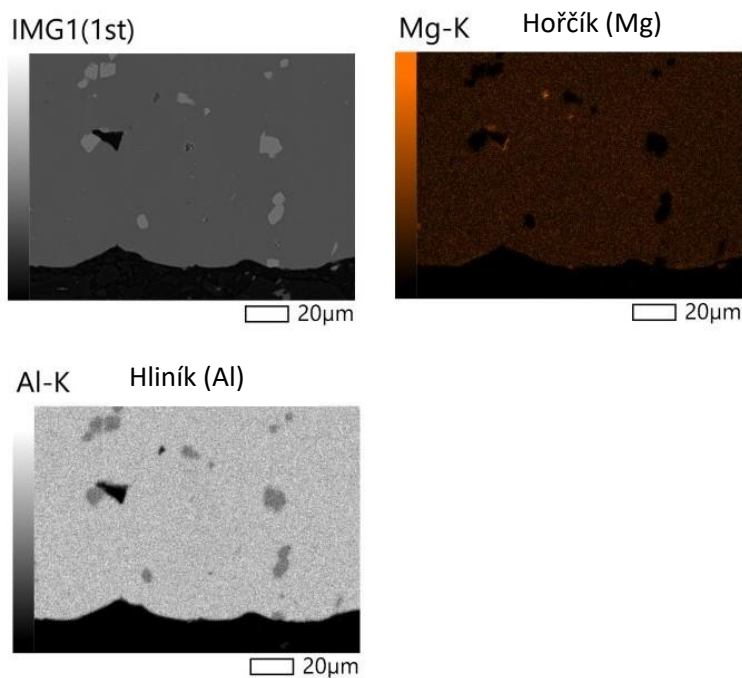
Tab. 26 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 1 – část Al [hmot. %]

Název prvku	Al	Mg
01	95,45	4,55
02	95,59	4,41



■ Mg-K Al-K

Obr. 52 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 1 (snímek 1)



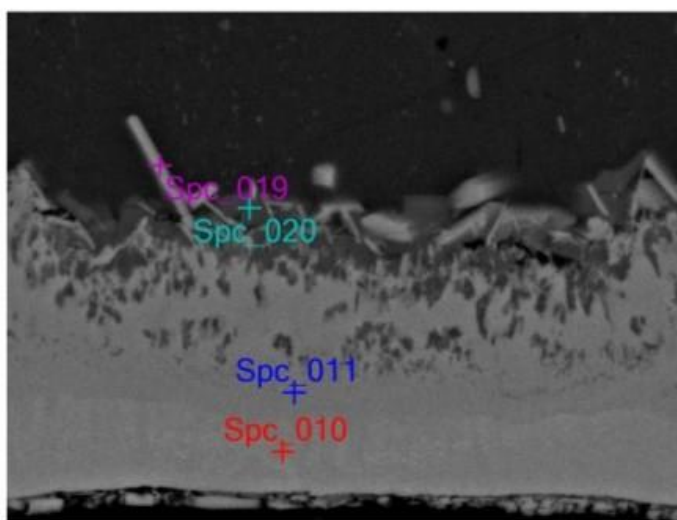
Obr. 53 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 1 (snímek 2)

Na hliníkovém vzorku č. 1 se nenacházely žádné intermetalické fáze. Z Obr. 50 lze zpozorovat pouze částice precipitátu a póry. Výskyt prvků na EDS mapě (Obr. 52 a Obr. 53) a údaje z Tab. 26 odpovídají složení základního materiálu, neboť obsah hořčíku (Mg) se zhruba shoduje s údaji na chemickém složení hliníkové slitiny EN AW 5083 (Tab. 10).

U vzorku č. 4 bylo analyzováno na různých místech chemické složení. Na základě četnosti jednotlivých prvků byl vyhodnocen konkrétní typ fází.



Sem_BED-S_004

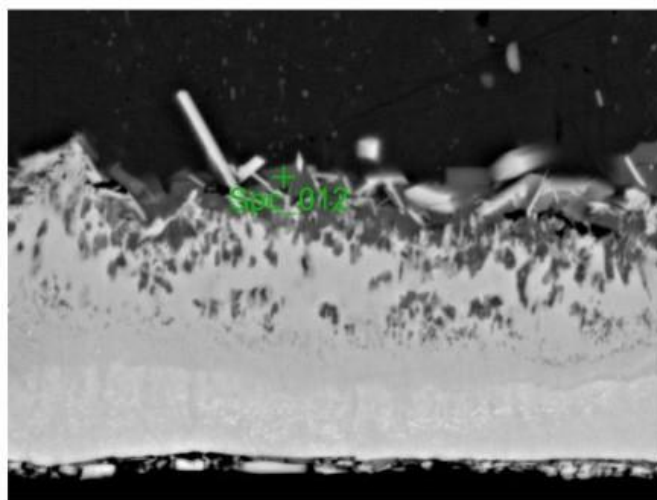


Signal BED-S
Landing Voltage 15.0 kV
WD 9.8 mm
Magnification x3,500
Vacuum Mode HighVacuum

5 μm

Obr. 54 – Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu hliníkového vzorku č. 4 (snímek 1)

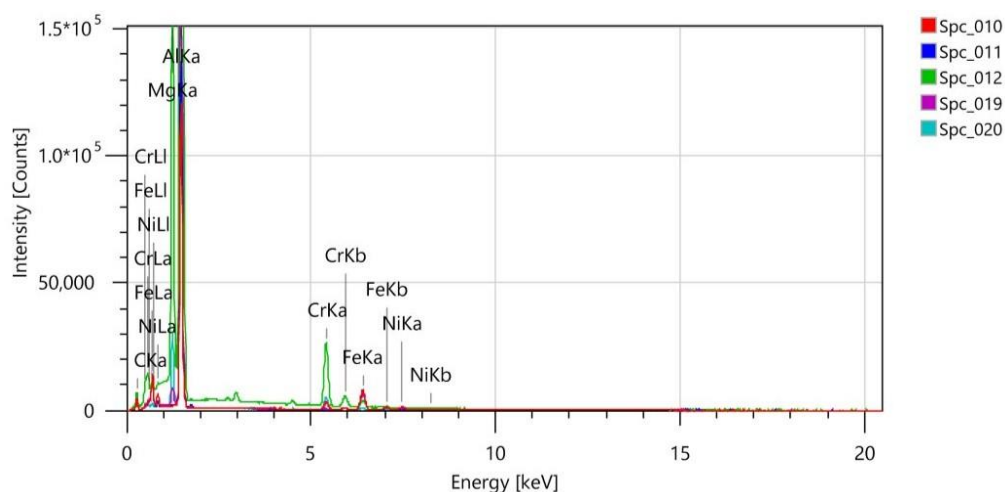
Sem_BED-S_002



Signal BED-S
Landing Voltage 15.0 kV
WD 9.9 mm
Magnification x3,500
Vacuum Mode HighVacuum

5 μm

Obr. 55 – Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu hliníkového vzorku č. 4 (snímek 2)



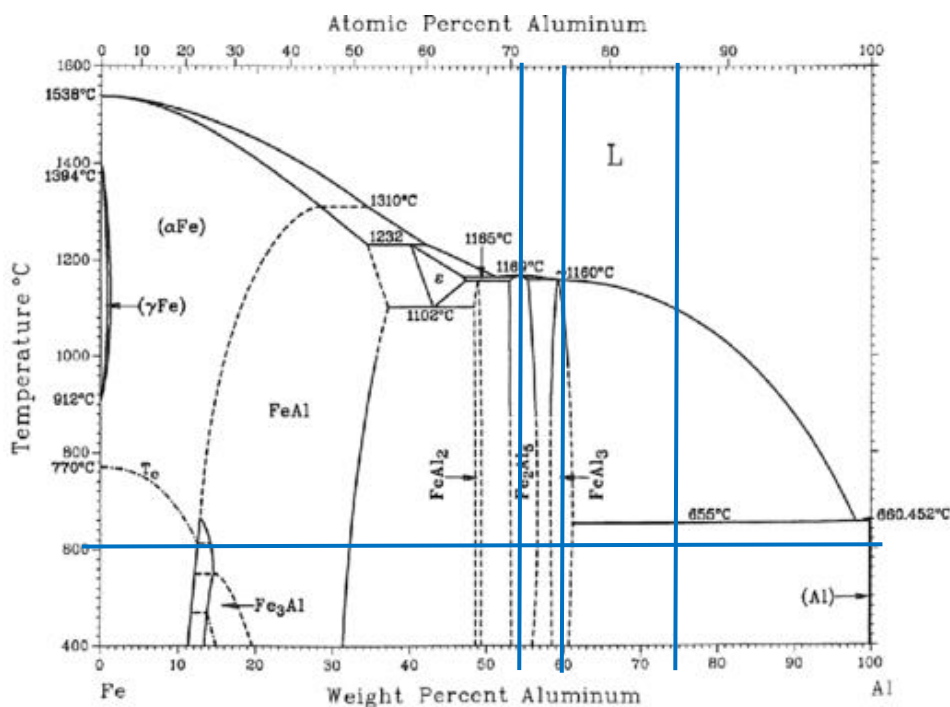
Obr. 56 –Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 4 – část Al

V místě označeném jako **Spc_010** vznikaly intermetalické fáze FeAl, neboť zde byl hliník (Al) zastoupen v množství 55,43 % a železo (Fe) 30,37 %. Z chemického složení a z Obr. 59 a Obr. 57 lze předpokládat výskyt Al_3Ni a Fe_2Al_5 . V oblasti **Spc_011** vzniká fáze $FeAl_3$. Dále se zde nacházejí jiné intermetalika, neboť to vyplývá z chemického složení v dané oblasti (Tab. 27) a z Obr. 58 a Obr. 59. Může tedy jít o fáze Al_7Cr a Al_3Ni . V oblasti **Spc_012** se vyloučily intermetalické fáze Al_7Cr a Al_3Mg_2 . V jehlicovitém útvaru poblíž **Spc_019** se vyskytují intermetalické fáze $FeAl_3$. **Spc_020** byly pozorovány intermetalické fáze na bázi Al-Cr a Al-Mg. Z Obr. 58 a Obr. 60 je patrné, že se může pravděpodobně jednat o Al_7Cr a Al_3Mg_2 .

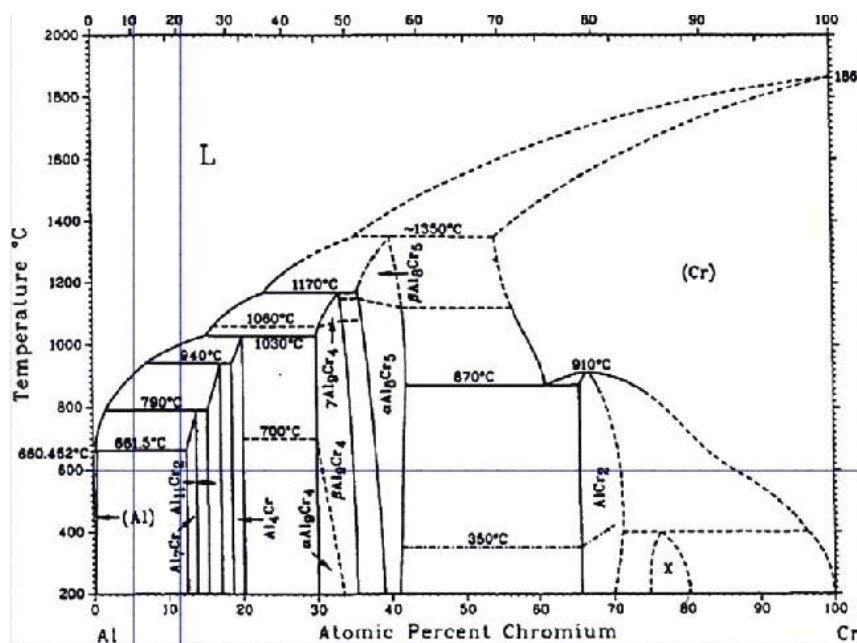
Tab. 27 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 4 – část Al [hmot. %]

Název prvku	Mg	Al	Cr	Fe	Ni
Spc_010		55,43	6,73	30,37	7,47
Spc_011		60,63	6,53	29,39	3,47
Spc_012	9,49	77,08	11,62	1,64	0,17
Spc_019	2,46	72,54	0,67	22,2	2,11
Spc_020	9,57	75,53	12,29	2,61	

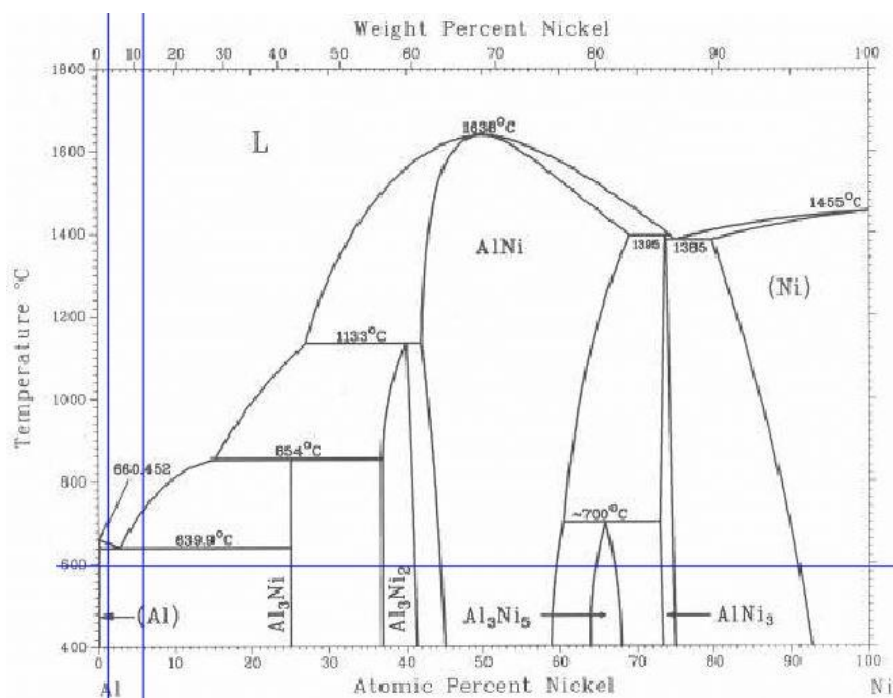
To, které konkrétní intermetalické fáze se vyloučily, bylo stanoveno na základě fázového diagramu Fe-Al. Nicméně významnou roli mohou hrát i další legující prvky, jak ukazují rovnovážné diagramy na Obr. 57-69.



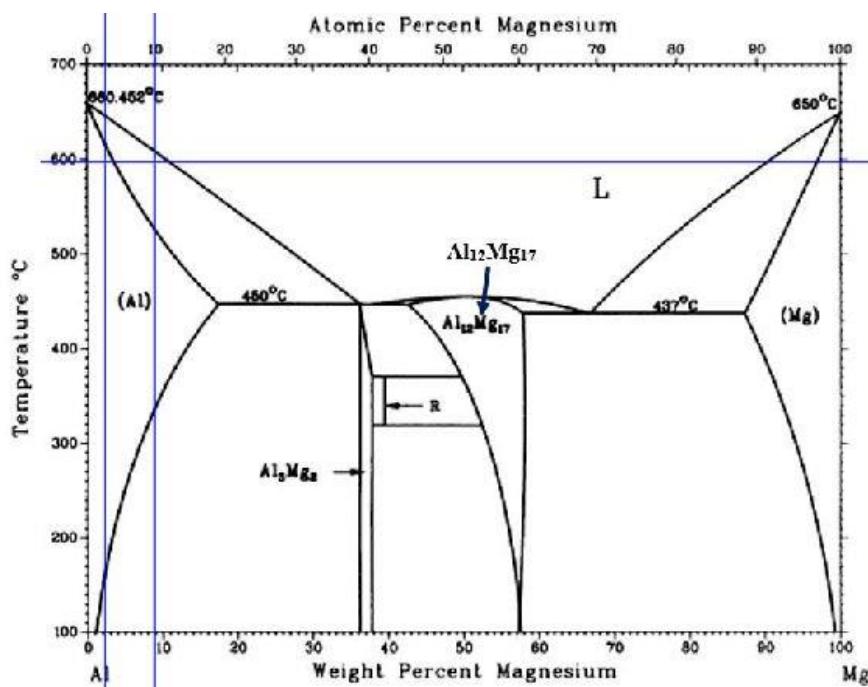
Obr. 57 – Rovnovážný diagram Fe-Al s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 4



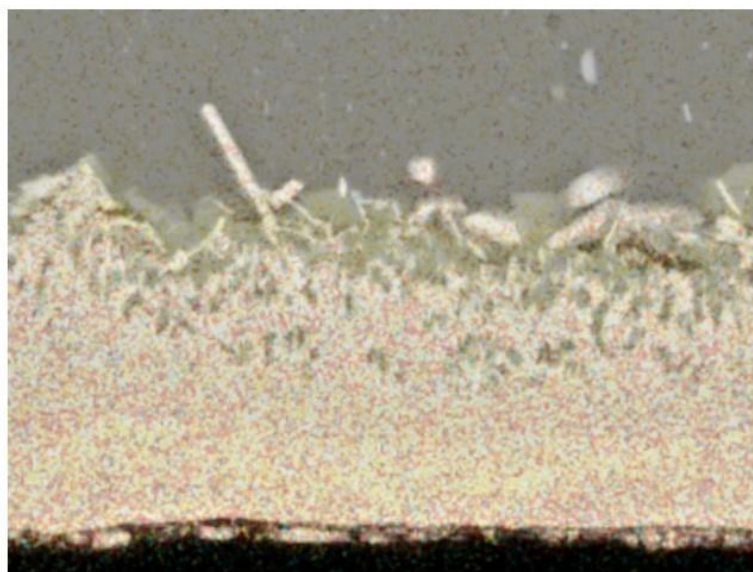
Obr. 58 - Rovnovážný diagram Al-Cr s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 4



Obr. 59 - Rovnovážný diagram Al-Ni s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 4



Obr. 60 - Rovnovážný diagram Al-Mg s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 4

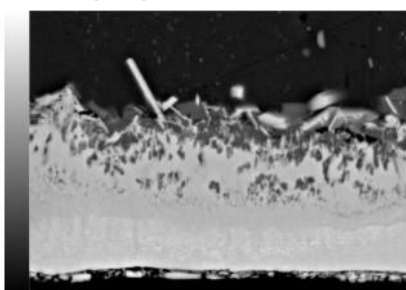


■ Mg-K ■ Al-K ■ Cr-K ■ Mn-K ■ Fe-K ■ Ni-K

Obr. 61 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 4 (snímek 1)

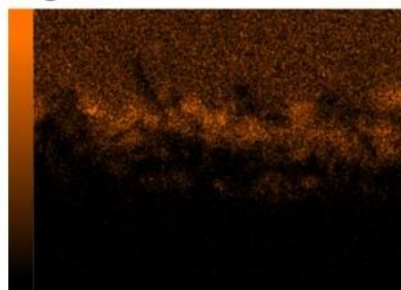
Na EDS mapě byly zpozorovány drobné částice, které se nacházejí v blízkosti difúzního rozhraní, které obsahovaly mangan (Mn).

IMG1(1st)



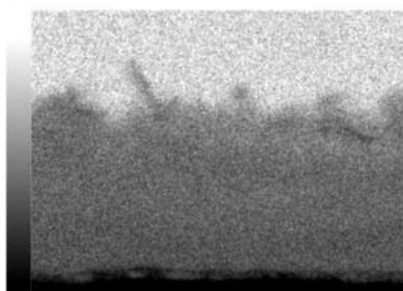
□ 5μm

Mg-K Hořčík (Mg)



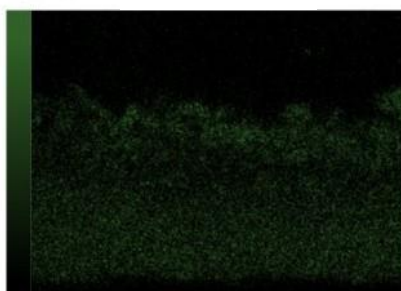
□ 5μm

Al-K Hliník (Al)



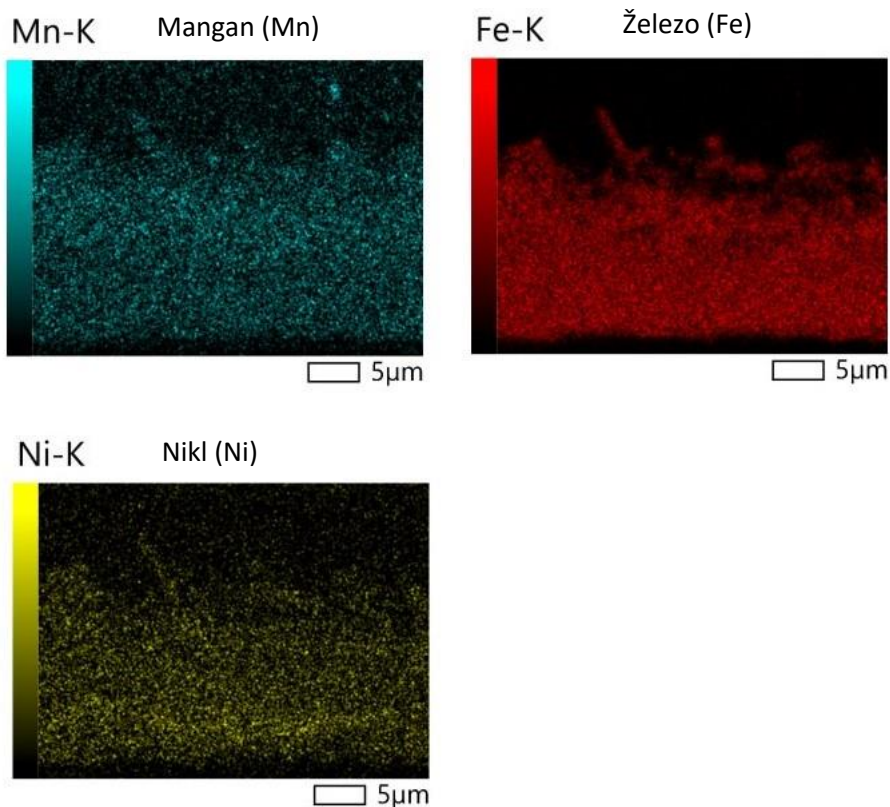
□ 5μm

Cr-K Chrom (Cr)



□ 5μm

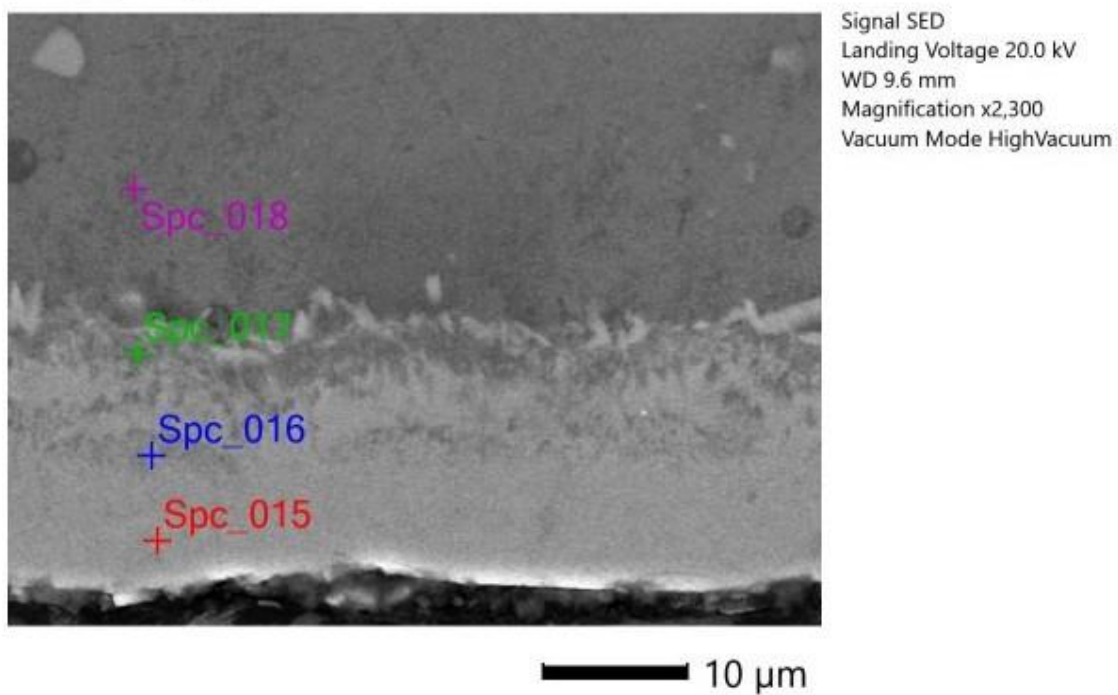
Obr. 62 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 4 (snímek 2)



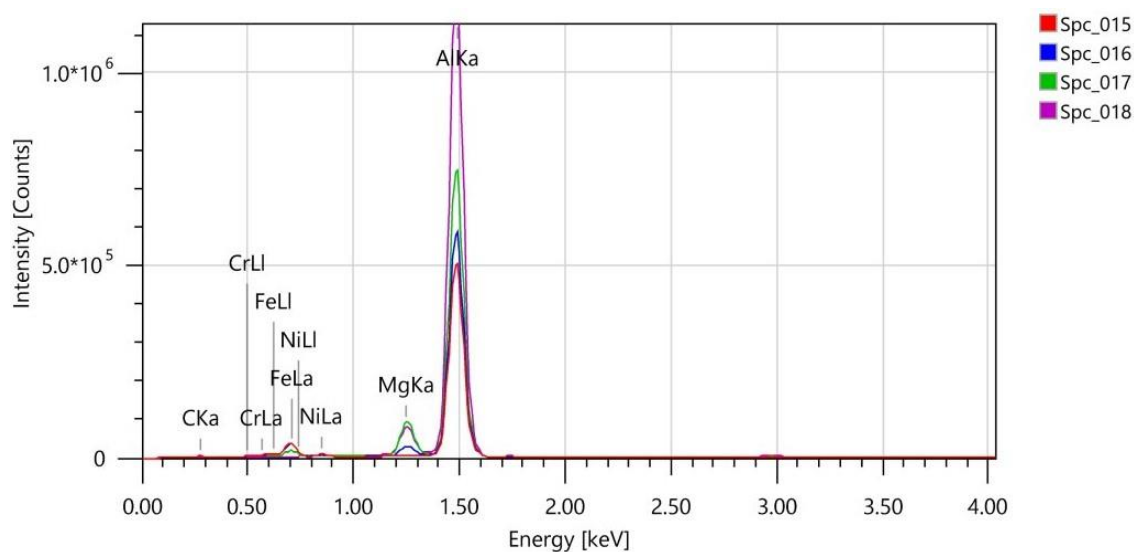
Obr. 63 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 4 (snímek 3)

U vzorku č. 6 bylo postupováno stejným způsobem jako u předchozího vzorku, kdy na jednotlivých místech byl vyhodnocen výskyt jednotlivých prvků.

Sem_SED_008



Obr. 64 - Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu hliníkového vzorku č. 6

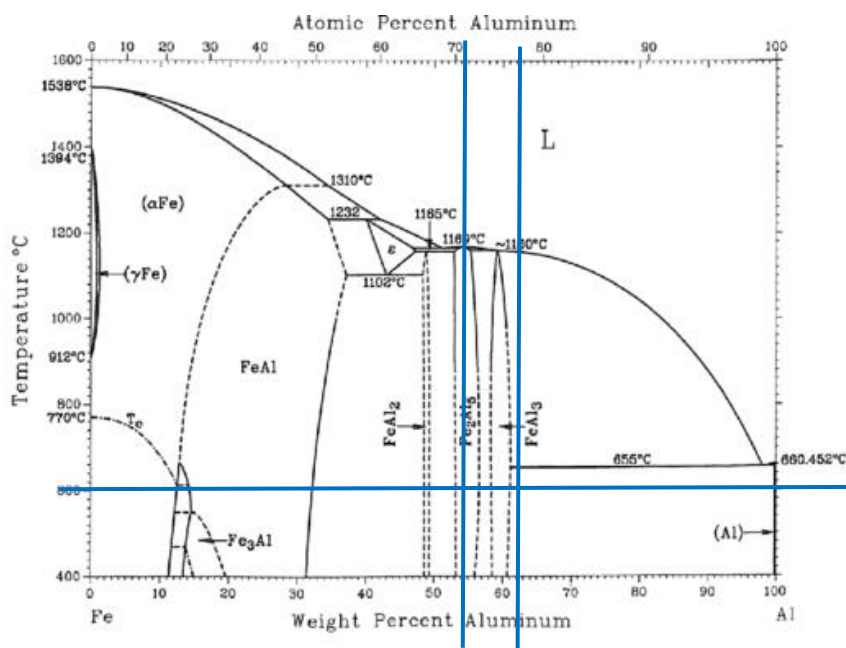


Obr. 65 - Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 6 – část Al

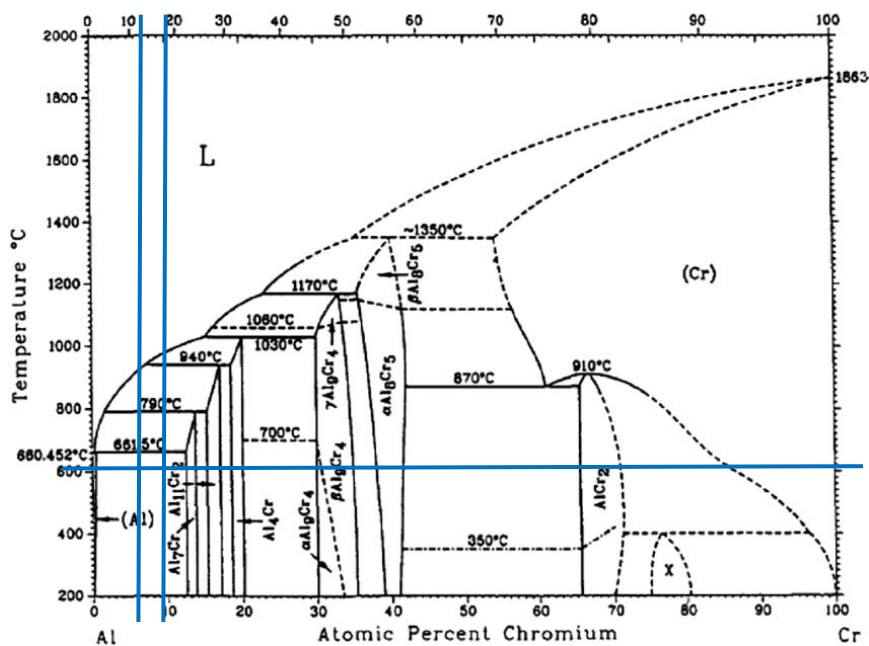
V místě **Spc_015** vznikaly intermetalika Fe_2Al_5 , Al_7Cr a ve velmi malém množství Al_3Ni . V oblasti **Spc_016** byly zpozorovány intermetalické fáze FeAl_3 , Al_7Cr , Al_3Mg_2 . V **Spc_017** vznikaly sloučeniny na bázi Al-Cr a Al-Mg. Z Obr. 67 a Obr. 69 lze odhadnout, že bude jednat o Al_7Cr a Al_3Mg_2 . V místě **Spc_018** a dál se vyskytuje základní materiál, neboť se zde nachází v drtivé míře hliník (Al) se 4,63 % hořčíku (Mg).

Tab. 28 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 6 – část Al [hmot. %]

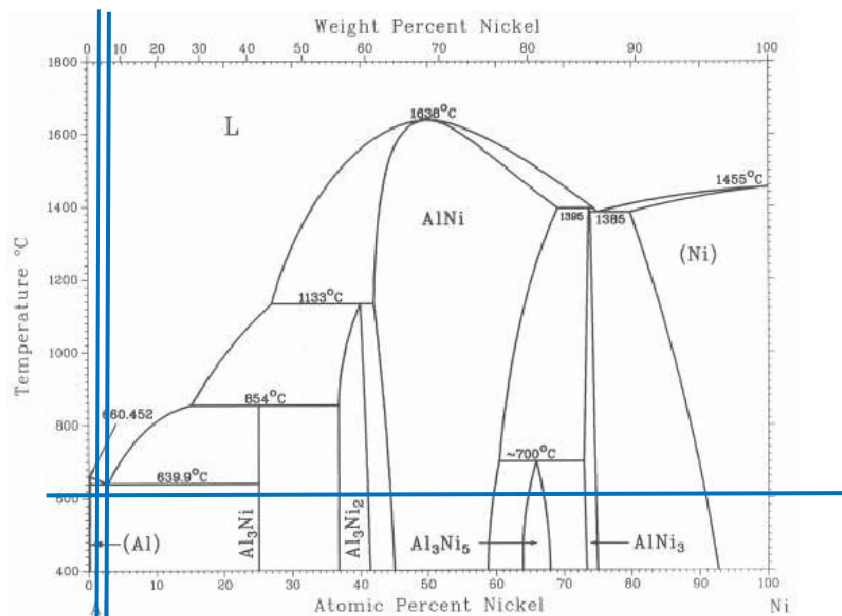
Název prvku	Mg	Al	Cr	Fe	Ni
Spc_015		56,04	8,62	31,65	3,69
Spc_016	2,68	62,74	6,39	25,51	2,68
Spc_017	7,75	71,99	9,94	9,29	1,03
Spc_018	4,63	94,98	0,2	0,9	



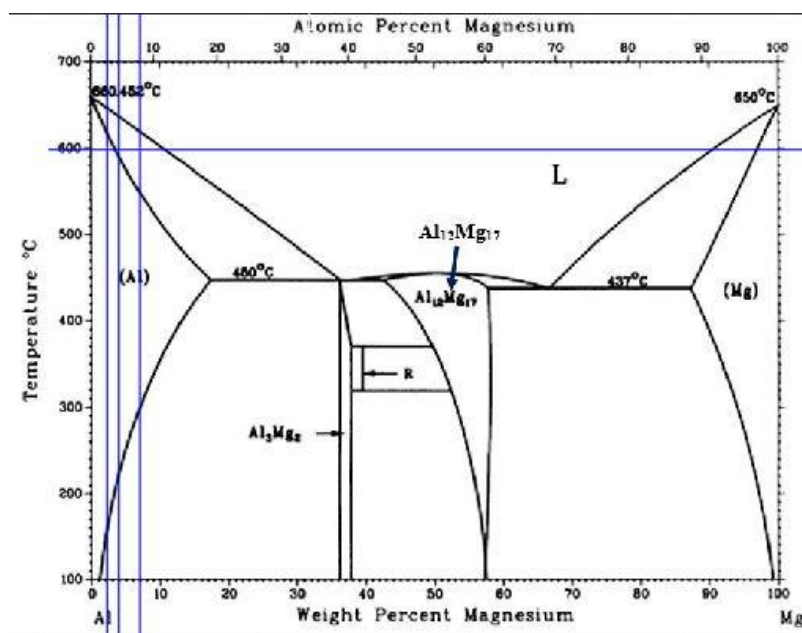
Obr. 66 - Rovnovážný diagram Fe-Al s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 6



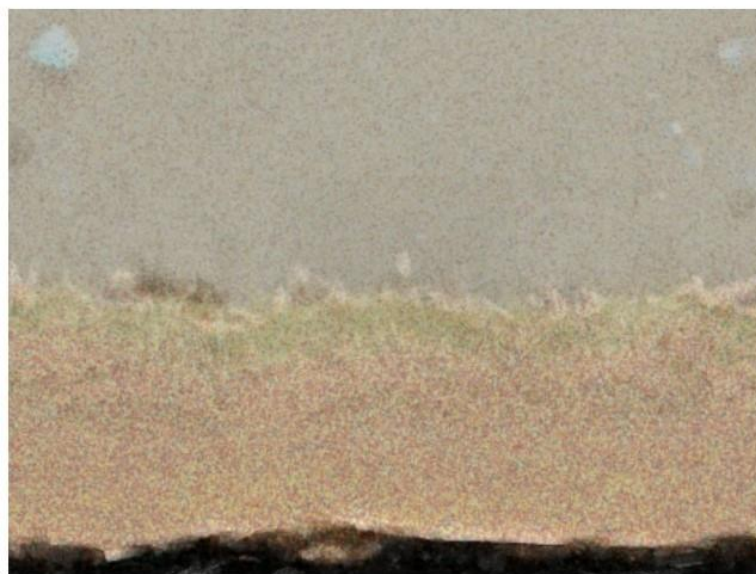
Obr. 67 - Rovnovážný diagram Al-Cr s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 6



Obr. 68 - Rovnovážný diagram Al-Ni s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 6



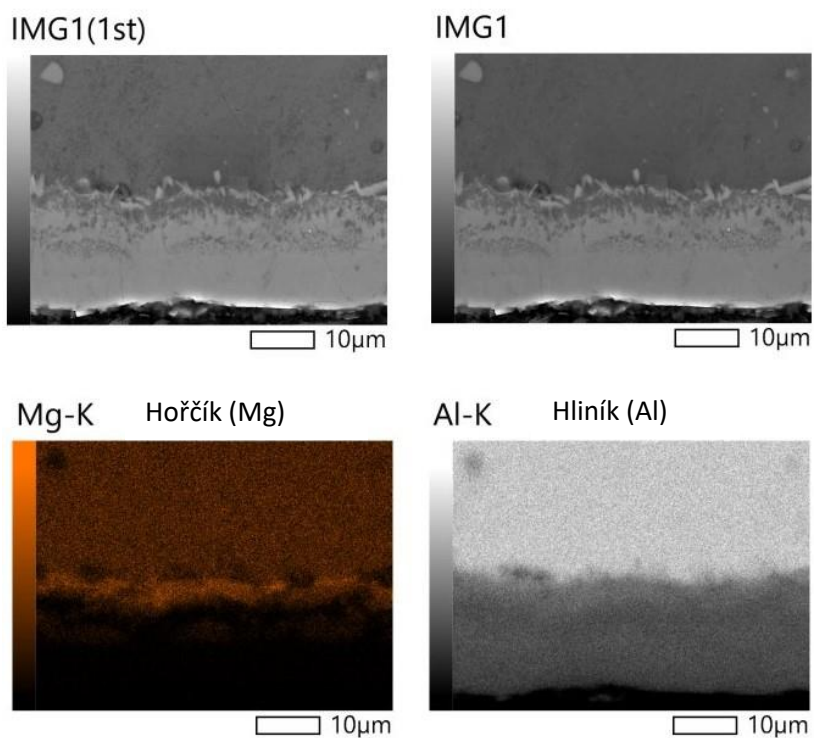
Obr. 69 - Rovnovážný diagram Al-Mg s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 6



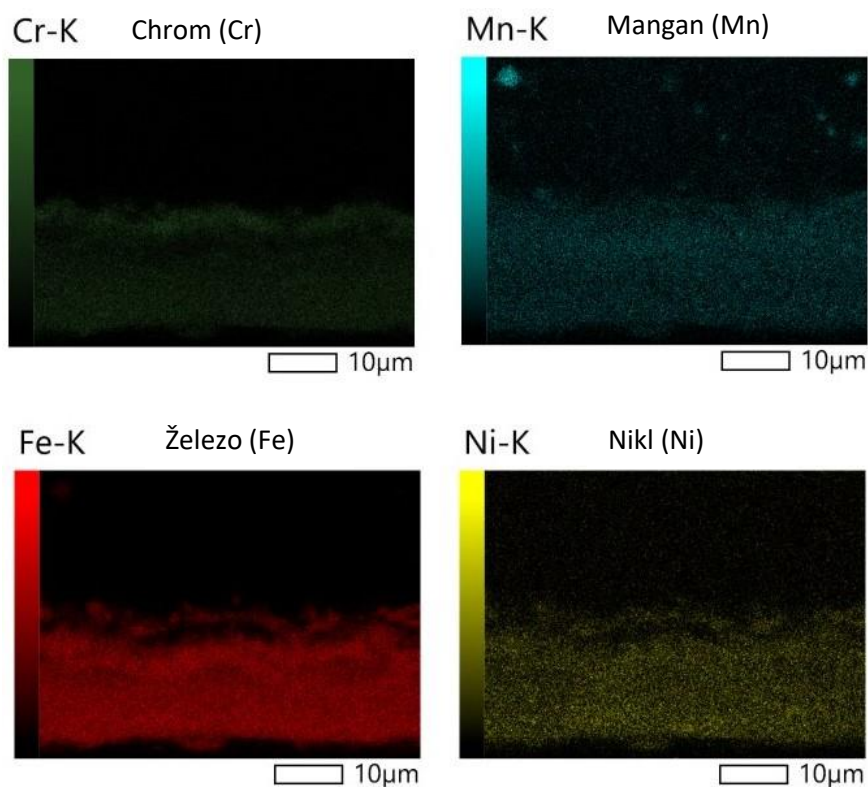
■ Mg-K ■ Al-K ■ Cr-K ■ Mn-K ■ Fe-K ■ Ni-K

Obr. 70 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 6 (snímek 1)

Stejně jako u vzorku č. 4, tak i zde se vyskytovaly částice bohaté na mangan (Mn).



Obr. 71 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 6 (snímek 2)



Obr. 72 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 6 (snímek 3)

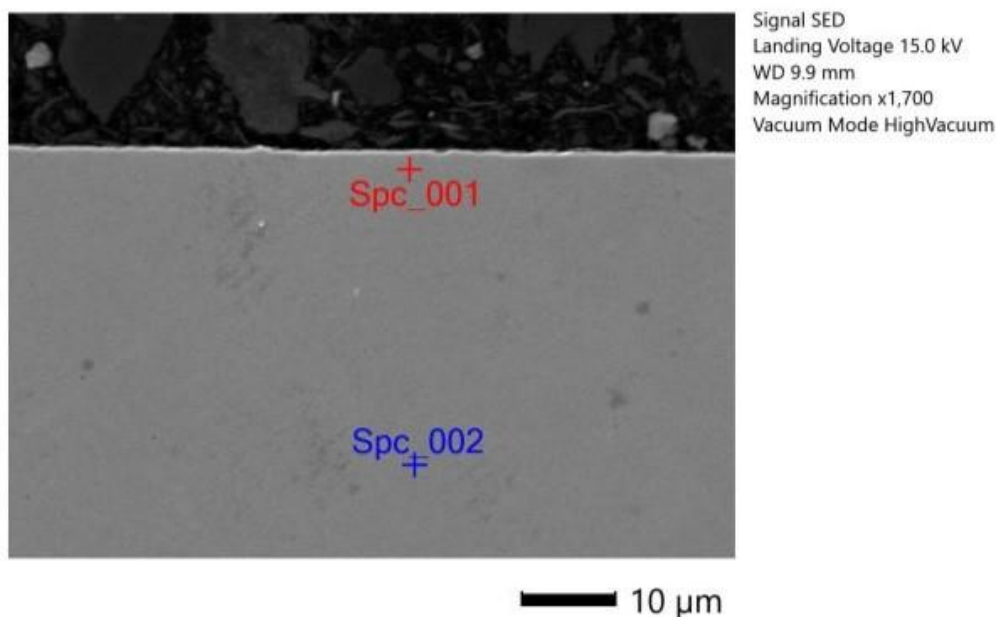
Z Tab. 27 a Tab. 28 je možné si všimnout výskytu uhlíku v hliníkové slitině. S největší pravděpodobností se jedná o chybu při analýze, poněvadž se uhlík ve slitině hliníku nevyskytuje vůbec. V případě austenitické korozivzdorné oceli se zde uhlík nachází v menším množství (0,07 %). Z porovnání s hodnotami z příslušných dvou tabulek vyplývá, že se uhlík nemohl v tomto množství v hliníkové slitině vyskytovat ani z důvodu difúzních procesů. Z toho lze usoudit, že se jedná o chybný údaj v analýze.

9.3.2 Korozivzdorná ocel

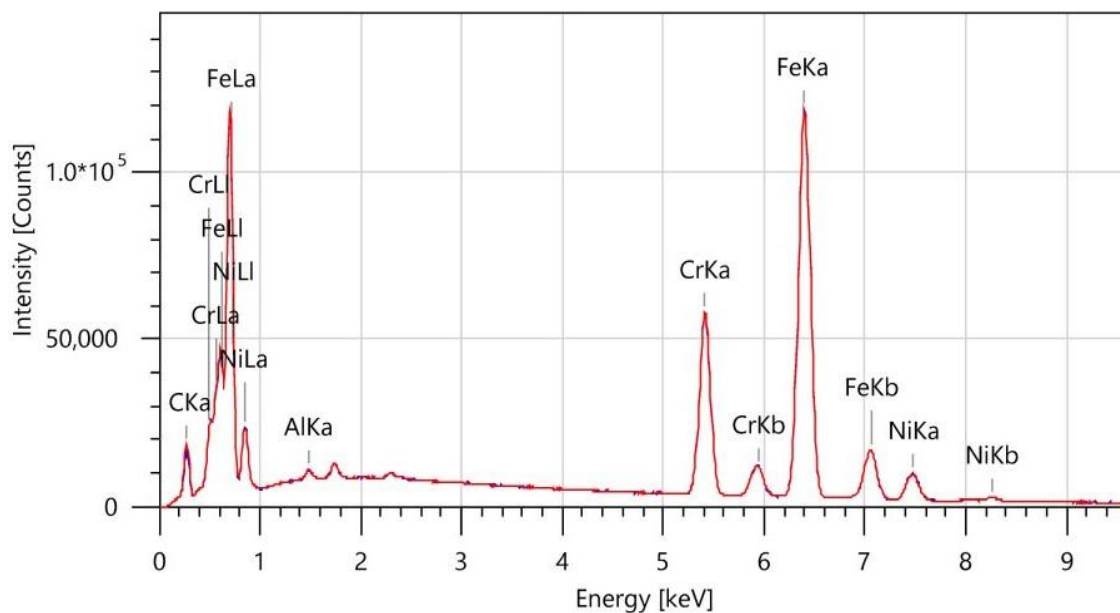
U ocelového vzorku č. 1 byla bodová EDS analýza provedena pouze na dvou místech, a to v blízkosti svaru, a v oblasti základního materiálu. Nicméně na obou místech se neprojeví výrazné změny v chemickém složení.



Sem_SED_001



Obr. 73 - Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu ocelového vzorku č. 1

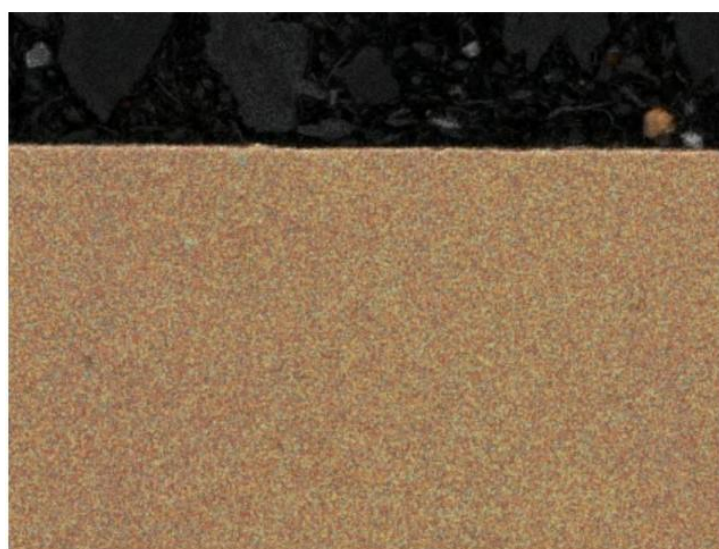


Obr. 74 - Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 1 – část ocel

Zde nejsou zpozorovány prudké výchylky chemické kompozice. V oceli se nevyskytují žádné částice a vměšky, které by danou analýzu ovlivnily.

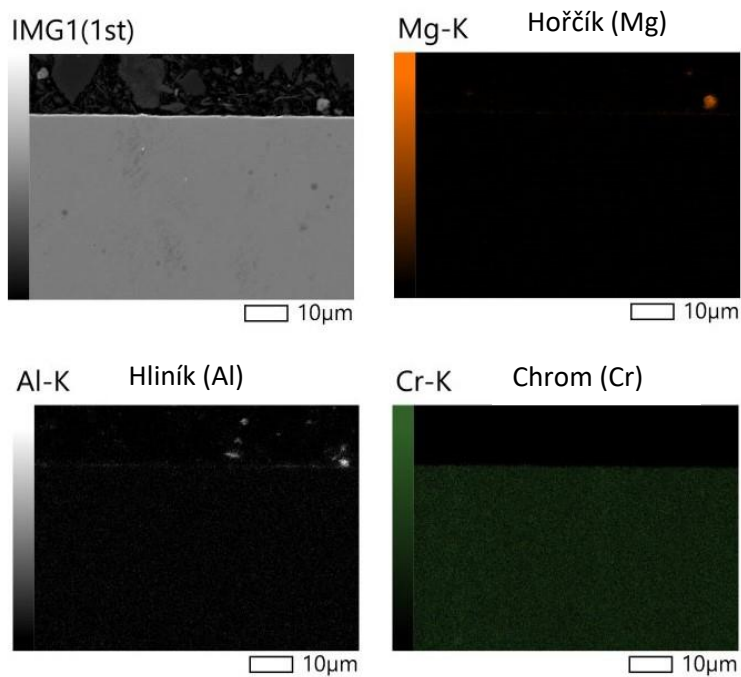
Tab. 29 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 1 – část ocel [hmot. %]

Název prvku	Al	Cr	Fe	Ni
Spc_001	0,26	19,18	72,28	8,29
Spc_002	0,25	18,96	72,17	8,63

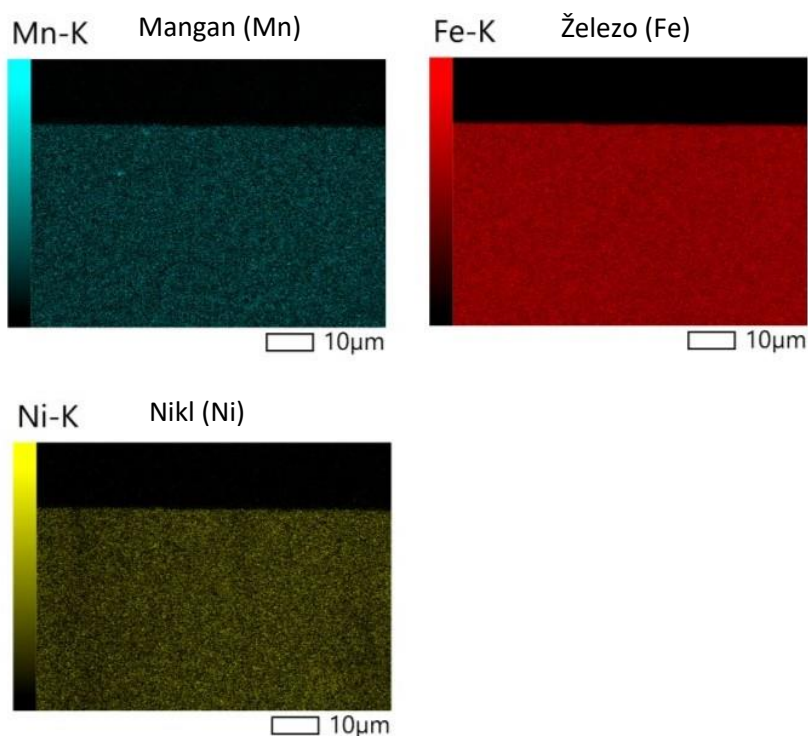


■ Mg-K ■ Al-K ■ Cr-K ■ Mn-K ■ Fe-K ■ Ni-K

Obr. 75 – EDS mapa ocelového vzorku č. 1 (snímek 1)



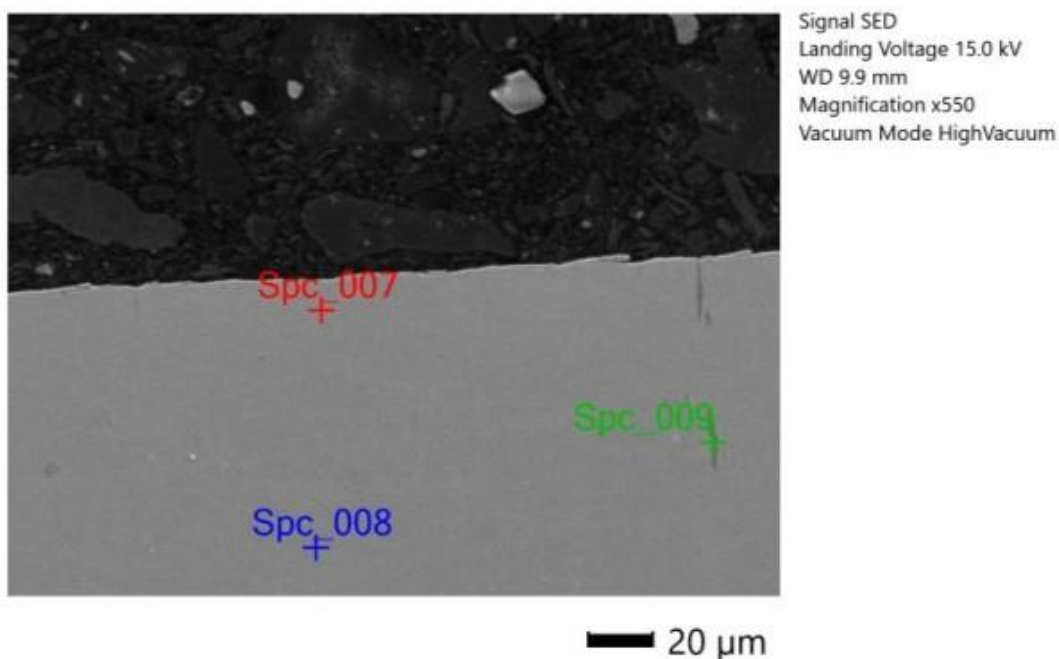
Obr. 76 - EDS mapa ocelového vzorku č. 1 (snímek 2)



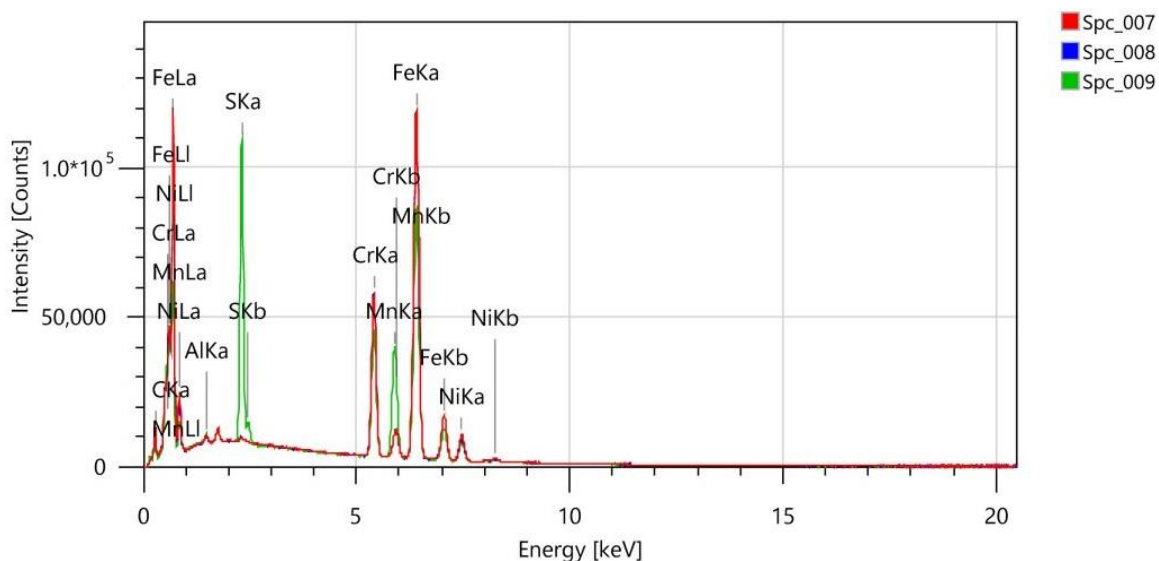
Obr. 77 - EDS mapa ocelového vzorku č. 1 (snímek 3)

V případě vzorku č. 4 měření proběhlo na třech místech. Zajímavá byla oblast **Spc_009**, kde oproti místům **Spc_007** a **Spc_008** vykazoval výskyt precipitátu na bázi manganu (Mn). Tento prvek má tendenci se vázat na síru (S). Nejspíše se jedná o takzvaný sulfid manganu (MnS). (72)

Sem_SED_004



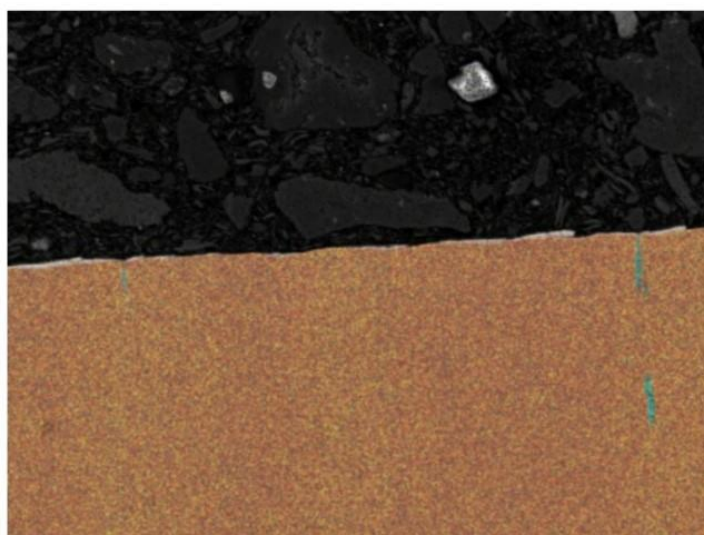
Obr. 78 - Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu ocelového vzorku č. 4



Obr. 79 - Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 4 – část ocel

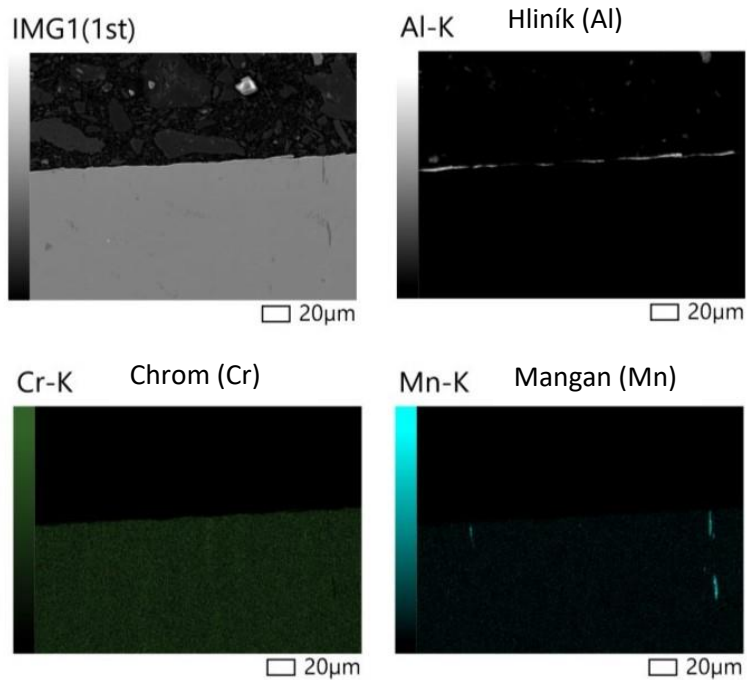
Tab. 30 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 4 – část ocel [hmot. %]

Název prvku	Al	Cr	Fe	Ni
Spc_007	0,23	18,69	71,89	9,18
Spc_008	0,23	19,15	72,72	7,9
Spc_009	0,33	21,12	69,6	8,94

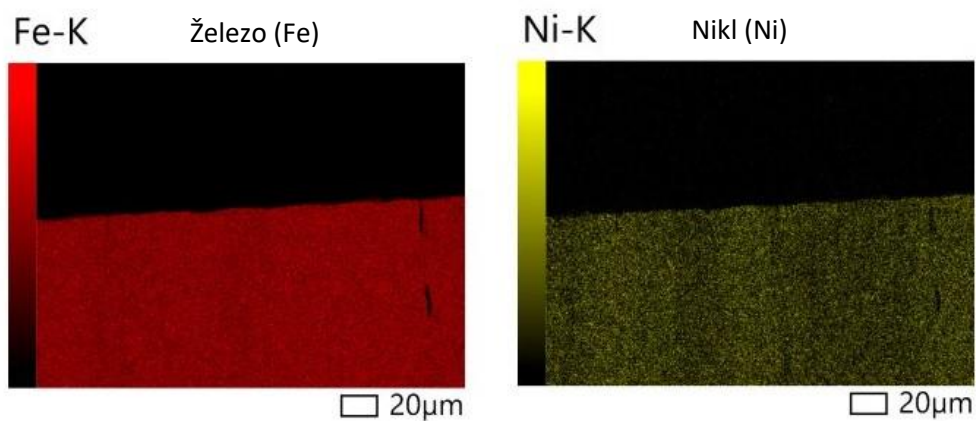


Al-K Cr-K Mn-K Fe-K Ni-K

Obr. 80 - EDS mapa ocelového vzorku č. 4 (snímek 1)



Obr. 81 - EDS mapa ocelového vzorku č. 4 (snímek 2)

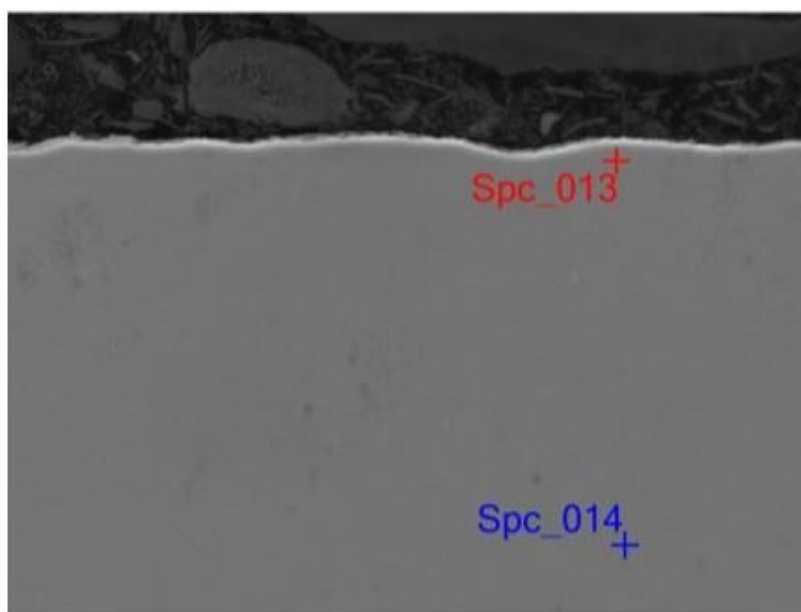


Obr. 82 - EDS mapa ocelového vzorku č. 4 (snímek 3)

Ocelový vzorek č. 6 nevykazoval vznik žádných částic či vměstků.



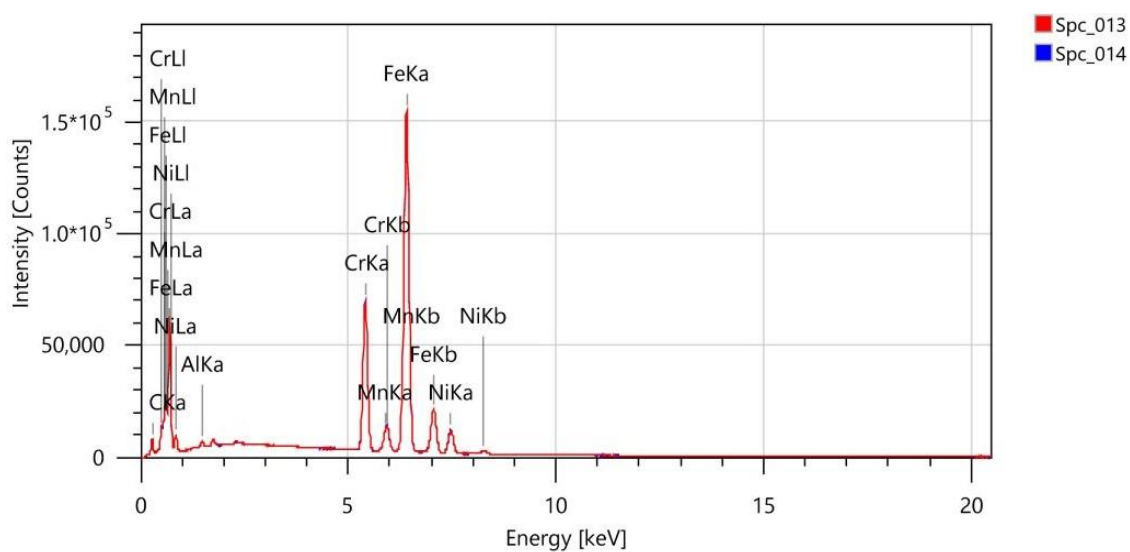
Sem_SED_006



Signal SED
Landing Voltage 20.0 kV
WD 9.5 mm
Magnification x1,700
Vacuum Mode HighVacuum

10 μm

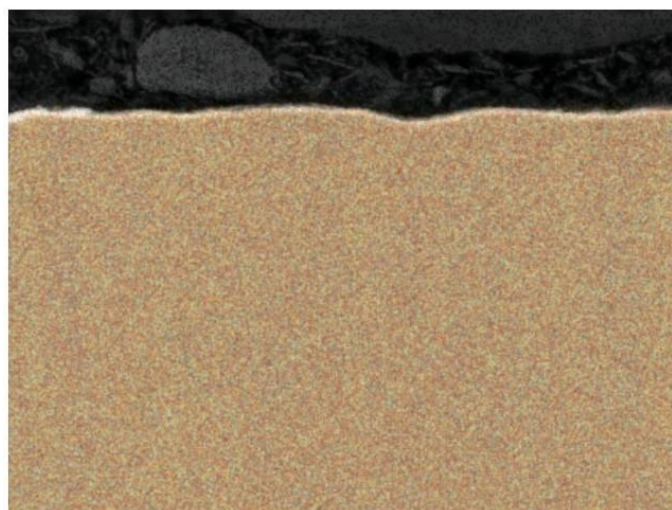
Obr. 83 - Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu ocelového vzorku č. 6



Obr. 84 - Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 6 – část ocel

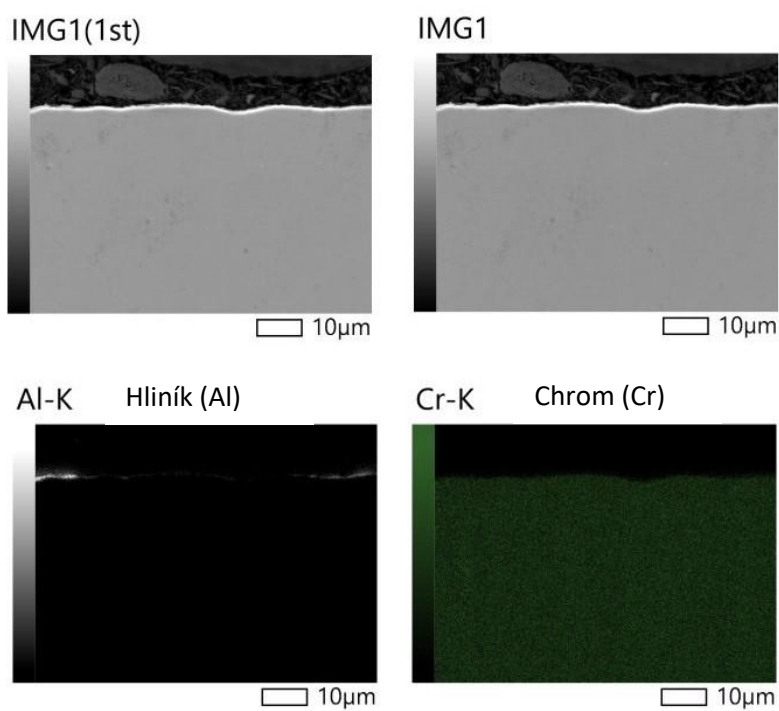
Tab. 31 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 6 – část ocel [hmot. %]

Název prvku	Al	Cr	Fe	Ni
Spc_013	0,35	18,94	73,01	7,7
Spc_014	0,38	19,13	72,62	7,88

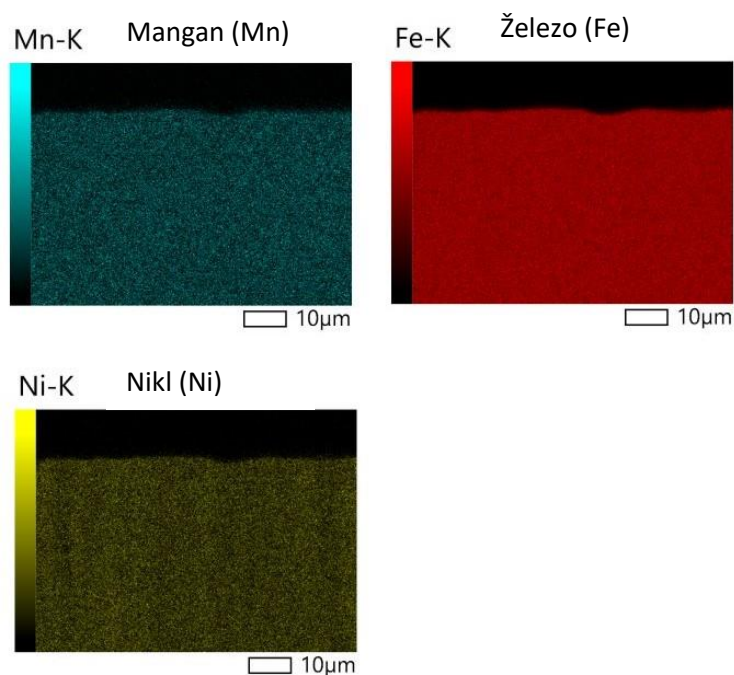


Al-K Cr-K Mn-K Fe-K Ni-K

Obr. 85 - EDS mapa ocelového vzorku č. 6 (snímek 1)



Obr. 86 - EDS mapa ocelového vzorku č. 6 (snímek 2)

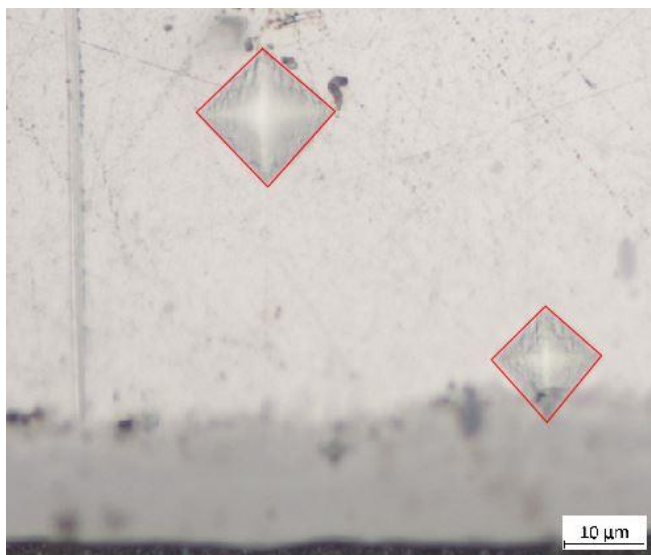


Obr. 87 - EDS mapa ocelového vzorku č. 6 (snímek 3)

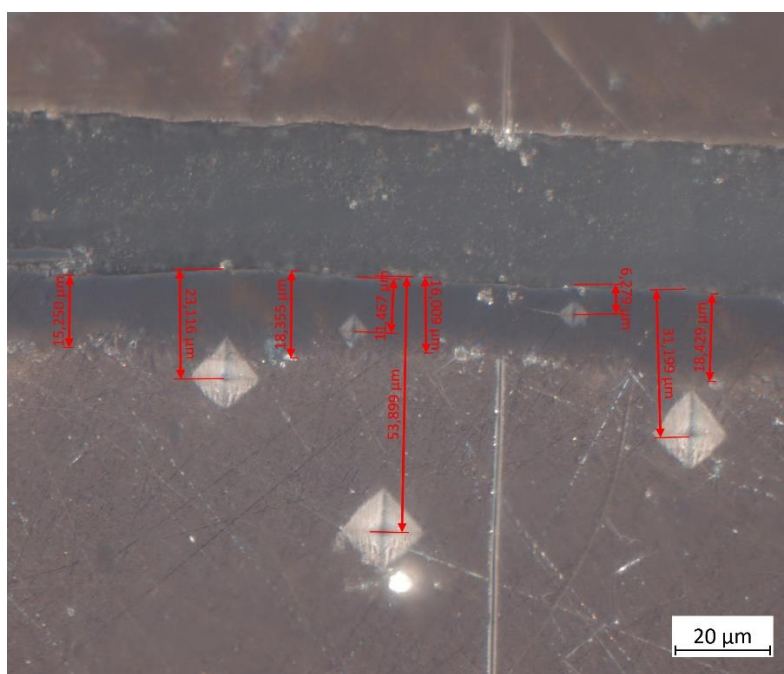
9.4 Měření mikrotvrdosti

Byla měřena mikrotvrdost na mikrotvrdoměru značky Buehler Indentamet 1100. Tyto zkoušky byly provedeny pouze jako ověřovací, na jednom vybraném vzorku. Pro tuto zkoušku byl zvolen vzorek č. 4.

Cílem měření bylo zjistit hodnoty tvrdosti různých fází, které se tvořily v oblasti difúzního pásma a materiálového rozhraní. Byla tedy mapována pouze oblast v bezprostřední blízkosti spoje. Vzhledem k tomu, že při metalografické přípravě vzorku se jednotlivé části spoje porušili, byly měřeny ocelová a hliníková část samostatně. Vzdálenosti vpichů byly vztaženy k hranici spoje (tj. k okraji porušení vzorku). Vtisky započaly nejprve ve vzdálenosti 0,2 mm od hrany materiálu a měření proběhlo při zkušebním zatížení 10 g (HV 0,01). Další měření byla uskutečněna po 0,05 mm směrem k okraji vzorku. Poslední měření byla volena tak, aby byly vpichy umístěny ještě celé ve vzorku, ale zároveň aby změřili mikrotvrdost předpokládaných difúzních vrstev (intermetalických fází). Výsledky měření jsou zaznamenány v Tab. 32. Ukázky umístění vpichů (ze strany Al slitiny) jsou na Obr. 88 a Obr. 89.



Obr. 88 – Vtisky v hliníkové slitině (zvětšení 1000X)



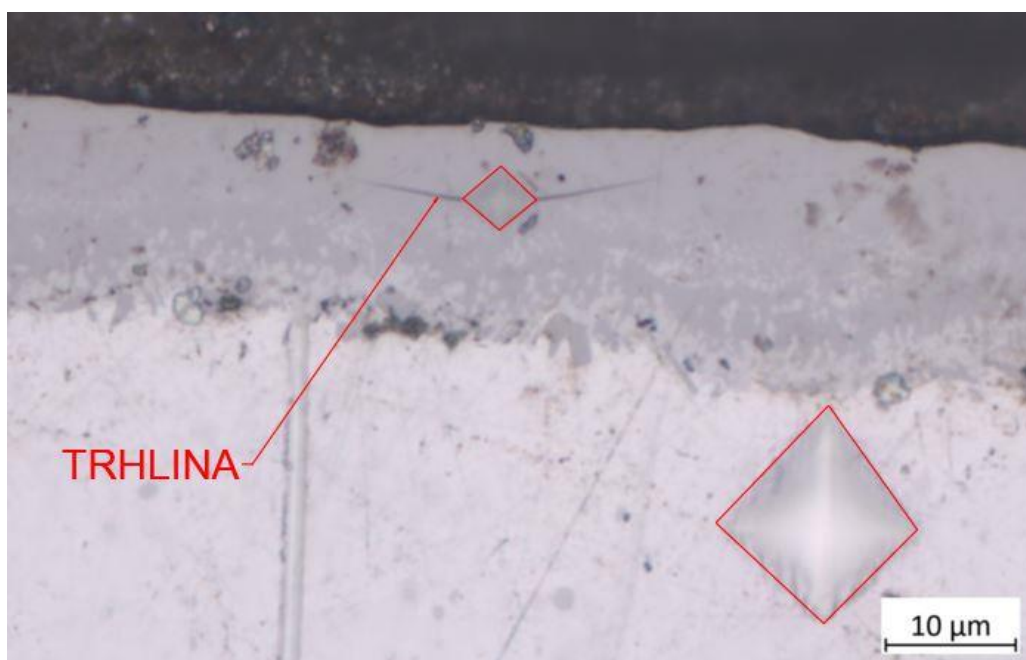
Obr. 89 – Vzdálenosti vtisků u hliníkové slitiny (zvětšení 500X, metoda zobrazení: POL)

Tab. 32 – Hodnoty mikrotvrdotí pro vzorek č. 4

Korozivzdorná ocel 1.4301		Hliníková slitina EN AW 5083	
Vzdálenost od hrany [mm]	Hodnota tvrdosti HV0,01	Vzdálenost od hrany [mm]	Hodnota tvrdosti HV0,01
0,2	245	0,2	81
0,15	309	0,15	80
0,1	309	0,1	77
0,05	290	0,05	74
0,02	334	0,03	91
0,01	363	0,02	106
-	-	0,01	532
-	-	0,006	756



U obou materiálů si lze všimnout, že čím blíže k difúznímu pásmu byla mikrotvrdość měřena, tím rostla hodnota tvrdosti. Tento jev se výrazně projevil zejména u hliníkové slitiny, kdy se hodnoty dostaly z 80 HV_{0,01} (ZM ve vzdálenosti 0,2 mm) až na hodnotu 756 HV_{0,01} (difúzní pásmo ve vzdálenosti 0,006 mm). Z toho lze usoudit, že v místě difúze vznikaly velmi tvrdé intermetalické fáze. Navíc ve vzdálenosti 0,006 mm byla v okolí vpichu zpozorována trhlinka (Obr. 90). Z toho vyplývá, že příslušné tvrdé fáze jsou navíc velmi křehké.



Obr. 90 – Trhlinka v okolí vpichu (zvětšení 1000X)

Zkouška mikrotvrdości tedy potvrdila výskyt tvrdých a křehkých intermetalických fází, které se shlukovaly v difúzním pásmu u hrany obou materiálů a vedly k porušení spoje.



Závěr

Realizovaný experiment ukázal, že svařování hliníkové slitiny EN AW 5083 (AlMg_{4,5}Mn_{0,7}) s korozivzdornou austenitickou ocelí 1.4301 je velmi obtížné (i pomocí difúzního svařování), neboť z devíti vzorků svařených různými procesními parametry se u 6 vzorků nepodařilo vytvořit kvalitní svarový spoj. Zbýlé tři vzorky se sice podařilo svařit, nicméně dva z nich byly poškozeny při přípravě metalografických výbrusů a u jednoho byl svar porušen za pomoci ruční síly.

Z toho vyplývá, že svary nevykazují velkou tahovou pevnost. Např. v porovnání s hodnotami meze pevnosti dosažené u předchozích experimentálních prací (kdy byla použita slitina Al EN AW 6082) byl nejpevnější spoj byl svařen při teplotě 575 °C, době svařování 600 s při tlaku 2,5 bar a pevnost dosahovala hodnoty 222,4 MPa. (4)

Na svařovaných plochách se vytvořila lesklá vrstva intermetalických fází. Napovídá tomu fakt, že všechny vzorky vykazovaly ihned po vyjmutí z grafitového kelímku soudržnost, která byla přerušena po několikaminutovém dochlazování na vzduchu. V případě výskytu oxidických vrstev by tento jev nenastal a oba materiály by nejevily známky spojení ani těsně po vyjmutí z kelímku. Výbrusy vzorků byly zkoumány světelnou mikroskopií, kde v oblasti difúzního rozhraní byly zpozorovány seskupené jehlicovité útvary, což pro intermetalické fáze je příznačné.

Pozdější EDS analýza potvrdila dřívější domněnky, poněvadž u hliníkových vzorků 4 a 6 se seskupené útvary u difúzního rozhraní skládaly převážně z hliníku (Al) a železa (Fe). Oblast vyskytující se nejbližší u rozhraní se podle diagramu Al-Fe jeví jakou dvoufázovou, neboť by se zde měly vyskytovat intermetalika FeAl₂ a Fe₂Al₅. Dále směrem k základnímu materiálu se vylučovala FeAl₃. Za intermetalickými fázemi Al-Fe byly oblasti bohaté na hořčík (Mg), chrom (Cr) a nikl (Ni). Z toho lze pouze přepokládat, že se může též jednat o intermetalické fáze ovšem na bázi Al-Mg, Al-Cr a Al-Ni

U všech třech ocelových vzorků nebyly na určitých místech zpozorovány výrazné odchylky chemického složení. Jediné částice, které se zde nacházely, obsahovaly mangan (Mn) a síru (S). Může se jednat o sulfid manganatý (MnS).

Měření mikrotvrdomosti při zatížení 10 g (HV_{0,01}) v ZM a v difúzní oblasti jednoznačně podporují teorii o výskytu tvrdých a křehkých intermetalických fází. Nejvyšší hodnota mikrotvrdomosti (756 HV_{0,01}) byla změřena v oblasti difúzního pásma (ve vzdálenosti 0,006 mm od okraje vzorku). U tohoto vtisku se dokonce začaly tvořit trhliny, které jsou příznačné pro křehké fáze.

Na obtížnou svařitelnost dosti podobné materiálové kombinace poukazuje také vědecký článek, jehož autorem je Amir A. Shirzadi a kolektiv, který pojednává o difúzním svařování korozivzdorné oceli 1Cr18Ni9Ti a hliníkové slitiny EN AW 5056. Příslušný článek zdůvodňuje



obtížnou difúzní svařitelnost kvůli nevhodnému chemickému složení hliníkové slitiny obsahující relativně velkého množství hořčíku (Mg), který má tendenci vytvářet oxidy na povrchu. (70)

Námětem pro budoucí navazující práce by bylo v případě použití stejné či podobné kombinace materiálů svařovat s difúzní mezivrstvou. Na základě článku od Amir A. Shirzadi lze doporučit buď pouhé vložení této slitiny anebo pokovení Al-Mg slitiny se slitinou EN AW 6061 a to buď difúzním svařováním nebo válcováním. Doporučené parametry pro difúzní svařování ve vakuu lze volit v rozmezí 510 – 530 °C při 5 MPa po dobu 0,5 – 1 h při vakuu pod 10^{-2} Pa. (70)

Lze tedy předpokládat, že je možné provést difúzní svařování této materiálové kombinace (austenitická korozivzdorná ocel 1.4301 a hliníková slitina EN AW 5083) za podmínky, že mezi oba materiály bude vložena mezivrstva z hliníkové slitiny EN AW 6082 a budou zvoleny vhodné parametry.



Seznam použitých literárních zdrojů

1. **SVARINFO, Magazín praktického svařování.** Historie svařování. [Online] 14. Červen 2006. [Citace: 20. Červenec 2024.] <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006061401>.
2. **SUCHÁNEK, Jan a KOLAŘÍK, Ladislav.** Quo vadis, svařování? *MM Průmyslové spektrum*. [Online] 12. Únor 2014. [Citace: 20. Červenec 2024.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/quo-vadis-svarovani>.
3. **KAZAKOV, Nikolaj Fedotovič.** *Diffuzionnaja svarka materialov*. Moskva : Izdatel'stvo Mašinostrojenie, 1976.
4. **GREGOR, Matěj.** *Difuzní svařování kombinovaných spojů Al slitin a korozivzdorných ocelí*. Diplomová práce, Praha, ČVUT, 2023.
5. **JANOVEC, Jiří, MACEK, Karel a ZUNA, Petr.** *Fyzikální metalurgie*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004.
6. **MACEK, Karel, ZUNA, Petr a kolektiv.** *Nauka o materiálu*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 1999.
7. **KOLAŘÍK, Ladislav.** *Difuzní svařování titanu s korozivzdornou ocelí v inertní ochranné atmosféře*. Habilitační práce, Praha, ČVUT, 2015.
8. **FRAIGE, Feras.** Chapter 5: Diffusion. [Online] [Citace: 20. Červenec 2024.] https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/chapter_5_diffusion.pdf.
9. **PLUHAŘ, J, a další.** *fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálů*. Praha : SNTL/ALFA, 1987.
10. **ŠMILAUEROVÁ, Jana.** Bodové poruchy. [Online] [Citace: 30. Leden 2024.] https://material.karlov.mff.cuni.cz/people/smilauerova/vyuka/FyzMat_I/cs/FyzMat_I_2_bodoveporuchy.pdf.
11. **KOPELIOVICH, Dimitri.** Diffusion in alloys. [Online] *Substances and technologies*, 13. Prosinec 2023. [Citace: 1. Srpen 2024.] https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=diffusion_in_alloys#google_vignette.
12. **EL MEL, Abdel-Aziz, NAKAMURA, Ryusuke a BITTENCOURT, Carla.** *The Kirkendall effect and nanoscience: hollow nanospheres and nanotubes*. místo neznámé : Beilstein journal of nanotechnology, 2015. 6.1: 1348-1361.
13. **YU, LePing, et al.** *Recent Developments of Nanomaterials and Nanostructures for High-Rate Lithium Ion Batteries*. místo neznámé : ChemSusChem, 2015. 6.1: 1348-1361.
14. **KOLAŘÍK, Ladislav.** Difúzní svařování. [Online] *MM Průmyslové spektrum*, 11. Duben 2012. [Citace: 28. Září 2023.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/difuzni-svarovani>.
15. **NOVÁK, Michal.** *Difúzní svařování heterogenních svarů v kombinaci vysokolegovaná ocel a titan*. Bakalářská práce, Liberec, TUL, 2016.
16. **AKCA, Enes a GURSEL, A.** *The importance of interlayers in diffusion welding*. místo neznámé : *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 2015.
17. **HLUCHÝ, Miroslav a KOLOUCH, Jan.** *Strojírenská technologie 1, Nauka o materiálu 1. díl*. Praha : Nakladatelství Scientia, spol s. r. o., 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.



18. **Paroc group.** Mechanické vlastnosti. [Online] 2023. [Citace: 7. 5íjen 2023.] <https://www.paroc.cz/knowhow/mechanicka-stabilita/mechanicke-vlastnosti>.
19. **KOPELIOVICH, Dimitri.** Tensile test and Stress-Strain Diagram. *Substances and technologies.* [Online] 13. Prosinec 2023. [Citace: 31. Leden 2024.] https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tensile_test_and_stress-strain_diagram.
20. **SOBOTOVÁ, Jana a kolektiv, a.** *Nauka o materiálu I. a II., cvičení.* Praha : Nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-05550-2.
21. **DASCAL, Anna.** *Experimental studies to assess stainless steel high temperature hardness.* Timișoara : Faculty of Engineering Hunedoara, Rumania, 2005.
22. **Laboratory Testing Inc.** Microhardness testing. [Online] Inverse Paradox, 2023. [Citace: 7. Říjen 2023.] <https://labtesting.com/services/materials-testing/metallurgical-testing/microhardness-testing/>.
23. **Nhat Viet Industrial Co.** Vickers hardness principles. [Online] 2024. [Citace: 1. Únor 2024.] <https://nhatvietindustry.com.vn/en/vickers-hardness-principles/>.
24. **SUCHÁNEK, Jan a SUCHÁNEK, Vladimír.** Zkouška tvrdosti podle Knoopu. [Online] HANYKO Praha s. r. o., 2016. [Citace: 7. Říjen 2023.] <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrdest-a-jak-se-meri/zkouska-tvrlosti-podle-knoopu/>.
25. **TREJTNAR, Josef.** Destruktivní zkoušky svarových spojů. *TECHportal.cz.* [Online] biznecircle s.r.o, 18. Zář 2017. [Citace: 2. Únor 2024.] <https://www.techportal.cz/33/destruktivni-zkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Eoqedn9IqOoGWh5CTKyYaSk/>.
26. **KOVÁŘ, Marek a PETÁK, Tomáš.** Svědečný program, životnost jaderné elektrárny a reaktorová ocel. *Třípol.* [Online] 19. Červenec 2010. [Citace: 1. Únor 2024.] <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/studenti/1461-svedecny-program-zivotnost-jaderne-elektrarny-a-reaktorova-ocel>.
27. **Univerzita Palackého v Olomouci.** Téma. Světelná mikroskopie. *Cvičení z buněčné biologie.* [Online] [Citace: 2. Únor 2024.] http://www.rustreg.upol.cz/_materials/bubcv/BUBCV1.pdf.
28. **BÁRTOVÁ, Eva.** Zvětšovací zařízení (lupa, světelný mikroskop). [Online] VFU Brno, Fakulta veterinární hygieny a ekologie, 2014. [Citace: 8. Říjen 2023.] https://cit.vfu.cz/opvk2014/?title=teorie-svetelne_mikroskopy&lang=cz&goonpage=.
29. **MASLEN, Charlie a KROPÁČEK, Jindřich.** Optická (světelná) mikroskopie - [OM]. [Online] VŠCHT, Laboratoř přípravy nano a mikromateriálů. [Citace: 1. Únor 2024.] <https://nano.vscht.cz/wp-content/uploads/navody/charakterizace/OM.pdf>.
30. **MACEK, Karel, HNILICA, František a STARÝ, Vladimír.** *Experimentální metody v materiálovém inženýrství.* Praha : Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-8001-03934-2.
31. **NĚMEČEK, Jiří.** Metody skenovací a elektronové mikroskopie SEM a analytické techniky. *Mechanika a popis struktury materiálů - přednáška 02.* [Online] ČVUT Praha, Fakulta stavební. [Citace: 3. Únor 2024.] http://ksm.fsv.cvut.cz/~nemecek/teaching/dmpo/lectures/D32MPO_02.pdf.
32. **NEBESÁŘOVÁ, Jana.** Kapitola 7.2 Tvorba obrazu. *Elektronová mikroskopie pro biologie.* [Online] 2001. [Citace: 20. Únor 2024.] <http://lembok.paru.cas.cz/Podkap/7.2.html>.



33. **Fyzikální ústav AV ČR.** Transmisní elektronový mikroskop (TEM). *MATCA*. [Online] 2014. [Citace: 5. Únor 2024.] <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/tem/>.
34. **REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin.** Transmisní elektronový mikroskop. *Encyklopedie fyziky*. [Online] 2006. [Citace: 5. Únor 2024.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1681-transmisni-elektronovy-mikroskop>.
35. **KUDĚLKA, Vladimír, a další.** *Korozivzdorné oceli, vlastnosti a rozdělení*. [Online] [Citace: 16. Říjen 2023.] https://www.cws-anb.cz/docu/texty/0000/000032_121-korozivzdorne-oceli-1.pdf.
36. **Zhejiang Guanyu Steel Tube Co.** Schaeffler and Delong Diagrams for Predicting Ferrite Levels. [Online] TubingChina.com. [Citace: 10. Únor 2024.] <https://tubingchina.com/Schaeffler-and-Delong-Diagrams-for-Predicting-Ferrite-Levels-in-Austenitic-Stainless-Steel-Weld.htm>.
37. **TANZI, Maria Cristina, CANDIANI, Gabriele a FARE, Silvia.** *Foundations of Biomaterials Engineering*. místo neznámé : Academic Press, 2019. 978-0-08-101034-1.
38. **GALE, W.F a TOTENMEIER, T.C.** *Smithells Metals Reference Book (Eighth Edition)*. místo neznámé : Butterworth-Heinemann, 2004. 978-0-7506-7509-3.
39. **Konstrukce media s. r. o.** Korozivzdorné materiály – základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost. *Konstrukce, odborný časopis pro stavitelství a strojírenství*. [Online] 12. Prosinec 2014. [Citace: 18. Červenec 2024.] <http://old.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>. ISSN 1803-8433.
40. **Tubes International.** Tabulka typů nerezových ocelí. [Online] 2024. [Citace: 12. Únor 2024.] <https://www.tubes-international.cz/technicke-informace/tabulka-typu-nerezovych-oceli/>.
41. **MACEK, Karel, a další.** *Kovové materiály*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
42. **VAN TRUYEN, Than.** *Vliv teploty vytvrzování na mechanické vlastnosti slitiny AlMgSi*. Bakalářská práce, Liberec, TUL, 2018.
43. **NOVOTNÝ, Jiljí, a další.** *Technologie I (Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2006.
44. **HORNÍK, Jakub.** *Hliník a jeho slitiny*. Přednáška Kovové materiály, Praha, ČVUT, 2023.
45. **HAVELKA, Oto.** Olejové vývěvy pro chemické aplikace. *MM Průmyslové spektrum*. [Online] Schmachtl CZ spol s. r. o., 23. Září 2014. [Citace: 28. Prosinec 2023.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/olejove-vyvevy-pro-chemicke-aplikace>.
46. **IKS Group.** Vývěvy s olejovým mazáním. *Web IKS Group*. [Online] 2024. [Citace: 1. Únor 2024.] <https://www.iks-group.com/cs/vyrobky/vyvevy-s-olejovym-mazanim/>.
47. **Vakuum Bohemia s. r. o.** Turbomolekulární olejové vývěvy a systémy. [Online] 2019. [Citace: 28. Prosinec 2023.] <https://vakuum-bohemia.cz/turbomolekularni-olejove-vyvevy>.
48. **ROBOTERM spol s. r. o.** Co je indukční ohřev. [Online] 2022. [Citace: 28. Prosinec 2023.] <https://www.roboterm.cz/cz/indukce/o-indukci/co-je-indukcni-ohrev>.
49. **ŘASA, Jaroslav a KEREČANINOVÁ, Zuzana.** Nekonenční metody obrábění - 6. díl. *MM Průmyslové spektrum*. [Online] ČVUT, VCSVTT, 11. Červen 2008. [Citace: 28. Prosinec 2023.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-2>.



50. **ASM Aerospace Specification Metals Inc.** Aluminium 5083 - H112. [Online] [Citace: 4. Únor 2024.] <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5083H112>.
51. **WEMAN, Klas.** *Processes Handbook, Second edition.* Oxford : Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-510-7.
52. **KREJZA, Jan.** *KVALIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ HLINÍKOVÉ SLITINY AW-5083 H111.* Diplomová práce, Brno, VUT, 2019.
53. **MATHERS, Gene.** *The welding of aluminium and its alloys.* Cambridge : Woodhead Publishing, 2002. ISBN 0-8493-1551-4.
54. **LEINVEBER, Jiří a VÁVRA, Pavel.** *Strojnické tabulky, páté vydání.* Úvaly : Albra - pedagogické nakladatelství, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
55. **FÜRBAKER, Ivan, MACEK, Karel a STEIDL, Josef.** *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity.* Praha : Verlag: Dashöfer, 2004. ISBN 80-86229-02-5.
56. **AlCuSteel s. r. o.** EN AW 5083 | AlMg4,5Mn0,7 | ČSN 42 4415 | DIN 3.3547 | PN - PA13. [Online] 2024. [Citace: 30. Květen 2024.] <https://www.alcusteel.cz/en-aw-5083/>.
57. **thyssenkrupp Materials (UK) Ltd.** Stainless Steel 304 1.4301. [Online] 2023. [Citace: 4. Únor 2024.] <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-304-14301.html>.
58. **HOLMBERG, Björn.** Stainless steels – their properties and their suitability for . [Online] AvestaPolartit Welding AB, 2008. [Citace: 4. Březen 2024.] <https://www.scribd.com/doc/38730332/STAINLESS-STEELS-Their-Properties-and-Their-Suitability-for-Welding>.
59. **FOLKHARD, Erich.** *Welding Metallurgy of Stainless Steels.* Vídeň : Springer-Verlag, 1988. ISBN 978-3-7091-8967-2.
60. **KOLAŘÍK, Ladislav.** *Svařitelnost kozivzdorných ocelí I.* Přednáška TSDM, Praha, ČVUT, 2021.
61. **AGST Draht und Biegetechnik GmbH.** Datový list, DIN EN 10088-3, Číslo materiálu 1.4301. [Online] [Citace: 5. Únor 2024.] <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/102014/F2-DP-2022-Stosek-Marek-priloha-Priloha%2010-Materialovy%20list%20oceli%20X5CrNi18-10.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
62. **KLETEČKA, Jaroslav a FOŘT, Petr.** *Technické kreslení.* Brno : Computer Press, a.s., 2011. ISBN 978-80-251-1887-0.
63. **PROCHÁZKA, Lukáš.** Technická dokumentace. [Online] [Citace: 10. Únor 2014.] https://www.sps-prosek.cz/soubory/M/TD/TD-struktura_povrchu.pdf.
64. **PETR, Karel.** *ISO GPS - Tolerování textury povrchu.* Přednáška SK II, Praha, ČVUT, 2017.
65. **NOVÁK, Zdeněk.** Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu. [Online] MM Průmyslové spektrum, 22. Listopad 2011. [Citace: 10. Únor 2024.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu>.
66. **INDUTHERM Erwärmungsanlagen GmbH.** Návod k obsluze sintračního zařízení SU450. [Online]



67. **KOLAŘÍK, Ladislav a KOLAŘÍKOVÁ, Marie.** *DIFÚZNÍ SVAŘOVÁNÍ V OCHRANNÉ ATMOSFÉŘE S POUŽITÍM PŘECHODOVÝCH MEZIVRSTEV.* Pardubice : Univerzita Pardubice, 2013.
68. **POLIAK, Richard.** *Bakalářská práce, Praha, ČVUT, 2024.*
69. **RATHOD, M a KUTSUNA, M.** 510 Kirkendall Effect in Diffusion Bonding and Laser Roll Bonding of A5052 aluminium alloy and SPCC steel. *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century.* [Online] The Japan Society of Mechanical Engineers, 3. Listopad 2003. [Citace: 21. Červen 2024.] <https://doi.org/10.1299/jsmelem.2003.897>.
70. **SHIRZADI, Amir, a další.** Challenges and latest developments in diffusion bonding of high-magnesium aluminium alloy (Al-5056/Al-5A06) to stainless steels. *MDPI Open Access Journals.* [Online] 13. Červenec 2022. [Citace: 21. Červen 2024.] <https://doi.org/10.3390/met12071193>.
71. **FRANC, Aleš.** *Metalurgicko-technologické aspekty spojování hliníkových slitin s ocelí.* Disertační práce, Plzeň, ZČU, 2013.
72. **KONVITRADE Praha spol. s r. o.** Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti ocelí. [Online] [Citace: 3. Červenec 2024.] <https://www.kovintrade.cz/vliv-prvku-na-vlastnosti-oceli/>.
73. **HLUCHÝ, Miroslav, MODRÁČEK, Ondřej a PAŇÁK, Rudolf.** *Strojírenská technologie 1, Metalografie a tepelné zpracování 2. díl.* Praha : Nakladatelství Scientia, spol s. r. o., 2002. ISBN 80-7183-265-0.



Seznam obrázků

Obr. 1 – Ukázka zobrazení vakance v krystalové mřížce (10)	13
Obr. 2 – Intersticiální prvek v krystalové mřížce (10)	13
Obr. 3 – Jednorozměrný difúzní tok (5)	14
Obr. 4 – Schéma přeskočení atomu na místo vakance (5)	16
Obr. 5 – Přemísťování po vakancích (vlevo) a intersticiální přesun (vpravo) (11)	17
Obr. 6 – Přímá výměna poloh (12)	17
Obr. 7 – Kruhová výměna a nepřímý intersticiální mechanismus (12) (13)	18
Obr. 8 – Etapy difúzního svařování homogenního spoje (4)	19
Obr. 9 – Vrstvy oxidů a nečistot na svařovacím povrchu (4)	21
Obr. 10 – Závislost pevnosti spoje u oceli ČSN 12 050 na technologii obrobení povrchu (15)	22
Obr. 11 – Použití mezivrstvy při difúzním svařování (16)	23
Obr. 12 – Tahový diagram získaný ze zkoušky tahem (zelená plná čára – smluvní, modrá čerchovaná čára – skutečný) (19)	25
Obr. 13 – Zkouška tvrdosti dle Brinella (21)	26
Obr. 14 – Zkouška tvrdosti dle Vickerse (23)	27
Obr. 15 – Značení zkoušky (25)	29
Obr. 16 – Charpyho kladivo s umístěním vzorku (26)	29
Obr. 17 – Popis světelného mikroskopu (28)	31
Obr. 18 – Oblasti emisí různých fyzikálních signálů (32)	32
Obr. 19 – Schéma TEM mikroskopu (34)	33
Obr. 20 – Schaefflerův konstituční diagram (36)	34
Obr. 21 – Rozdělení slitin hliníku zobrazené v základním binárním diagramu (42)	39
Obr. 22 – Rotační olejová vývěva (46)	43
Obr. 23 – Indukční ohřev (48)	44
Obr. 24 – Rozpustnost vodíku ve slitině hliníku v závislosti na teplotě (4) (53)	46
Obr. 25 – Označení oblasti výskytu korozivzdorné oceli 1.4301 v Schaefflerově diagramu	48
Obr. 26 – Laboratorní pila Labotom-3	50
Obr. 27 – Nařezané vzorky (o tloušťce 7 mm)	50
Obr. 28 – Bruska s automatickou hlavou	51
Obr. 29 – Vzorky s vyvrtaným otvorem (horní řada hliníková slitina, spodní ocel)	51
Obr. 30 – Ra a Rz parametr drsnosti povrchu (63)	52
Obr. 31 – Rq parametr drsnosti povrchu (64)	53
Obr. 32 – Induterm SU450 (66)	53
Obr. 33 – Ukázka otevřené pracovní komory (66)	54
Obr. 34 – Ovládací panel	55
Obr. 35 – Nastavení programu pro teplotu 600 °C, čas svařování 600 s a tlak 2,5 baru	56
Obr. 36 – Vzorky v sestavě (bez přítlačného válečku)	57
Obr. 37 – Průběh svařování při 600 °C; 600 s; 2,5 bar	59
Obr. 38 – Svařený vzorek č. 1 (600 °C; 600 s; 2,5 bar)	60
Obr. 39 – Deformovaný vzorek č. 6 (600 °C; 600 s; 2,5 bar)	61
Obr. 40 – Vzorek č. 4 (600 °C; 600 s; 2,0 bar)	62
Obr. 41 – Dělení difúzně svařeného vzorku	63
Obr. 42 – Ultrazvuková čistička	64
Obr. 43 – Světelný mikroskop Zeiss Axio Observer Dm1 (68)	65
Obr. 44 – Rozhraní spoje u vzorku č. 4, zvětšení 500x, metoda zobrazení: DIC	65
Obr. 45 – Rozhraní spoje u vzorku č. 4, zvětšení 1000x, metoda zobrazení: DIC	66
Obr. 46 – Rozhraní spoje u vzorku č. 4, měření šířky difúzního pásma	66
Obr. 47 – Rozhraní spoje u vzorku č. 6, zvětšení 1000X, metoda zobrazení: DIC	67
Obr. 48 – Rozhraní spoje u vzorku č. 6, měření šířky difúzního pásma	67
Obr. 49 – Metalografické výbrusy vložené do komory elektronového mikroskopu s číselným označením vzorků	68



Obr. 50 - Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu hliníkového vzorku č. 1	69
Obr. 51 - Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 1 – část Al	69
Obr. 52 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 1 (snímek 1)	70
Obr. 53 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 1 (snímek 2)	70
Obr. 54 – Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu hliníkového vzorku č. 4 (snímek 1)	71
Obr. 55 – Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu hliníkového vzorku č. 4 (snímek 2)	71
Obr. 56 – Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 4 – část Al	72
Obr. 57 – Rovnovážný diagram Fe-Al s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 4	73
Obr. 58 - Rovnovážný diagram Al-Cr s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 4	73
Obr. 59 - Rovnovážný diagram Al-Ni s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 4	74
Obr. 60 - Rovnovážný diagram Al-Mg s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 4	74
Obr. 61 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 4 (snímek 1)	75
Obr. 62 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 4 (snímek 2)	75
Obr. 63 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 4 (snímek 3)	76
Obr. 64 - Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu hliníkového vzorku č. 6	76
Obr. 65 - Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 6 – část Al	77
Obr. 66 - Rovnovážný diagram Fe-Al s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 6	78
Obr. 67 - Rovnovážný diagram Al-Cr s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 6	78
Obr. 68 - Rovnovážný diagram Al-Ni s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 6	79
Obr. 69 - Rovnovážný diagram Al-Mg s vyznačenými intermetalickými fázemi vyskytujícími se na vzorku č. 6	79
Obr. 70 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 6 (snímek 1)	80
Obr. 71 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 6 (snímek 2)	80
Obr. 72 - EDS mapa hliníkového vzorku č. 6 (snímek 3)	81
Obr. 73 - Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu ocelového vzorku č. 1	82
Obr. 74 - Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 1 – část ocel	82
Obr. 75 – EDS mapa ocelového vzorku č. 1 (snímek 1)	83
Obr. 76 - EDS mapa ocelového vzorku č. 1 (snímek 2)	83
Obr. 77 - EDS mapa ocelového vzorku č. 1 (snímek 3)	84
Obr. 78 - Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu ocelového vzorku č. 4	84
Obr. 79 - Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 4 – část ocel	85
Obr. 80 - EDS mapa ocelového vzorku č. 4 (snímek 1)	85
Obr. 81 - EDS mapa ocelového vzorku č. 4 (snímek 2)	86
Obr. 82 - EDS mapa ocelového vzorku č. 4 (snímek 3)	86
Obr. 83 - Vybrané oblasti pro bodovou EDS analýzu ocelového vzorku č. 6	87
Obr. 84 - Energetické spektrum s vyznačenými peaky jednotlivých prvků vzorku č. 6 – část ocel	87
Obr. 85 - EDS mapa ocelového vzorku č. 6 (snímek 1)	88
Obr. 86 - EDS mapa ocelového vzorku č. 6 (snímek 2)	88
Obr. 87 - EDS mapa ocelového vzorku č. 6 (snímek 3)	89
Obr. 88 – Vtisky v hliníkové slitině (zvětšení 1000X)	90
Obr. 89 – Vzdálenosti vtisků u hliníkové slitiny (zvětšení 500X, metoda zobrazení: POL)	90
Obr. 90 – Trhlina v okolí vpichu (zvětšení 1000X)	91



Seznam tabulek

Tab. 1 - Hodnoty D_0 a ΔH vybraných prvků v modifikacích železa (7) (8) (9).....	11
Tab. 2 – Hodnoty aktivačních energií pro měď (3)	18
Tab. 3 – Přehled vybraných Feritických korozivzdorných ocelí a jejich značení (40).....	35
Tab. 4 – Příklady martenzitických korozivzdorných ocelí a jejich značení (40).....	36
Tab. 5 – Příklad austenitických korozivzdorných ocelí a jejich značení (40).....	37
Tab. 6 – Mechanické vlastnosti čistého hliníku při polotvrdém stavu (H14) (41)	38
Tab. 7 – Vybrané slitiny hliníku k tváření (44)	41
Tab. 8 – Rozměry tyčového polotvaru	45
Tab. 9 – Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW 5083	45
Tab. 10 – Chemické složení slitiny hliníku EN AW 5083 [%]	45
Tab. 11 – Fyzikální vlastnosti slitiny hliníku EN AW 5083 (50).....	45
Tab. 12 – Chemické složení litiny EN AW 6082 (4) (55)	47
Tab. 13 – Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW 6082 (4) (55).....	47
Tab. 14 – Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli 1.4301 (57)	47
Tab. 15 – Chemické složení korozivzdorné oceli 1.4301 [%] (57)	48
Tab. 16 – Chromový a niklový ekvivalent oceli 1.4301	48
Tab. 17 – Tepelné vlastnosti korozivzdorné oceli 1.4301 (57).....	49
Tab. 18 – Parametry při broušení vzorků (4)	51
Tab. 19 – Změřené parametry drsnosti povrchu vzorků – Ra, Rz, Rq [μm].....	52
Tab. 20 – Technické parametry svařovacího zařízení Indutherm SU450 (66)	54
Tab. 21 – Aplikované parametry a jejich úspěšnost	59
Tab. 22 – Aplikace nových parametrů a jejich úspěšnost	61
Tab. 23 – Parametry broušení pro metalografický výbrus	63
Tab. 24 – Parametry leštění pro metalografický výbrus.....	64
Tab. 25 – Použité leštící prostředky pro jednotlivé operace	64
Tab. 26 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 1 – část Al [hmot. %]	69
Tab. 27 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 4 – část Al [hmot. %]	72
Tab. 28 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 6 – část Al [hmot. %]	77
Tab. 29 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 1 – část ocel [hmot. %]	82
Tab. 30 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 4 – část ocel [hmot. %]	85
Tab. 31 - Procentuální obsah prvků ve vybraných místech vzorku č. 6 – část ocel [hmot. %]	87
Tab. 32 – Hodnoty mikrotvrdostí pro vzorek č. 4	90



Seznam zkratek

BCC	Prostorově středěná kubická krystalická mřížka (Body-Centered Cubic)
FCC	Plošně středěná kubická krystalická mřížka (Face-Centered Cubic)
ČSN	Česká státní norma
DIN	Německá norma (Deutsches Institut für Normung)
EN	Evropská norma (European norm)
ISO	Mezinárodní norma (International Organization for Standardization)
HRA	Zkouška tvrdosti tle Rockwella, zkouška typu A
HRB	Zkouška tvrdosti tle Rockwella, zkouška typu B
HRC	Zkouška tvrdosti tle Rockwella, zkouška typu C
HV	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
HK	Zkouška tvrdosti dle Knoopu
ZM	Základní materiál
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
SK	Svarový kov
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
SE	Sekundární elektrony (Secondary Electrons)
BSE	Zpětně odražené elektrony (Backscattered Electrons)
EDS	Energo-disperzní spektroskopie (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
WDS	Vlnově disperzní spektroskopie (Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy)
EN AW	Tvářené hliníkové slitiny (Aluminium Wrought)
ÚST	Ústav strojírenské technologie
FS	Fakulta strojní
MIG	Obloukové svařování odtavující se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře (Metal inert gas)
TIG	Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertní ochranné atmosféře (Tungsten inert gas)
DIC	Diferenciální interferenční kontrast (Differential Interference Contrast)
POL	Polarizační mikroskopie (Polarized Light Microscopy)
BF	Světlé pole (Bright field)
DF	Tmavé pole (Dark field)