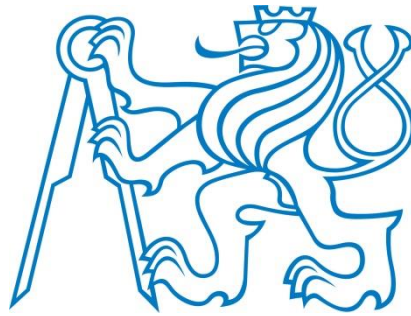


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní – Ústav strojírenské technologie**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Metalografická analýza svarových spojů turbodmychadel z niklových slitin**

Metallographic analysis of welded joints of nickel alloy turbochargers

**Autor: Petra Staňková**

**Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Kramár, Ph.D., IWE**

**Prohlášení:**

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně za použití uvedené literatury a podle pokynů svého školitele.“

V Praze dne 12. 8. 2016

Petra Staňková

### **Poděkování:**

Chtěla bych tímto poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Tomáši Kramárovi, Ph.D., IWE., za odbornou pomoc a věcné připomínky, jichž se mi od něj dostalo během zpracování této bakalářské práce. Zaměstnancům společnosti Continental Automotive Czech Republic, s.r.o.; Trutnov za jejich odbornou pomoc a poskytnutí materiálu při řešení praktické části této bakalářské práce. V neposlední řadě bych ráda také poděkoval panu Ing. Jakobovi Horváth z Ústavu materiálového inženýrství ČVUT v Praze.

Také bych ráda poděkovala své rodině a svým blízkým za morální a psychickou podporu.

# Anotace

- Jméno autora:** Petra Staňková
- Název práce:** Metalografická analýza svarových spojů turbodmychadel z niklových slitin
- Škola:** České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
- Ústav:** Ústav strojírenské technologie
- Školní rok:** 2015/2016
- Vedoucí DP:** Ing. Tomáš Kramár, Ph.D., IWE
- Klíčová slova:** Svařování elektronovým paprskem, niklové super slitiny, MAR M246, Inconel 713C, metalografická analýza, optická mikroskopie, elektronová mikroskopie.
- Abstrakt:** Práce je zaměřena na metalografickou analýzu svarových spojů dvou různých turbín turbodmychadel, vzniklých svařováním elektronovým paprskem. Lopatky první turbíny jsou vyrobeny z niklové super slitiny Inconel 713C a stopka z nízkolegované oceli 42CrMo4, druhá turbína má lopatky ze super slitiny Mar M246 a stopku z korozi-vzdorné oceli X22CrMoV12. Praktické část práce se věnuje přípravě vzorků a jejich vyhodnocení. Vzorky byly broušeny, leštěny a leptány, jak konvenčním způsobem, tak elektrolyticky. Vyhodnocuje se účinnost různých leptání, kvalita svaru, mikrotvrdosti a elektronová mikroskopie.
- Bibliografická citace:** STAŇKOVÁ, P. Metalografická analýza svarových spojů turbodmychadel z niklových slitin. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Kramár, Ph.D., IWE

# Anotace

**Author:** Petra Staňková

**Theme of thesis:** Metallographic analysis of welded joints of nickel alloy turbochargers.

**University:** Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

**Department:** Department of Manufacturing Technology

**Academic year:** 2015/2016

**Supervisor:** Ing. Tomáš Kramár, Ph.D., IWE

**Key words:** Electron beam welding of nickel superalloy MAR M 246, Inconel 713 C, metallographic analysis, optical microscopy, electron microscopy.

**Abstract:** Work is focused on metallographic analysis of welded joints of two different shafts of turbochargers, resulting electron beam welding. The blades of the first turbine are made of nickel-based super alloy Inconel 713c and stem from low-alloy steel 42CrMo4, the second turbine has blades of super alloys Mar M246 and a shank made of stainless steel X22CrMoV12. The practical part is devoted to the preparation of samples and their evaluation. Samples were cut, polished and etched as in the conventional manner and electrolysis. Evaluates the effectiveness of different etching quality of the weld, microhardness and electron microscopy.

**Bibliographic citation:** STAŇKOVÁ, P. Metalografická analýza svarových spojů turbodmychadel z niklových slitin. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Kramár, Ph.D., IWE

# Obsah

1. Úvod.....	10
2 Princip elektronového svařování.....	11
2.1. Úvod do problematiky elektronového svařování.....	11
2.2. Zařízení pro elektronové svařování.....	12
2.2.1. Elektronové dělo.....	13
2.2.2. Elektronová optika.....	14
2.2.3. Pracovní komora.....	15
2.2.4. Typy svářecích zařízení.....	17
2.2.5. Automatizace procesu svařování.....	19
2.3. Svazek elektronů.....	19
2.3.1. Sváření v režimu vedení tepla.....	19
2.3.2. Svařování v režimu keyhole.....	19
2.4. Svařitelnost kovů elektronovým paprskem.....	23
3. Materiál turbíny.....	25
3.1. Nikl a jeho slitiny.....	25
3.1.1. Svařitelnost niklových slitin.....	28
3.1.2. Slitiny Inconel 713 C.....	29
3.1.3. Slitina MAR M 246.....	30
3.2. Nízkolegované oceli.....	31
3.2.1. Svařitelnost nízkolegovaných slitin.....	31
3.2.2. Ocel 42CrMo4+QT.....	31
3.3. Korozivzdorné oceli.....	31
3.3.1. Svařitelnost korozivzdorných slitin.....	32
3.3.2. Ocel X22CrMoV12.....	32
4. Metalografie.....	33
4.1. Metalografické mikroskopy.....	33
4.1.1. Optická mikroskopie.....	33
4.1.2. Elektronová mikroskopie.....	34
4.2. Metalografický vzorek.....	35
4.2.1. Odebrání vzorku.....	35
4.2.2. Preparace.....	36
4.2.3. Broušení a leštění.....	37
4.2.4. Zviditelňování struktury.....	39

4.2.5.	Vhodný způsob přípravy slitiny MAR M 246 .....	41
4.2.6.	Vhodný způsob přípravy slitiny Inconel 713C.....	42
4.3.	Vyhodnocování analýzy materiálů .....	43
4.3.1.	Měření mikrotvrdosti .....	44
4.3.2.	Energiově disperzní spektroskopie.....	45
5.	Experimentální práce .....	46
5.1.	Dělení vzorků .....	46
5.2.	Preparace / zalisování vzorků.....	46
5.3.	Broušení a leštění .....	47
5.4.	Leptání.....	48
5.5.	Vyhodnocení experimentu .....	49
5.5.1.	Optická mikroskopie.....	49
5.5.6.	Měření mikrosvrdosti.....	56
5.5.7.	Elektronová mikroskopie.....	57
6.	Závěr.....	60

## 1. Úvod

Práce je zaměřena především na přípravu vzorků komponentů turbodmychadel a jejich metalografickou analýzu. Používaných v motorech 1.0 EcoBoost od firmy Ford, který se v letech 2012, 2013 a 2014 stal motorem roku a jejich metalografickou analýzu. Předmětem jsou dvě turbíny s heterogenním svarovým spojem. Kde první z nich je spoj niklové slitiny Inconelu 713 a nízko legované oceli 42CrMo4 + QT a druhé z nich je spojení niklové slitiny Mar M246 a korozivzdorné oceli X22CrMoV12.

Bakalářská práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části je postupně popsán princip technologie svařování elektronovým paprskem. Vznik elektronového paprsku, usměrňování i jeho interakce s materiálem. Jednotlivé části ale i druhy zařízení používaných pro tento typ svařování. Principy obou režimů a svařitelnost kovů pomocí svařování elektronovým paprskem (EBW). Druhá třetina teoretické části se věnuje materiálu turbíny, jejich vlastnostem a svařitelnosti. Niklu a niklovým super slitinám, konkrétně pak slitinám Inconel 713 a Mar M246+Qt, které jsou díky svým příznivým vlastnostem, především dobrou odolností za vysokých teplot - typickým materiálem pro spalovací turbíny. Dalším bodem je nízko legovaná ocel 42CrMo4+QT a korozivzdorná ocel X22CrMoV12, z těchto materiálů jsou vyrobeny stopky turbodmychadel. Tato kombinace materiálů byla zvolena z důvodu dosažení nižších cenových nákladů při zachování dobrých mechanických vlastnostech. Závěr teoretické části práce je věnována metalografii, kde je popsán způsob přípravy vzorku, lisování, broušení, leštění a leptání. Dále také světelná mikroskopie a elektronová mikroskopie.

Praktická část se věnuje analýze heterogenním svarovým spojem v sériové výrobě, za použití výše uvedených teoretických základů implementovaných do praxe.



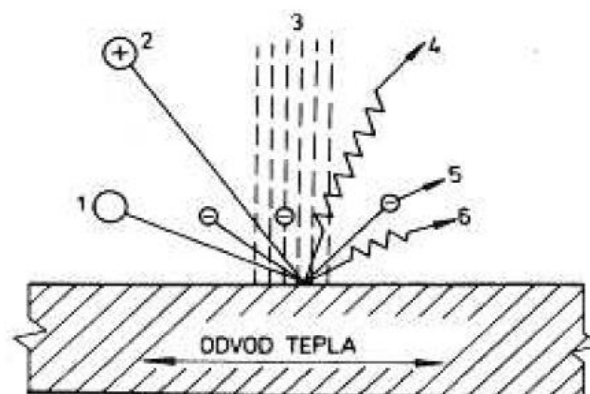
## 2 Princip elektronového svařování

První zmínky o svařování elektronovým paprskem můžeme najít již v polovině 20. století. Spolu s elektronovým mikroskopem, který pracuje na podobném principu a má společné elektronové dělo a elektronovou optiku. Již v počátcích se jednalo o velmi produktivní metodu, která si našla místo v předních oblastech průmyslu, zejména v energetice, letectví a kosmickém průmyslu. Standardně se jedná o svařování bez přídavného materiálu, ale lze svařovat i s přídavným materiálem, popřípadě využít tuto metodu na návary. Tato technologie je úzce spjatá s využitím vysokého stupně vakua. [1]

### 2.1. Úvod do problematiky elektronového svařování

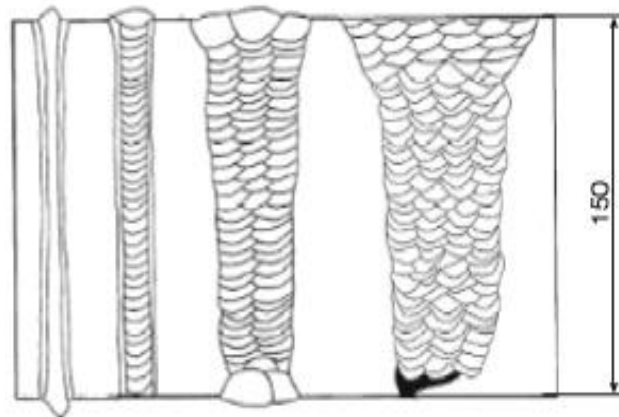
Svařování usměrněným svazkem elektronů, tedy elektronové svařování, dále jen EBW se zařazuje do metod tavného svařování. [1]

Podstata spočívá v dopadu urychleného svazku elektronů na svařovaný materiál. Zdrojem volných elektronů jsou emitory elektronů. K urychlení na 0,3 až 0,75 násobek rychlosti světla dochází v elektronovém dělu pomocí elektrického pole. K natavení materiálu dojde při dopadu volných elektronů na povrch materiálu. Zmíněné natavení je zapříčiněno prudkým rozkmitáním krystalové mřížky a přeměně kinetické energie na energii tepelnou. Dopad volných elektronů znázorňuje obr. 1. Jak vidíme, část elektronů předá svojí energii krystalové mřížce. Další část se odrazí do okolního prostoru spolu s doprovodným rentgenovým a tepelným zářením. Při odrazu opět vzniká potřebné teplo k vytvoření spoje bez působení tlaku. Odražené elektrony jsou buď sekundární, dají se využít na zobrazení celého procesu, nebo chybně rozptýlené na možnost topografie. Z rentgenového záření lze zjistit dané chemické složení vměstků. [1,2,3,4]



Obr. 1 – Způsoby interakce paprsku s materiálem (1 – molekuly kovu; 2 – kladné ionty; 3 – elektronový paprsek; 4 – rentgenové záření; 5 – odražené elektrony; 6 – tepelné záření) [7]

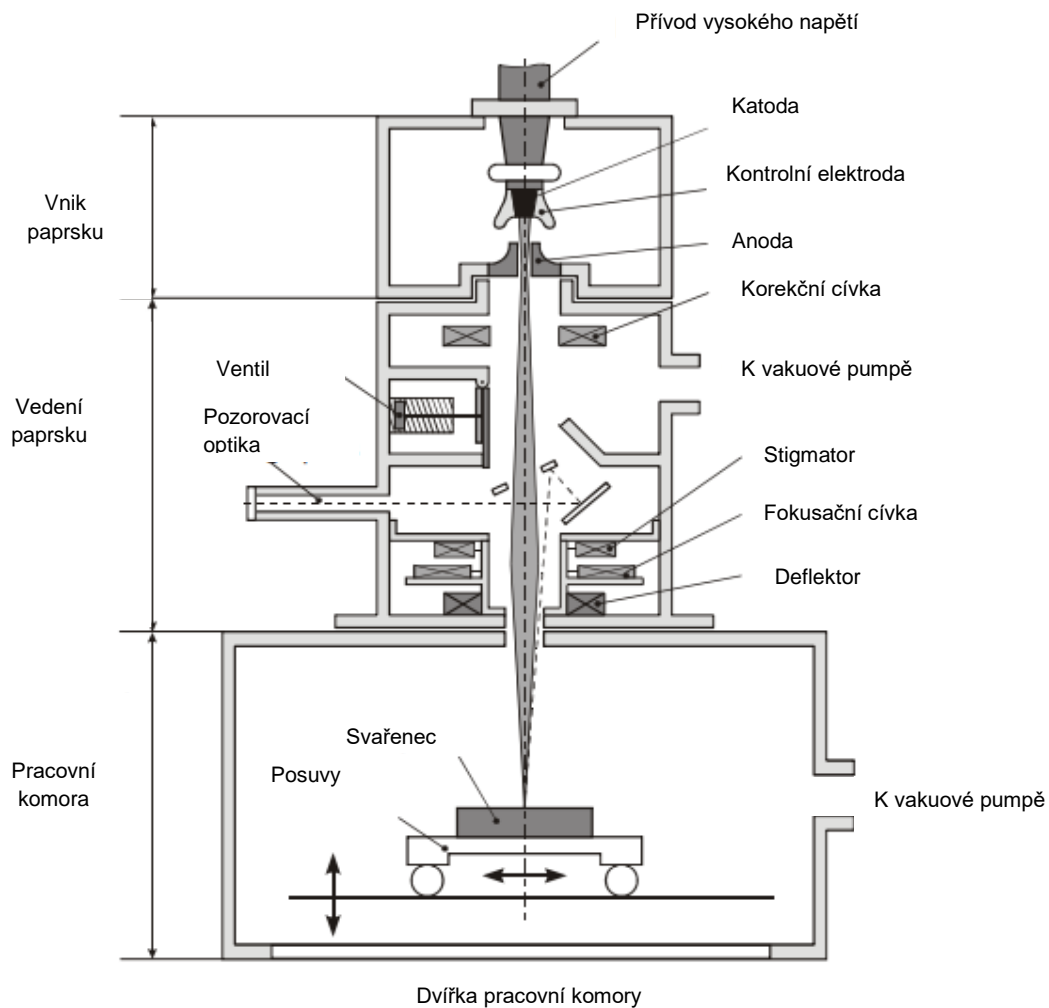
Proudová hustota takového svazku je u výkonnějších zdrojů  $10^8 \text{ wcm}^{-2}$ . Pomocí fokusačních cívek jsme schopni svazek usměrnit do úzké definované oblasti až na průměry 0,05mm. Díky výše uvedeným vlastnostem EBW jsme schopni dosáhnout velmi úzkého svaru. Lze dosáhnout poměru hloubky průvaru k šířce svaru 1:50. Porovnání s obloukovými metodami svařování je patrné z obr. 2. Hloubka průniku svaru se pohybuje od 0,2 mm při vertikálním směru do 60 mm u horizontálního až do 300 mm. [1,2,3,4]



Obr. 2 – Porovnání šířky svaru a počet vrstev při: (zleva) svaření EBW, jednovrstvé svařování do úzké mezery, dvouprůchodové svařování a svařování úkosem. [4]

## 2.2. Zařízení pro elektronové svařování

Sváreční zařízení pro EBW nezávisle na jejich velikosti, výrobci či zamýšleném způsobu využití jsou složeny ze čtyř základních strukturních částí, z generátoru elektronového paprsku, naváděcího či řídicího systému, pracovní komory a kontrolního systému. Schéma bez kontrolního systému je zobrazeno na obr. 3. Tyto jednotky mohou být vyrobeny v mnoha variacích a výrazně se přizpůsobují potřebám výroby. Systémy lze dělit dle použití pro malosériovou výrobu, střední či velkosériovou výrobu (vysoký stupeň automatizace) a svařování rozměrných výrobků. S ohledem na jejich využití pracuje generátor při nízkém (do 60 KV) či vysokém (nad 60 KV) napětí. Generátory s nízkým napětím jsou značně levnější. Naopak s vyšším napětím lze docílit lepších svařovacích koeficientů (poměr až 1/50) a také kvalitního svaru u větších vzdáleností mezi obrobkem a generátorem paprsku. S ohledem na konstrukci lze rozdělit na zařízení velkých rozměrů a zařízení malých rozměrů, která se obvykle používají v laboratořích. [5]

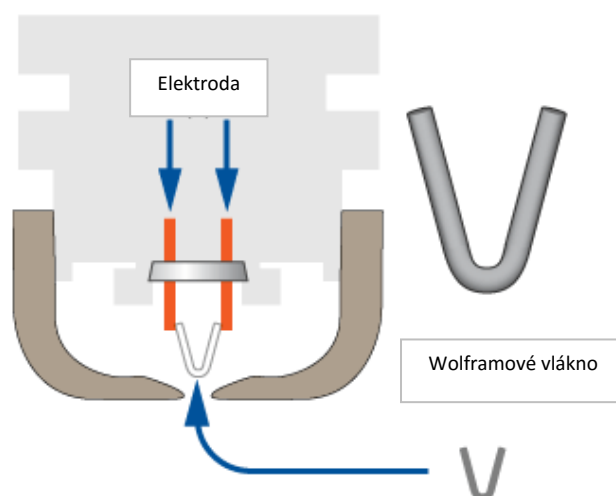


Obr. 3. Schéma zařízení pro EB [20]

### 2.2.1. Elektronové dělo

Elektronové dělo se skládá z oblasti, kde dochází k emitaci elektronů a oblasti, kde se elektrony dále usměřují. Zdrojem volných elektronů a zároveň katodou je nejčastěji wolframové vlákno, které je spolu se schématem emitorů elektronů zobrazeno na obr. 4. Existují ale i kvalitnější zdroje. Mezi které patří tantalové vlákno stejně jako u předchozího vlákna ohnuté do tvaru V nebo krystaly lantanhexaboridu. Důvodem použití těchto materiálů je vysoká teplota katody. Vlákno je zahříváno na teplotu okolo 2 700 °C. Ohřev probíhá buď přímou metodou pomocí elektrického proudu anebo nepřímou metodou pomocí vinutých vláken. Okolo vlákna je umístěn Wehneltův válec neboli akumulátor termálně ovlivněných elektronů. Jde o elektrodu, která má přibližně o 300 V menší napětí. Přivedením vysokého napětí na anodu, umístěnou v definované vzdálenosti, dochází k uvolnění a urychlení elektronů. Emitované elektrony jsou urychlovány rozdílem napětí mezi katodou a anodou. Dochází ke kontrole proudové hustoty svazku elektronů. Wehneltův válec umožňuje snadnější

ovládání a zaostřování paprsků, než by tomu bylo pouhou regulací zahřívacího proudu. V rámci bezpečnosti je katoda nabíjena záporným napětím a anoda zemněna. [1]



Obr. 4 Schéma emitoru elektronů – W vlákno (vlevo) [20]

Energii elektronového paprsku lze popsat pomocí zákona o zachování energie. Součet kinetické i potenciální energie musí být stejný jak na katodě, tak na anodě. Vystupující elektrony se nepohybují, kinetická energie na katodě je nulová. Ale jejich potenciální energie je dána vztahem  $E_p = eU$ , kde  $e$  je náboj elektronu a  $U$  urychlovací potenciál. Naopak na anodě je potenciální energie nulová a kinetická je rovna vztahu  $E_K = \frac{1}{2}mv^2$ . Jestliže dáme energii potenciální do rovnosti s energií kinetickou, získáváme vztah  $eU = \frac{1}{2}mv^2$ , který po úpravě dosadíme do vztahu 01. Vlnová délka (popsána vztahem 01) záření ovlivňuje hloubku penetrace, platí zde úměrnost čím menší  $\lambda$  tím vyšší hloubka penetrace. Rovnice 02 popisuje vztah pro výpočet tepelného příkonu. [1]

$$[01] \lambda = \frac{h}{mv} \frac{h}{\sqrt{2m_e U}} = \frac{h}{\sqrt{V}} [\text{nm}]$$

$$[02] Q = \frac{EI}{v} = \frac{P}{v} [\text{J/mm}]$$

$V$  (V) – urychlovací napětí

$h$  – Planckova konstanta

$m$  – hmotnost elektronů

$U$  – urychlovací potenciál

$E$  (V) – urychlovací napětí paprsku

$I$  (A) – proudová hustota

$v$  (mm/s) – rychlost sváření

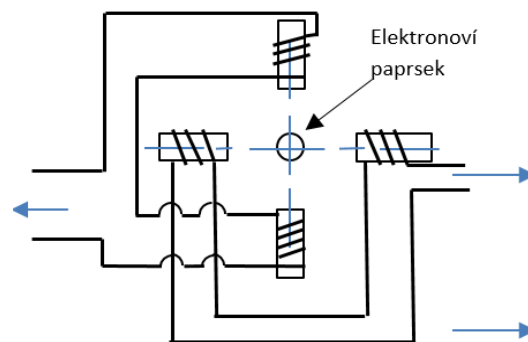
$P$  (W) – příkon paprsku

### 2.2.2. Elektronová optika

Proud urychlených elektronů je usměřován pomocí elektronové optiky, která je tvořena magnetickou čočkou (obr. 5), fokusační cívkou, deflektorem (obr. 6) a případně dalšími

doplňkovými prvky. Cívky vytvářejí elektromagnetické pole, které působí na svazek elektronů jako čočka, kde ohnisková vzdálenost je závislá na energii elektronu, proudu v cívce, ale i designu cívek. Dochází k zúžení svazku a zvýšení proudové hustoty. Velikost výchylky, tedy usměrnění svazku, je definována pomocí proudu v cívce. Jedná se o velmi rychlou a přesnou korekci. Dvě cívky umístěné kolmo na svazek elektronů nám zajišťují polohovatelnost svazku do stran. Přidáním dalších dvou cívek, orientovaných oproti prvním dvěma o 90°, docílíme možnosti nasměrovat paprsek do jakéhokoliv místa v pracovním prostoru. [1, 6]

Dalším prvkem optiky je fokusační cívka. Provádí zaostření svazku. Deflektor je určen k minimalizaci chyb. Nasměruje paprsek do středu čočky. Produktivní je štěpení svazku do několika paprsků, kde můžeme docílit rovnoměrného tepelného ovlivnění součásti. Nesmíme však zapomenout na fakt, že štěpením paprsku ovlivňujeme jeho proudovou hustotu. V této oblasti nalezneme i zařízení sloužící k pozorování přímého průběhu svařování. [1, 6]



Obr. 5 - Magnetické čočky

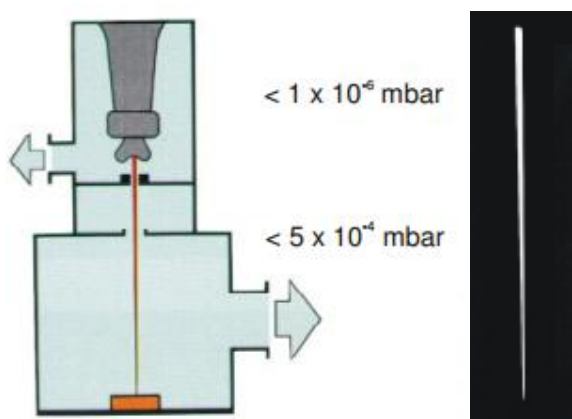


Obr. 6 – Deflektor [21]

### 2.2.3. Pracovní komora

Velikost pracovní komory se přizpůsobuje svařenci. Součástí je pracovní stůl, polohovatelný ve všech osách. Celá komora je těsněna a docíluje se v ní vysokého stupně vakua až  $5 \times 10^{-4}$  Pa, které je důležité pro dosažení kvalitního svaru. Schéma komory spolu se vzniklým

paprskem je zobrazeno na obr. 7. Dosahujeme ho trojstupňovým zapojením difuzní a rotační vývěvy. Rotační vývěva je předstupněm difúzní vývěvy, vytváří nízké vakuum. Obě zařízení jsou dostatečně jednoduchá a výkonná. Nejvíce využívané jsou olejové rotační vývěvy, využívají excentricky uloženého rotoru s lopatkami. Olej slouží jako těsnění, mazivo a zároveň odvádí vzniklé teplo, uvolněné stlačením plynů. Nevýhodou je zde možnost rozpouštění odčerpávaných látek v oleji a jejich následný návrat do čerpaného prostoru. Účinnost zařízení závisí především na tlaku nasycených par použitého oleje. Difuzní vývěva (obr. 8) pracuje na základě platnosti Bernoulliho rovnice. Rychle proudící proud kapaliny či páry strhává molekuly odčerpávaného plynu. Tlak, v oblastech kde kapalina rychle proudí, je nižší než v oblastech pomalého proudění. Rozdíl tlaku v čerpaném prostoru vstřebává plyn a spolu s kapalinou je odváděn z vývěvy. Ve varné části je pracovní kapalina zahřívána k varu a následně je tryskou odváděna do prostoru vývěvy. Směs kapaliny obohacené o molekuly čerpaného plynu zkondenzuje. Pracovní kapalina zpět steče do varné části a plyn je odveden ven z vývěvy. Je nutné chlazení stěny, po které stéká kapalina, chladí se obvykle vodou. Účinnost opět závisí na kvalitě a typu použitého oleje. Nejčastěji využívaný je pak silikonový olej. Vývěvu je nutné umístit vertikálně. Další možností je nahrazení difuzní vývěvy molekulární (turbomolekulární) vývěvou. Konstrukcí je blízká rotační vývěvě, ale nemá lopatky. Pracuje při velmi vysokých otáčkách 16 až 20 000 min<sup>-1</sup>, a proto je daleko citlivější a náchylnější na poškození. Nutností je dokonale vyvážený rotor a uložení hřídele v magnetické levitaci. Tento typ vývěvy je poměrně drahý, ale dokáže rychle vytvořit velmi čisté vakuum a proto je v praxi poměrně rozšířený. [1, 6, 7]

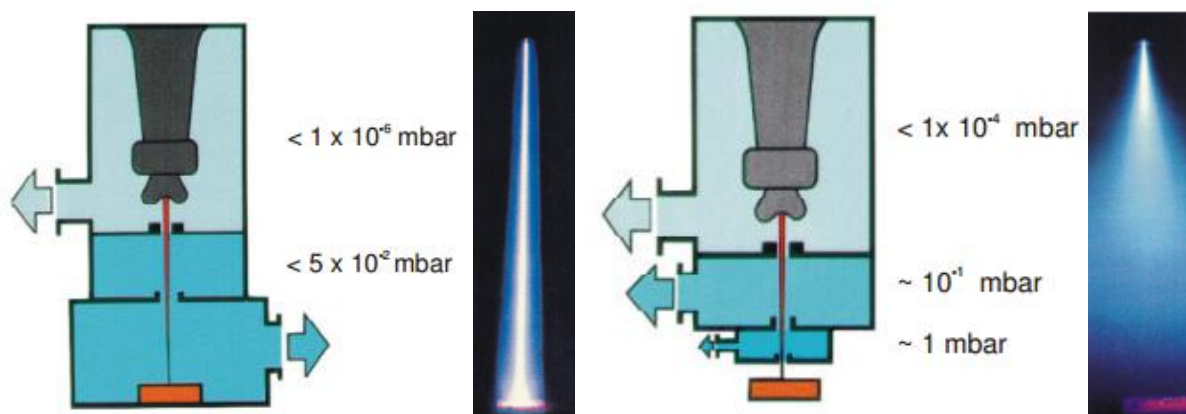


Obr. 7 – Komora s vysokým stupněm vakua a vzniklí [20]



Obr. 8 -Difuzní vývěva [19]

Při tvorbě vakua vznikají nežádoucí prodlevy ve výrobě. Jisté urychlení přineslo rozdělení prostoru svařovacího stroje na dvě komory. Schéma spolu se vzniklým paprsek viz obr 9. V oblasti elektronového děla se nachází první vakuum - pracovní vakuum. V oblasti pracovního stolu nalezneme druhé vakuum, které lze snížit. Dochází tak ke snížení časového limitu dosažení vakua v oblasti svařence tedy i k snížení časových prodlev. Pomocí tzv. airlock systému (systém clon) můžeme oddělit jednotlivé části svářečky. Umožňuje nám mít v pracovní komoře vzduch a v ostatních částech zařízení vysoký stupeň vakua. Vysoké vakuum je tedy pouze v oblasti elektronového děla. Stejného výsledku docílíme i použitím systému clon, které postupně snižují hodnoty vakua. Toho využíváme pouze při extrémních požadavcích na čas sváření a snížených požadavcích na kvalitu svaru. V takovém případě nepoužijeme vakuum ale pouze atmosférický vzduch či ochranou atmosféru. Lze tak svářet i extrémně velké svařence, které se nevejdou do pracovních komor. Na obr. 10 je zobrazeno schéma svařování v atmosférickém vzduchu a vzniklý paprsek. Naopak pro malé komponenty se vyrábějí tzv. mikro komory, které vytvoří potřebné vakuum podstatně rychleji. [1, 6]

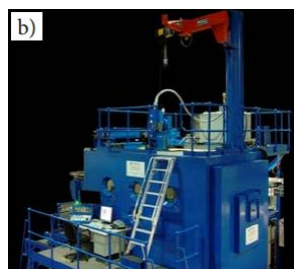
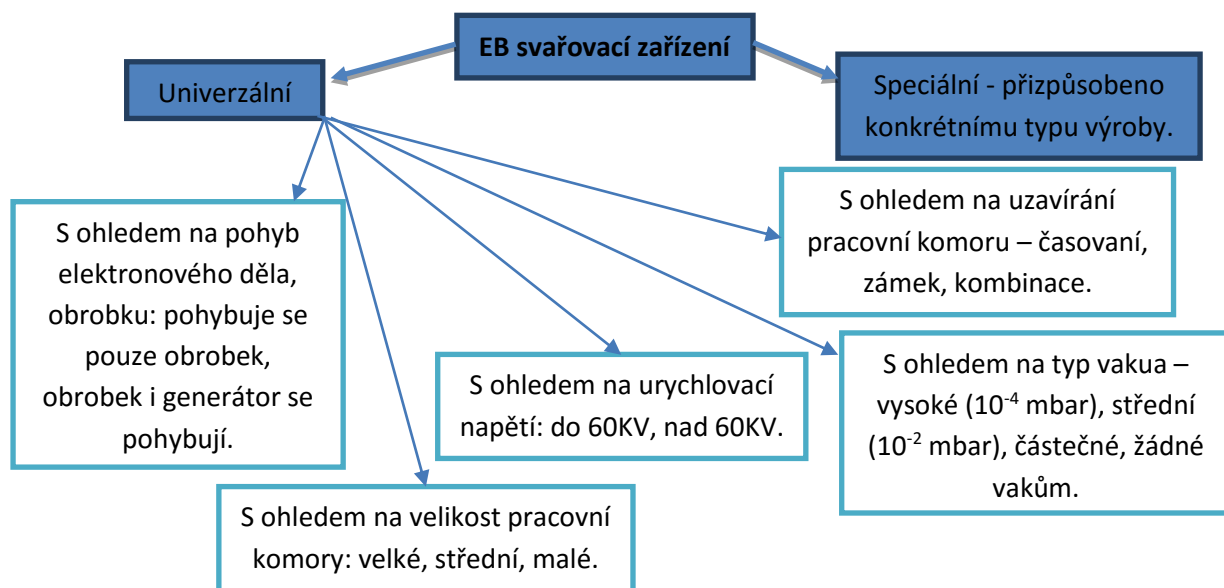


Obr 9 - Komora se středním vakuem a vzniklý paprsek

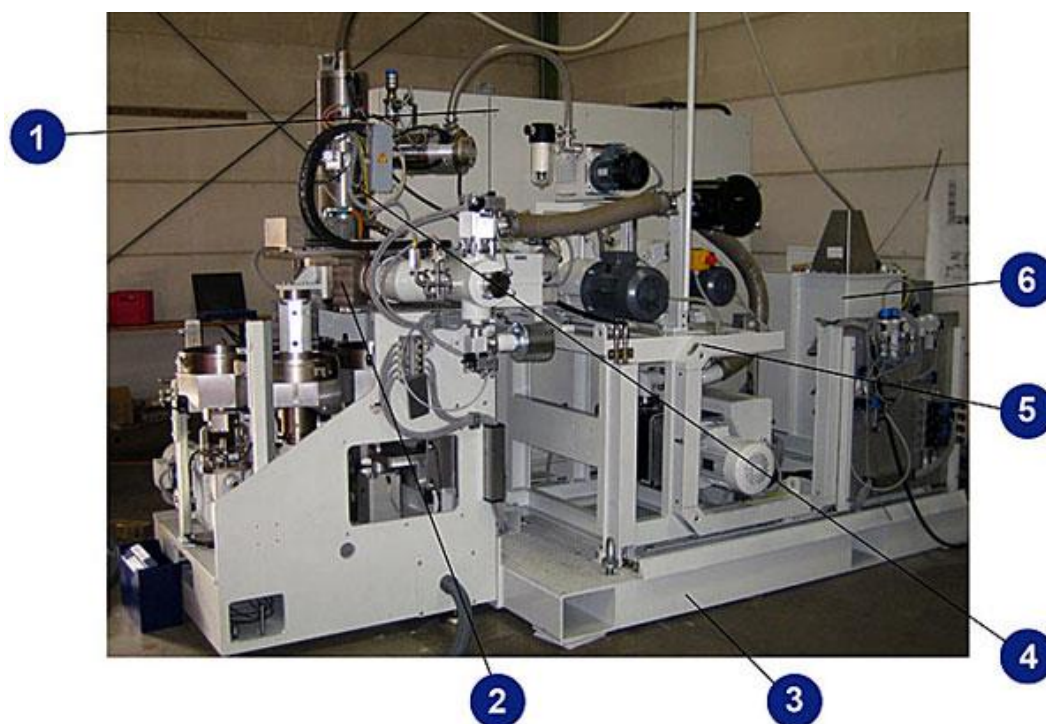
Obr 10 - Komora s atmosférickým tlakem a vzniklý paprsek

#### 2.2.4. Typy svařecích zařízení

Nabídka typu svařecích zařízení je obrovská. Může se jednat o univerzální či speciální zařízení pro daný typ výroby. Volba daného zařízení záleží na mnoha faktorech, zejména pak na materiálu, velikosti, hmotnostech a tvaru svařence. Dále také záleží, zda bude zařízení součástí linky či nikoliv, požadavcích na kvalitu svaru. Na schématu níže je zobrazeno rozdělení svařecích zařízení pro EBW a na obr. 11 jsou znázorněny 3 typy svářeček, s ohledem na velikost pracovní komory. Na obr. 12 je znázorněný obdobný typ svařecího zařízení, na kterém byli vyhodnoceny námi použité vzorky. [5]



Obr 11 – Příklad svářeček s ohledem na velikost pracovní komory a) velká komora b) střední komora c) malá komora [5]



Obr 12 – Zařízení pro EBW I. – 1. – Ovládací část, 2. – vakuová komora, 3. – základní rám, 4. – generátor EB, 5. – vývěvy, 6. – přívod vysokého napětí [33]



S ohledem na výše uvedené faktory obsahuje trh tyto stroje:

- Univerzální vysokotlaková svářečka, s generátorem paprsku, vně či uvnitř pracovní komory.
- Speciální vysokotlaká svářečka pro svařování specifických dílů jako jsou: pásové pily, ozubená kola, turbo-kompresor, rotory.
- Nízkotlaká svářečka s dělenými komorami, vakuum se udržuje pouze v oblasti generátoru paprsku a oblasti navádění paprsku.
- Bez vakuová svářečka, postupné snížení vakua na atmosférický tlak.

U většiny typu zařízení se pohybuje svařenec, existují speciální situace, kde se pohybuje generátor paprsku a svařenec stojí [5]

#### 2.2.5. Automatizace procesu svařování

Moderní svařovací zařízení pro EBW jsou vybavena PLC systémem nebo jsou číslicově řízená. Spolu se systémy kontrol procesu a bezpečnostními prvky nám tyto systémy umožňují automatizaci celého procesu svařování. Ke zvýšení produktivity procesu nabízejí výrobci mnoho přídavných funkcí, mezi které patří např.: automatická korekce paprsku, sledování svařovací plochy kamerou, monitorovací systém svařované plochy s použitím zpětně odražených elektronů, automatická společná osa sledovací systém nebo automatický systém řízení technologických procesů. [5]

### 2.3. Svazek elektronů

S ohledem na volbu daných podmínek a dané parametry se ovlivňuje tvar a rozměry oblasti působení paprsku. U EBW se můžeme setkat se dvěma odlišnými režimy svařování. Režimem vedení tepla a keyhole. [1, 6]

#### 2.3.1. Sváření v režimu vedení tepla

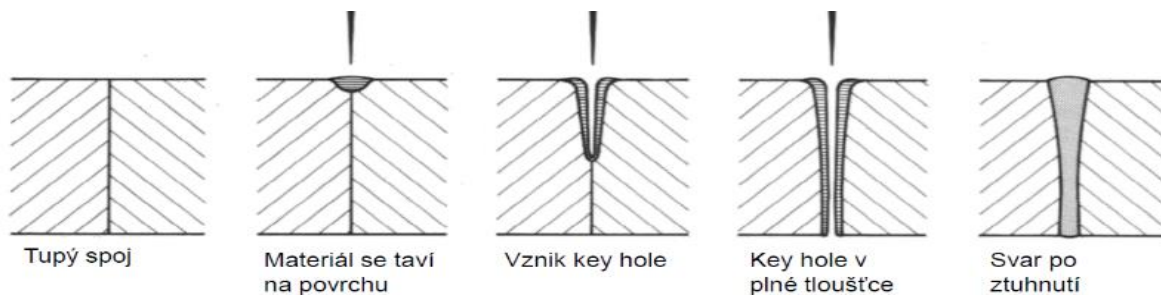
Pro tenké materiály se využívá metody vedení tepla, kde dochází k rychlému tavení materiálu na povrchu a vedením tepla k převarování v celé šířce. Dosahuje se poměrně úzkého svaru díky malému průměru fokusační čočky 0,1 až 0,2 mm a vysoké proudové hustotě. To umožňuje svařovat vysokou rychlostí, proto dochází pouze k malé tepelně ovlivněné oblasti. [1, 6]

#### 2.3.2. Svařování v režimu keyhole

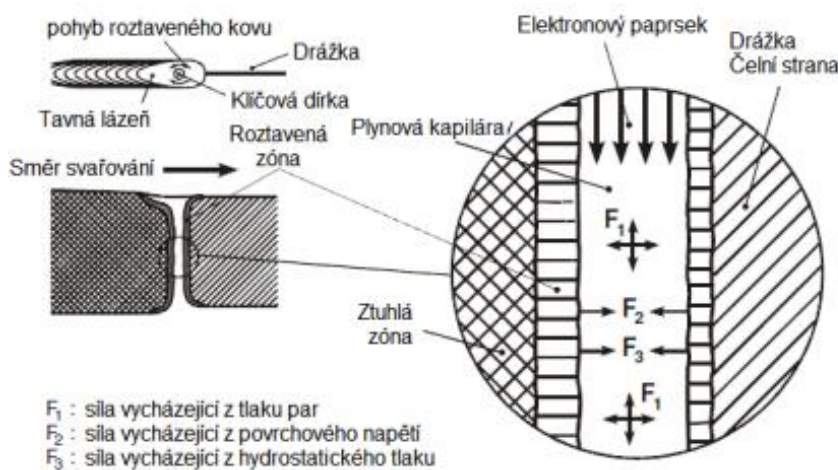
Druhá metoda sváření pomocí tzv. klíčové dírky neboli keyhole se využívá u silnějších materiálů. Ohnisko paprsku je fokusováno do oblasti pod povrchem materiálu. Zde paprsek ještě rovnou penetruje. Jedná se o velmi malou hloubku v řádech  $\mu\text{m}$ . Rychlým odtavením

materiálu v celé hloubce vzniká úzká dírka (kavita). Tlak par způsobený tímto dějem tlačí materiál na stěnu kavity a je v rovnováze s tlakem vzniklým povrchovým napětím. Posouvající se kavita ve směru svařování je obtékána svarovým kovem, který jí následně vyplňuje, čímž vzniká svarový spoj. [1, 6]

Vznik kavity je znázorněn z obr. 13. Vlivem přeměny kinetické energie na tepelnou dojde během několik  $\mu\text{s}$  k dosažení teploty varu kovu. Vytvoří se tenká štěrbin, vyplněná vypařujícím se kovem a nízkým tlakem. Tato štěrbin se postupně prohlubuje. Tímto hluboko-tavným způsobem spolu s využitím dostatečně vysokého urychlovacího napětí lze přetavit materiál až do hloubky 300 mm. Průměr kavity je srovnatelný s průměrem paprsku. Menší část nově odtaveného kovu se vypařuje, větší část vytéká a následně tuhne za kavitou. Tlak vypařujícího se kovu tlačí na roztavený kov. Ten ulpívá na stěny a zaručuje rovnováhu mezi hydrostatickým tlakem a povrchovým napětím. Díky tomu zůstává kavita otevřená. Tento proces je znázorněný na obr. 14. Nepravidelný tvar kavity způsobují špatně zvolené parametry sváření. Díky ochranné atmosféře se snižuje výskyt vměstků. Tímto způsobem lze svářet bez přídavného materiálu až do poměru stran 1:50. [1, 6]

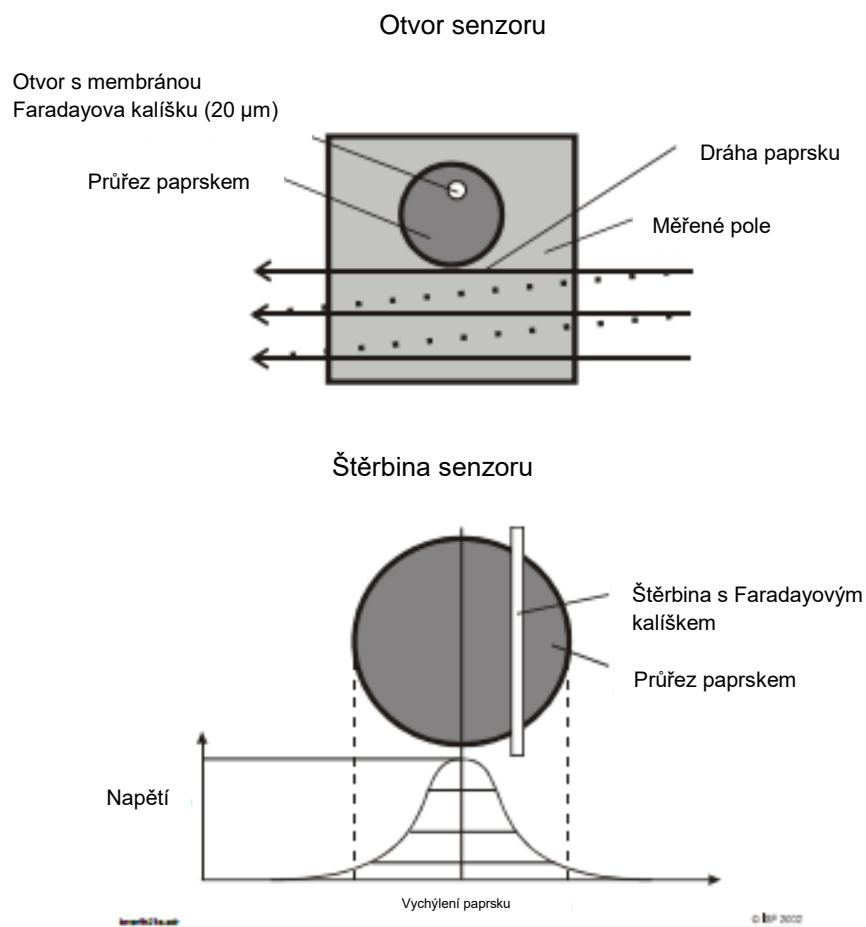


Obr. 13 - Postup při vzniku kavity a spoje

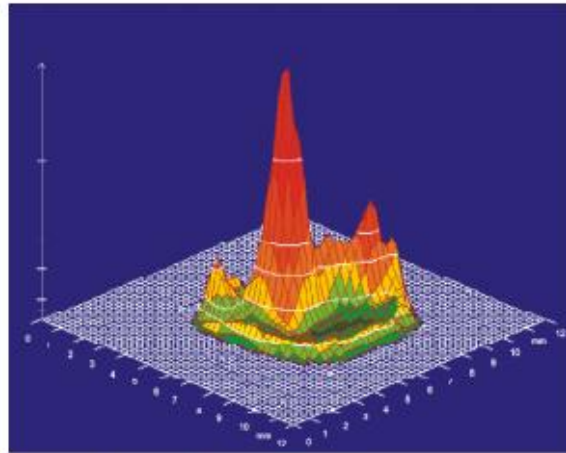


Obr. 14 schématické naznačení podmínek v plynové kapiláře

Abychom byli schopni reprodukovat výrobu svarů, je důležité mít přesné poznatky o geometrii paprsku. Proto jsou zařízení obohacena o měřicí mikroprocesorový systém, který tyto hodnoty zaznamenává. Elektronový paprsek je lineárně naskenován pomocí bodové sondy, která má daleko menší průměr (20 $\mu$ m) než samotný paprsek. Paprsek se nachází uvnitř sondy, jestliže je vychýlen prostřednictvím clon (obr 15). Elektrony, které tečou přes membránu, jsou shromážděny a odkloněny přes přesný rezistor. Doba progrese signálu je na něm zachycena. Odpovídá rozložení intenzity v celé délce skenované části paprsku. Pro získání celkového obrazu hustoty výkonu je paprsek skenován přes senzor pomocí 60 linek. Program vytvoří perspektivní pohled na rozložení hustoty energie v paprsku a také dvou-dimenzionální reprezentaci linek se stejnou hustotou výkonu. Příklad měření elektronového paprsku je znázorněna na obr. 16. Odražené primární elektrony jsou použity k automatickému pozorování svaru, elektronový paprsek je snímán příčně k drážce. Počítač může určit polohu drážky pomocí signálů z odražených elektronů. Tento typ sledovacího systému může být použit buď on-line nebo off-line. [1, 8]



Obr 15 – Schéma sondy pro měřicí mikroprocesorový systém



Accel. Napětí:	150 kV
Proud paprsku:	600 mA
Proud předfokusování:	700 mA
Proud hlavního focusu:	1500 mA
tepla proudu katody:	500 mm
max. hustota:	26,456 kW/mm <sup>2</sup>
ref. hustota:	26,456 kW/mm <sup>2</sup>

*Obr 16 – Měření elektronového paprsku [21]*

Velkým pozitivem EBW je:

- dobrý vzhled svaru
- úzká natavená i tepelně ovlivněná oblast
- svařování na jeden průchod
- možnost svářet i v místech pro běžné technologie nepřístupných
- výborná ochrana svaru před vzdušnou atmosférou
- malé deformace
- vysoká vzdálenost přenosu energie (až 500 mm)
- jednoduchá a rychlá programovatelnost
- svařitelnost široké skupiny materiálů a jejich slitin.

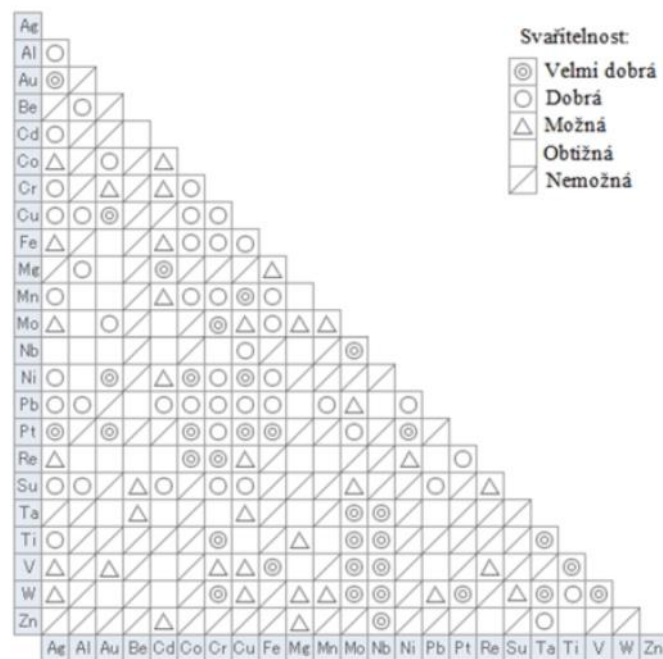
Naopak k nevýhodám patří:

- vysoká cena svařovacího zařízení i jeho složitost
- vysoké nároky na čistotu svarových ploch
- nutnost vakua (ochranné atmosféry)
- vznik RTG záření
- vysoká rychlost chlazení svaru [1, 6]

Kromě svařování lze využít termického účinku urychlených elektronů i u jiných druhů technologie. V zásadě lze rozdělit oblast využití do třech skupit: spojování, povrchové úpravy a obrábění. Do skupiny spojování patří zmíněné svařování, ale i pájení. Z oblasti povrchových úprav pak můžeme zmínit kalení, žíhání, popouštění, přetavování, legování, dispergování a nanášení. Z tváření se jedná o technologie gravírování, vrtání a obrábění. [9]

#### 2.4. Svařitelnost kovů elektronovým paprskem

Svařování elektronovým paprskem je vhodné pro všechny kovy běžně svařitelné tavnou metodou. Jde o podobné nebo různé kovy, které se svařují, pokud jsou metalograficky kompatibilní. Přehled různě svařitelných kovů elektronovým paprskem znázorňuje obr. 17. Jedinou podmínkou svařitelnosti daného materiálu je jeho vodivost a uzemnění, aby nedošlo ke vzniku elektrostatického náboje. Je nutná správná optimalizace použitých parametrů. Pozor si také musíme dát na dostatečnou metalografickou čistotu kovu. [2, 4]



Obr. 17 Vzájemná svařitelnost rozdílných kovů

Svařování oceli nedělá problém, pro více kvalitní ocel se však doporučuje předehřev. Předehřevu lze docílit defokusováním paprsku. V případě neuklidněné ocele je možnost vzniku pórů, trhlin nebo neprůvarů. Konstrukční ocele jsou velmi dobře svařitelné, ale může docházet k vyšší tvrdosti svaru i tepelně ovlivněné oblasti. Proto se někdy doporučuje upravit složení svařovaného kovu přidáním přídavného materiálu anebo po sváření aplikovat žíhací cyklus. Slitinové oceli se běžně svařují bez dalšího zpracování. Všechny druhy nerezových ocelí jsou dobře svařitelné elektronovým paprskem. Lépe se svařují méně pevné litiny oproti

vysoko pevným litinám. Niklové slitiny jsou vhodné pro tento typ svařování. Většina slitin hliníku a hořčíku lze svařovat bez problémů. I měď a její slitiny jsou dobře svařitelné. Také vysokotavitelné a žáruvzdorné litiny jsou svařitelné. Problém může nastat při svařování zinku či pozinkovaných materiálů. Zinek se silně odpařuje a znečišťuje pracovní komoru. Sváření nekovových materiálů není možné, lze je však opracovávat či řezat. [2, 4]

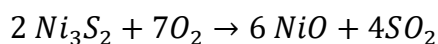
### 3. Materiál turbíny

Obě turbodmýchadla jsou kombinací dvou materiálů. V prvním případě niklové super slitiny s nízkolegovanou ocelí nebo niklové super slitiny s korozivzdornou ocelí v případě druhém. Dochází tedy ke vzniku heterogenního spoje. Heterogenní svarové spoje jsou definovány jako spojení dvou a více různorodých materiálů. Jedná se o spojení materiálů, které se významně odlišují, přesto jsou kladeny nároky na dostatečně pevný spoj bez ovlivnění vlastností základního materiálu. U heterogenního svarového spoje se setkáváme s odlišným chemickým složením, mikrostrukturou, mechanickými vlastnostmi, požadavky na tepelné zpracování po svaření, koeficienty teplotní roztažnosti a také tepelnou vodivostí materiálů. Jestliže budou u použitých materiálů značné rozdíly, můžeme pozorovat nežádoucí praskání. [10]

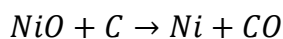
#### 3.1. Nikl a jeho slitiny

Typický kovový ferromagnetický prvek je bílé barvy. Byl objeven roku 1751 německým chemikem baronem Axelem Frederikem Cronstedtem při pokusech o izolaci mědi z rudy. Ve sloučeninách se vyskytuje především v mocenství Ni<sup>+2</sup>, existují i sloučeniny Ni<sup>+1</sup>, zatímco látky obsahující Ni<sup>+3</sup> jsou nestálé a působí silně oxidačně. Je to kov s kubickou plošně centrovanou mřížkou, proto má dobré plastické vlastnosti a tvářením za studena se výrazně zpevňuje. Nikl se především používá pro legování jiných slitiny, zejména korozivzdorných austenitických ocelí, žáruvzdorných vysokolegovaných slitin a celé řadě slitin na bázi niklu. [2, 5, 11]

V čisté podobě se nikl v přírodě nevyskytuje. Vyskytuje se však ve směsi se železem ve formě oxidů (laterit, garnierit), nebo jako sulfid-nikelnato-železitý (pentlandit). Vyrábí se značně složitým procesem, který se skládá ze dvou kroků [14, 15]



Sulfid niklitý reaguje s kyslíkem za vzniku oxidu nikelnatého a oxidu siřičitého.



Oxid nikelnatý reaguje s uhlíkem za vzniku niklu a oxidu uhelnatého.

Získaný nikl se dále čistí pomocí elektrolytické rafinace, kde na anodě zůstává surový nikl a na katodě čistý nikl. Další možností je také Mondův proces, díky kterému lze získat nikl s čistotou až 99,9%. Tímto procesem vzniká sloučenina tetrakarbonyl niklu  $[Ni(CO)_4]$  jako meziprodukt. V tabulce níže jsou uvedeny fyzikální a mechanické vlastnosti niklu pro názornost porovnány s vybranými dalšími materiály. [14, 15]

Tab. 1 Fyzikální a mechanické vlastnosti vybraných materiálů [32, 33, 34]

Mechanické a fyzikální vlastnosti vybraných prvků					
Materiál:	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Teplota tavení [°C]	Mez kluzu [Mpa]	Pevnost v tahu [Mpa]	Tažnost [%]
Nikl	8 908	1453	148	462	47
Titan	4 505	1670	170- 480	240- 550	20-30
Ocel jakostní 11 523.1	7 850	1539	340	510	22
Hliník	2 700	660	60	250	25

Jednou z oblastí použití asi 65 % z vyrobeného Ni, jak již bylo řečeno, je zpracování jako přísadový prvek do slitinových ocelí. Další oblastí využití našel Ni v elektrotechnice, pro výrobu odporových teploměrů nebo jako konstrukční materiál pro ventil sedla a armatury. Zbývajících 25% Ni se používá na výrobu vlastních Ni slitin. [16]

Niklové slitiny mají lepší pevnostní vlastnosti, jsou houževnatější, tvrdší, ale také poměrně drahé. Rozdělují se dle jejich použití na: [2, 11]

#### a) Konstrukční slitiny

Primárně se jedná o tzv. MONELY. Což jsou slitiny s 67% Ni, 30% Cu a nízkým obsahem legujících prvků typu Fe, Mn, Si či Al. Splňují nároky na vysokou pevnost a odolnost vůči korozi.

#### b) Slitiny se specifickými fyzikálními vlastnostmi

- **Magneticky měkké slitiny**
  - Permollay s 80% Ni a 16-20% Fe
- **Termočláňkové slitiny**
  - Chromel s 90% Ni a 10% Cr. Alumel s 90% Ni 9-10% Cr.
- **Odporové slitiny**
  - Nichrom s 80% Ni a 19% Cr.

#### c) Slitiny žárovzdorné a žárupevné

Jedná se o slitiny typu Inconel s 50% Ni, 16- 20% Cr a Nimonic s 50-70% Ni, 15-20% Cr. Někdy bývají nazývány jako niklové super slitiny. Mají výborné pevnostní vlastnosti za vysokých teplot. Používají se při výrobě plynových turbín či motorů.

Přehled složení vybraných komerčních niklových slitin je uveden v tabulce 2. [1]



Tab. 2 vybraná komerční niklové slitiny [23]

		Obsah (hmot. %)													
	Označení	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Al	Ti	Nb	Mn	Si	W	B
1	Monel 400	66,6	0,2			1,2		31,5				1	0,2		
2	Monel 404	54,5	0,08			0,2		44	0,03			0,05	0,03		
3	Monel R-405	66,5	0,2			1,2		31,5				0,1	0,02		
4	Hastelloy F	47	0,05	22	6,5	17	2,5			2	1,5	1	1		
5	Hastelloy X	47	0,10	22	9	18	1,5					1	0,6		
6	Hastelloy G	44	0,10	22	6,5	20	2,5	2		2	1,5	1	1		
7	Nichrome	57	0,10	16		25						1	1		
8	Inconel 600	76	0,08	15,5		8		0,2				0,5	0,2		
9	Inconel 601	60,5	0,05	23		14			1,4			0,5	0,2		
10	Inconel 625	61	0,05	21,5	9	2,5			0,2	0,2	3,6	0,2	0,2		
11	Carpenter 20Nb3	36	0,04	20	2,5	36		3,5			0,5	1	0,5		
12	Incolloy 800	32,5	0,05	21		46			0,4	0,4		0,8	0,5	0,02Mg	
13	Incolloy 825	42	0,03	21,5	3	30		2,25	0,1	0,9		0,5	0,25		
14	Hastelloy B	61	0,05	1	28	5	2,5					1	1		
15	Hastelloy C	54	0,08	15,5	16	5	2,5					1	1	4	
16	Hastelloy D	82	0,10			1	1,5	3				1	9		
17	Hastelloy N	70	0,06	7	16,5	5						0,8	0,5		
18	Hastelloy W	60	0,12	5	24,5	5,5	2,5					1	1		
19	Duranikel 300	96,5	0,15			0,3		0,13	4,4	0,6		0,25	0,5		
20	Waspalloy	58	0,08	19,5	4		13,5		1,3	3				0,06Zr	0,006
21	René 41	55	0,10	19	10	1	10		1,5	3		0,05	0,1		0,005
22	Nimonic 80A	76	0,06	19,5					1,6	2,4		0,3	0,3	0,06Zr	0,006
23	Nimonic 90	59	0,07	19,5			16,5		1,5	3		0,3	0,3	0,06Zr	0,003
24	Udimet 500	54	0,08	18	4		18,5		2,9	2,9		0,5	0,5	0,05Zr	0,003
25	Inconel X750	73	0,04	15,5		7			0,7	2,5	1	0,5	0,2		
26	Inconel 706	41,5	0,03	16		40			0,2	1,8	2,9	0,2	0,2		
27	TD Nikel	98												2 ThO <sub>2</sub>	
28	TD NiCr	78		20										2 ThO <sub>2</sub>	
29	Inconel 718	52,5	0,04	19	3	18,5			0,5	0,9	5,1	0,2	0,2		
30	Inconel X-750	73	0,04	15,5		7			0,7	2,5	1	0,5	0,2		

Většinou přísad zpevňujeme nikl. Můžeme zpevňovat substitučně, precipitačně nebo disperzně. To ale není zcela přesné členění, protože substitučně zpevněné slitiny se dají i dále precipitačně zpevňovat. Zpevňující vliv mají přísady chrómu, mědi, molybdenu, hliníku, kobaltu, titanu, vanadu, wolframu a železa. Široká skupina komerčních slitin, jsou slitiny precipitačně zpevněné zvláště pak skupina žárovevých a žárovzdorných slitin. Pomocí zpevňujícího precipitátu  $\gamma'$ - Ni<sub>3</sub> (Ti, Al). Plošně středěné mřížky, která je schopna v sobě rozpouštět větší množství Nb a Ti. [1, 2]

Niklové super slitiny jsou vyvíjeny zejména pro letecký průmysl a pohonné jednotky. Teploty spalovací komory turbínových motorů se pohybují okolo 2 000°C. V současné době nemáme

k dispozici materiály, které by při této teplotě mohly dlouhodobě pracovat a právě proto jsou vyvíjeny tyto slitiny, které se zmiňované provozní teplotě alespoň přibližují. Vyznačují se však nehomogenitou v mikro oblastech, vysokou segregací a likvací. Hranice zrn jsou oblasti s primárními creepovou degradací materiálu. [2, 17]

Problém s hranicemi zrn je řešitelný řízenou krystalizací slitiny. Například u lopatek turbín, může být postup tuhnutí veden, tak aby se jako první vytvořili sloupcové (kolumnární) krystaly kovu po celé délce. Docílíme tím orientace zrn ve směru podélné osy, zde převládá odstředivé napětí složky síly, hranice zrn jsou proto namáhány minimálně či vůbec. Díky tomu mají tímto způsobem vyrobené lopatky vyšší creepové vlastnosti a dovolují použití při vyšších teplotách asi o 30°C. Dalšího navýšení teploty zhruba 30 až 50°C docílíme odléváním lopatek z monokrystalu, kde nejsou hranice zrn. Dále zvýšením odolnosti proti oxidační a korozní degradaci, které vzniká na povrchu lopatek, zabraňujeme ochrannými vrstvami. [2, 17]

### 3.1.1. Svařitelnost niklových slitin

Jedná se o technologickou vlastnost, která hodnotí vhodnost kovů pro dané svarové spoje, požadované jakosti a konstrukční spolehlivosti. Je ovlivněna chemickým složením, metalurgickými způsoby výroby, způsobem lití a tváření a také tepelným zpracováním. Lze shrnout, že se jedná o vhodnost materiálu na svařování za daných technologických a konstrukčních podmínek. Svařitelnost kovů je různá, nalezneme jí v příslušných materiálových listech. [3]

- *Slitiny Ni-Cr se dobře svařují a používají se při vyšších teplotách kvůli dobré oxidační a korozní odolnosti. Je však potřeba ochrana inertní atmosférou.*
- *Slitiny Ni-Cu se velmi dobře svařují, jsou tažné a houževnaté.*
- *Ni-Fe-Cr se velmi dobře se svařují, slitiny nacházejí uplatnění u součástí, kde je potřeba dobrá korozní a oxidační odolnost.*
- *Slitiny Ni-Mo mají dobrou svařitelnost a vyznačují vysokou korozní odolností.*

Svařitelnost niklu je primárně ovlivněná přísadovými prvky. Niklové super slitiny jsou svařitelné po rozpouštěcím žihání, přesto však dochází k ovlivnění svařované oblasti na teploty stárnutí. Dochází ke pnutí, což vede ke vzniku trhlin. Proto slitiny zpevněné větším množstvím Al jsou náchylné na praskání, avšak přísada Ti a Nb může mít opačný efekt. Svařitelnost niklu disperzně zpevněného oxidem tória ThO<sub>2</sub> je náchylný na možnou koagulaci oxidu. Disperzita oxidu se nemění při svařování v pevném stavu. [2]

Tepelná vodivost niklu a niklových slitin s mědí je vyšší, proto dochází k rychlému ohřevu, to vyžaduje použití vyššího tepelného příkonu. Naopak slitiny niklu s chromem anebo Ni-Cr-Fe mají nízký koeficient tepelné vodivosti. Podobně je na tom i koeficient tepelné roztažnosti Ni-slitin, to ovlivňuje svařovací napětí. [17]

Nižší hodnoty teploty tavení Ni-slitin (okolo 1 400 °C) mohou mít za následek nižší hodnoty tepelného příkonu sváření. Interval tuhnutí (likvidus-solidus) může být také užší než u konstrukčních slitin. To má vliv na vývoj termálního napětí a na náchylnost na praskání během krystalizace. Kovy s kubickou plošně středěnou mřížkou jsou všeobecně náchylné na horké praskání. Interval tuhnutí je proto významným faktorem při tomto praskání. [17]

Niklové slitiny je vhodné svářet obloukem, odporem, třením, elektronovým paprskem a v malých hloubkách i laserovým paprskem. Při sváření elektronovým paprskem vysokými rychlostmi se mohou vyskytovat problémy s pórováním a horkými prasklinami. Je třeba optimalizovat použité parametry. Při volbě příliš velké rychlosti svařování nemusí stihnout všechny plyny vyplavat na povrch, a proto zůstane svar pórovitý. Horké trhliny se odstraňují opakovaným ohřevem, který ale také způsobují náchylnost na praskání. Lepšího výsledku docílíme aplikací tzv. kosmetického svaru. Před svařováním se doporučuje rozpouštěcí žihání. [17]

### 3.1.2. Slitiny Inconel 713 C

Super slitina Inconel 713C je jednou z nejstarších vysoce legovaných slitin na bázi niklu, používá se od 50. let minulého století. Díky zajímavému poměru ceny a mechanických vlastností se stále v technické praxi používá. Nižší cena je zapříčiněna nižším obsahem vzácných prvků. Tato slitina se řadí do skupiny litých niklových super slitin. Je zpevněna koherentními precipitáty Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>AlTi. Vyznačuje se nejvyšší vysokoteplotní korozní odolností. Mez pevnosti převyšuje slitiny typu Waspaloy, nicméně se to projevuje malou plasticitou (A ≈6%), což vede ke křehkému praskání. Ve skutečnosti je však považována za slitinu s nižší svařitelností ze skupiny niklových super slitin. Chemické složení je patrné z tabulky. [18, 19, 20, 21]

Tab. 3 – Chemické složení Inconel 713 C

Chemická analýza v %															
Si	Mn	NB	S	Al	B	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Zr	P	C	Ti	Ni
0,50	0,25	1,8-2,8	0,02	5,5-6,5	0,005-0,015	1,00	12,0-14,0	0,50	2,50	3,8-5,2	0,05-0,15	0,02	0,08-0,20	0,5-1,0	Rest
0,02	0,02	2,50	0	5,90	0,01	0,10	13,10	0,02	0,20	4,60	0,10	0,01	0,14	0,80	Rest

Tab. 4 – Mechanické vlastnosti Inconel 713 C

Mechanické vlastnosti				
	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A5 .	HV HV
Test temp.	RT	RT	RT	
reference	min 690	min 760	min 3,0	300-450
actl.	866,00	1041,00	3,90	375-410

### 3.1.3. Slitina MAR M 246

Super slitina MAR M 246 je o něco mladší a používá se zhruba od 70. let minulého století. A stejně jako Inconel 713C je pro dobrý poměr ceny a mechanických vlastností stále v technické praxi hojně využíván. Pozorujeme u ní však o něco lepší mechanické vlastnosti než u Inconelu 713C. Chemické složení je patrné z tabulky. Tato slitina se také řadí do skupiny litých niklových super slitin. Je zpevněna koherentními precipitáty Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>AlTi a využívá se výše zmíněné řízené krystalizace. Hlavní oblastí využití je u vysokoteplotně namáhaných součástek. Docílujeme výborných mechanických vlastností za vysokých teplot a výbornou korozní a oxidační odolností. Tyto vlastnosti mají však za následek velmi obtížnou obrobiteľnosť tohoto materiálu. [18, 19, 20, 21]

Tab. 5 – Chemické složení MAR M246

Chemická analýza v %															
Si	Mn	W	S	Al	B	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Zr	Ta	C	Ti	Ni
0,20	0,20	9,00- 11,00	0,01	5,25- 5,75	0,01- 0,02	9,0- 11,0	8,00- 10,00	0,10	1,00	2,25- 2,75	0,03- 0,08	1,25- 1,75	0,13- 0,17	1,25- 1,75	Rest
0,03	0,02	10,02	0,00	5,53	0,02	10,00	9,15	<0,1	<0,1	2,46	0,05	1,53	0,15	1,46	Rest

Tab. 6 – Mechanické vlastnosti MAR M246

Mechanické vlastnosti				
	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A5 .	HV HV
Test temp.	RT	RT	RT	
reference	min 690	min 760	min 3,0	300-450
actl.	946,00	1090,00	3,00	386-397

### 3.2. Nízkolegované oceli

Do skupiny nízkolegovaných ocelí patří oceli, které obsahují do 5% legur. Legujícími prvky potom jsou Cr, Mn, Si, Mo, V, Ni. Jedná se o největší skupinu ocelí. Mají vyšší pevnost oproti uhlíkovým ocelím i vyšší prokalitelnost. Jsou vhodné k tepelnému zpracování. [22]

#### 3.2.1. Svařitelnost nízkolegovaných slitin

S ohledem na chemické složení CrMo a CrMoV nízkolegovaných ocelí je jejich svařitelnost limitovaná. Jsou náchylné na vznik prasklin. Mají vysokou vrubovou citlivost, proto se doporučuje předehřev i tepelné zpracování po sváření. Někdy se doporučuje i mezižihání. [4]

#### 3.2.2. Ocel 42CrMo4+QT

Materiál 42CrMo4 patří do skupiny nízkolegovaných chrommolybdenových ocelí. Označení +QT znamená, že je již v ušlechtilé formě. Chemické složení je uvedeno v tabulce 7. Dále pak mechanické a fyzikální vlastnosti v tabulce 8. Jedná se o ocel s vyšší prokalitelností, proto se využívá pro více namáhané strojní díly. [22]

Tab. 7 – Chemické složení 42CrMo4

Chemické složení 42CrMo4						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,38 - 0,45	max 0,4	0,6 - 0,9	max 0,025	max 0,035	0,9 - 1,2	0,15 - 0,3

Tab. 8 – Mechanické vlastnosti 42CrMo4

Mechanické vlastnosti 42CrMo4 s jmenovitým průměrem do 16 mm				
	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A5 .	HV HV
Test temp.	RT	RT	RT	
reference	900	1100	10 - 14	340 - 490

### 3.3. Korozivzdorné oceli

Do skupiny korozivzdorných ocelí patří vysoce legované oceli, které obsahují nejméně 12% chrómu. Dalšími legujícími prvky pak jsou Mo, Ti, Ni, Cu, Al. Rozdělují se dle struktury na feritické, martenzitické, austenitické a dvoufázové. Vyznačují se dobrou inherentní korozní a tepelnou odolností, dále vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti a také nízkou magnetickou permeabilitou. Pomocí EBW lze svařovat korozivzdorné oceli o tloušťce od 0,5 až do 40 mm [23, 24]

### 3.3.1. Svařitelnost korozivzdorných slitin

Poloferitické korozivzdorné oceli (0,04% C, 17% Cr) jsou náchylné na křehnutí zrn v oblastech okolo 1150 °C. Vyznačují se špatnou pevností a tvárností. Jsou náchylné na mezikrystalickou korozi. Odolnost proti mezikrystalické korozi spolu mechanických vlastností lze obnovit tepelným zpracováním po svařování. Feritické korozivzdorné oceli (0,02% C, 17-30% Cr, stabilizované Ti, Nb) jsou také náchylné na křehnutí zrn v oblastech okolo 1150 °C. Vyznačují se však uspokojivou pevností a tvárností a jsou nenáchylné na mezikrystalickou korozi. Martenzitické korozivzdorné oceli jsou náchylné na trhliny za studena. Zpravidla se doporučuje předehřev a tepelné zpracování. Vyznačují se vysokou tažností a dobrou pevností, především u ocelí s nižším obsahem uhlíku. Austenitické korozivzdorné oceli jsou náchylné na trhliny za tepla. Vyznačují se dobrou odolností proti mezikrystalické korozi u nízkouhlíkových a stabilizovaných ocelí dále také výbornou pevností a tvárností. Dvoufázové korozivzdorné oceli jsou náchylné k trhlinám za tepla. Vyznačují se výbornou pevností a dobrou tvárností v oblastech od -40 ° až do 275 °C. Jsou však náchylné na křehnutí v teplotních oblastech od 500°C do 900°C. [4, 24]

### 3.3.2. Ocel X22CrMoV12

Materiál X22CrMoV12 patří do skupiny martenzitické korozivzdorné oceli. Jeho chemické složení je uvedeno v tabulce 9, dále pak mechanické a fyzikální vlastnosti v tabulce 10. Díky svým vlastnostem nachází využití zejména u vysokoteplotně namáhaných součástí například v leteckém průmyslu.

Tab. 9 – Chemické složení X22CrMoV12

Chemické složení X22CrMoV12								
C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V
0,18-0,24	max 0,5	0,4 - 0,9	0,3 - 0,8	max 0,025	max 0,015	11 - 12,5	0,8 - 1,2	0,25 - 0,35

Tab. 10 – Mechanické vlastnosti X22CrMoV12

Mechanické vlastnosti X22CrMoV12				
	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A5 .	HBV HBV
Test temp.	RT	RT	RT	
reference	600	800 - 950	14	302

## 4. Metalografie

Mluvíme-li o metalografii, je tím myšlena nauka o struktuře materiálu. Často potřebujeme provést kontrolu, zda má určitý výrobek požadovanou strukturu a potřebné mechanické vlastnosti. Sledují se změny, ke kterým v materiálu dochází vlivem teploty. Pozoruje se vliv času, objemové a deformační změny, vlastnosti mechanické i chemické. [2, 25]

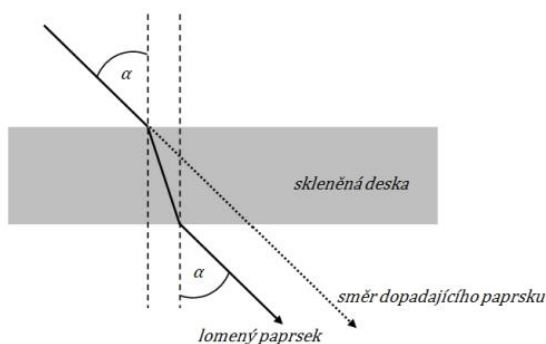
### 4.1. Metalografické mikroskopy.

Základní metodou analýzy změny struktury je optická metalografická mikroskopie, pozorování struktury mikroskopy. Tato metoda umožňuje pozorovat a hodnotit strukturu v rovinách řezu a to řádově  $10^3$  až  $10^6$  nm (zvětšení 100 až 2000 x). Pozorovaná struktura se označuje mikrostruktura. Využíváme úzké souvislosti mezi mikrostrukturou vzorku s vlastnostmi. Existují fáze, které se nacházejí pod rozlišovací schopností světelného mikroskopu. V těchto případech používáme elektronové mikroskopy, rentgenové mikroskopy nebo difrakční fázovou analýzu atd. [2, 25]

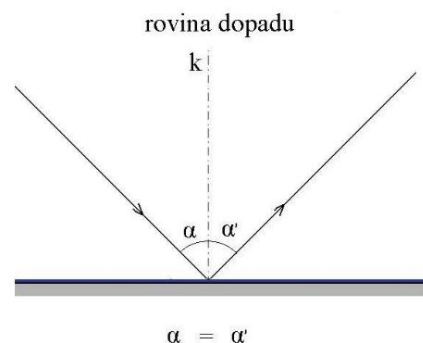
#### 4.1.1. Optická mikroskopie

Světelné mikroskopy se skládají ze zobrazovací a osvětlovací soustavy. Ideální zdroj světla by měl být bodový, monochromický a dostatečně intenzivní. Používají se žárovky, obloukové lampy a výbojky, které však splňují potřebné parametry jen částečně. [2, 25, 26,]

Zobrazovací soustava je tvořena dvěma soustavami čoček objektivem a okulárem. Podle způsobu zobrazování rozdělujeme objektivy na čočkové a zrcadlové (reflexní). Čočkové mikroskopy fungují na principu lomu světla (obr. 18), kdežto reflexní na odrazu (obr. 19). Čočkové objektivy lze dále dělit dle odstraněných optických vad na achromatické, planachromatické, semiachromatické a sférické. Protože reflexní objektivy žádné optické vady nemají, dělíme je na solidní reflexní objektivy a zrcadlové objektivy. [2, 25, 26,]



Obr. 18 - Princip lomu světla [36]



Obr. 19 - Princip odrazu světla [36]

Výhodou je možnost pozorování vzorků vysoké teploty, způsobené velkou pracovní vzdáleností. Okulárem pozorujeme vzniklý převrácený obraz. Skládá se ze dvou čoček, kolektivu a oční čočky. Podle jejich uspořádání rozlišujeme Huygensův okulár a Ramsdenův okulár. [2, 25, 26]

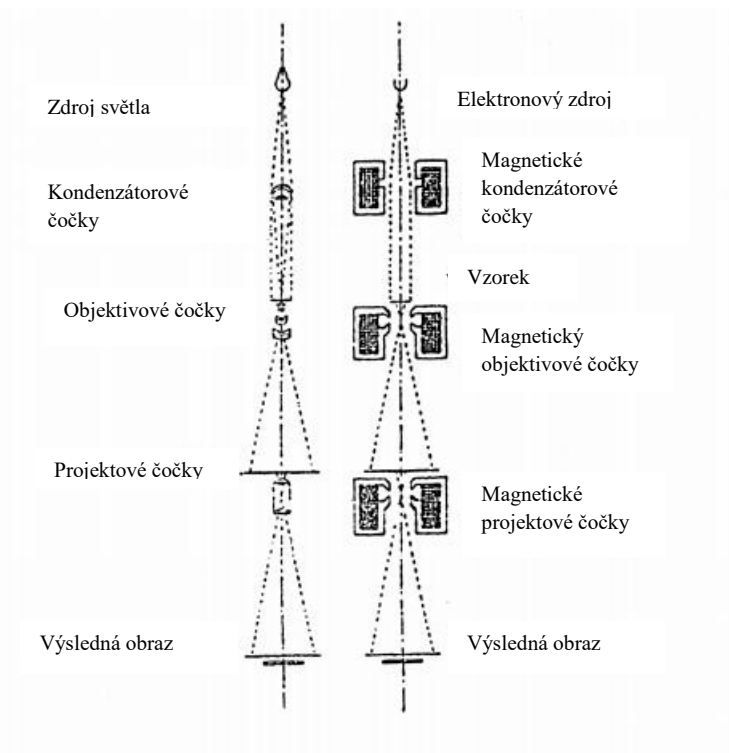
#### *Charakteristické hodnoty světelného mikroskopu*

Základními charakteristickými vlastnostmi mikroskopů jsou zvětšení, číselná aparatura a rozlišovací schopnost. Zvětšení vychází ze základních fyzikálních zobrazovacích vlastností čoček. Číselná aparatura mikroskopu je dána vztahem  $A = n \cdot \sin \alpha$ , kde  $n$  je index lomu a  $\alpha$  je poloviční otvorový úhel. Rozlišovací schopnost, je schopnost rozeznat vzdálenost dvou od sebe vzdálených různých bodů. Vypočítá se ze vztahu  $d = \frac{\lambda}{A}$ , kde  $d$  je daná rozlišovací schopnost v  $\mu\text{m}$  a  $\lambda$  je vlnová délka světla opět v  $\mu\text{m}$ . Užitečným zvětšením rozumíme zvětšení potřebné k rozlišení všech detailů. Je dáno vztahem  $Z_{už} = \frac{d_1}{d}$ , kde  $d_1$  je maximální rozlišovací schopnost pozorovatele a  $d$  maximální rozlišovací schopnost mikroskopu. [2, 25, 26]

#### 4.1.2. Elektronová mikroskopie

V současné době je bohatě využívaná vysoká rozlišovací schopnost elektronového mikroskopu, ale také analytické schopnosti elektrónové mikroskopie. Umožňují snadný přechod od velmi malých zvětšení (50x) až do velkých zvětšení (500 000x). Elektronová mikroskopie pracuje na stejném principu jako EBW. Porovnání elektronového mikroskopu se světelným je patrné z obr. 20. Skleněné čočky jsou nahrazeny magnetickými, jejichž magnetické pole působí na paprsek elektronů. Hlavní výhodou elektronového paprsku je o několik řádů kratší vlnová délka (například 0,0025 nm při urychlovacím napětí 200 kV). I rozlišovací schopnost elektronového mikroskopu je podstatně lepší než u světelného. Nevýhodou pak stejně jako u EBW potřebné vakuum. [27, 28]





Obr. 20 Porovnání elektronového mikroskopu se světelným [27, 28]

## 4.2. Metalografický vzorek

Mezi základní požadavky patří získat vzorek stejných vlastností, jako má analyzovaný materiál a také musí obsahovat všechny informace potřebné k analýze. Před pozorováním struktury je potřeba vzorek dále upravit broušením, leštěním a leptáním. Pozorovaná plocha musí být dokonale rovná a bez deformace, poškrábání, vydrolení, vnesených cizích elementů, rozmazání, reliéfů nebo zaoblených hran a bez tepelného ovlivnění. Postup přípravy vzorku můžeme rozdělit na odebrání vzorku, preparování, broušení, leštění a vyvolání struktury. [25, 26]

### 4.2.1. Odebrání vzorku

Vzhledem k tomu, že pozorujeme strukturu materiálu jen v daném řezu, je základním faktorem ovlivňující výsledek metalografické analýzy, způsob a místo odběru vzorku. Je nezbytně nutné řádně označit kus pro výbrus ale i část, která zůstane, stejným číslem. Je možné použít celou řadu metod obrábění, jako je řezání rozbrušovací pilou (obr. 21), stříhání, frézování, soustružení, řezání plamenem atd. Pokud však nechceme dále tepelně ovlivnit daný vzorek, je vhodné použít metodu abrazivního rozbrusu za mokra. [25, 26]



*Obr. 21 Přesná kotoučová pila na rozbrus*



*Obr. 22 Automatické zařízení pro zalisování vzorků za tepla*

#### 4.2.2. Preparace

Po odebrání vzorku následuje jako další operace preparace. Účelem preparace je usnadnění a urychlení přípravy vzorků. Jedná se o potřebnou operaci, pokud je malý, má komplikovaný tvar nebo je křehký. Před samotnou preparací je potřeba vzorek důkladně očistit a zbavit ho veškeré mastnoty a jiných cizích látek. Jako čistící prostředek se používají mýdlové roztoky vody či směs vody s 10% alkoholu. Nežádoucím doprovodným prvkem může být korozní napadení vzorku. V současné době patří mezi nejrozšířenější způsoby preparace lisováním za tepla. Zařízení pro preparaci za tepla je na obr 22. Vzorek je zpracován za tepla a pod vysokým tlakem v automatickém či poloautomatickém lisovacím zařízení. Jako lisovací materiály se používají buď reaktoplasty či termoplasty. Nejčastěji pak reaktoplastová živice. Tato metoda, je vhodná pro malé vzorky. Okolo správně zalisovaných vzorků musí být dostatečně velké prázdné místo. Zalévání za studena, je druhou možností preparace. Vzorek je vložen do nádoby a následně zalit, odměřenou směsí živice s vytvrzovací tekutinou. Teplota směsi se pohybuje v rozmezí od pokojové teploty až do 150 °C. Doba tuhnutí směsi je různá od několika minut po hodiny. Důležité je i označení jednotlivých vzorků. Nesmí dojít k poškození sledované oblasti. Označení se tedy vkládá na druhou stranu preparovaného vzorku, či na bok. [25]

#### 4.2.3. Broušení a leštění

Další operací je broušení a leštění, jejímž cílem je dosáhnout minimální nerovnosti a povrch bez rýh. Mechanické broušení i leštění realizujeme na ručních, poloautomatických nebo automatických bruskách, za sucha (pouze pro ruční broušení) nebo za mokra. Ruční brusku si můžete prohlédnout na obr 23, automatickou brusku poté na obr 24. Operace lze spojit. Nejprve používáme brusné papíry a následně leštění filcovou podložkou, na kterou naléváme emulzi. Nejčastěji se používá diamant, karbid boru, karbid křemíku či oxid hlinitý. Je kladen důraz na rovnoměrný odběr materiálu. Vzorek musí ležet celou plochou na podložce. Vzorkem pohybujeme stále v jednom směru. Brusná zrna mohou být rozptýlená nejen v tuhém, ale i polotuhém nebo tekutém prostředí. Tuhé prostředí (brusné kotouče, papíry a pláty) umožňuje použití vysokých otáček (5-20 m/s). U brusných papírů postupujeme od hrubých k jemným se zrnitostí 60, 120, 320, 500, 800, 1200 a 2500, kde čísla udávají počet zrn na 1 cm<sup>2</sup>. Mezi polotuhá či tekutá prostředí patří brusné pasty a tekutiny, jsou vhodné pro nižší otáčky (do 5 m/s). Dobře odvádí vzniklé teplo i obrus a rovnoměrně rozptylují brusivo po celém kotouči. [13, 25, 26]

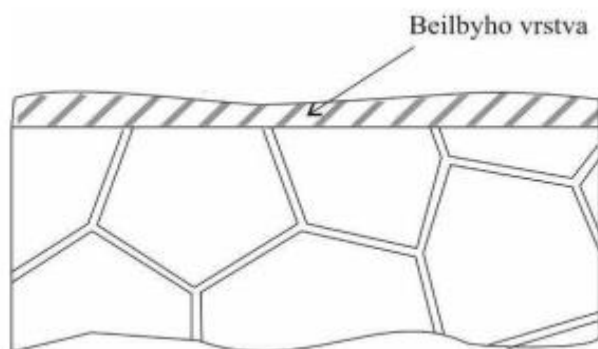


Obr. 23 mechanická bruska Straus



Obr. 24 Automatická bruska Straus

Při vysokém množství vzorků, je výhodnější použít automatickou přípravu vzorků. Vzorky jsou upnuty do unašečů a je na ně vyvíjen předem nastavený tlak. Zpravidla se používají 2 brousící papíry a 2 leštící. Na povrch se přilévá emulze. Nejvýhodnější brusné podmínky volíme zejména podle tvrdosti vzorku. Leštění nesmí trvat příliš dlouho. Nastaví se parametry, které vedou ke vzniku pouze tenké Beilbyho vrstvy (Obr. 25). Ta se následně odstraní leptáním. [25, 26]

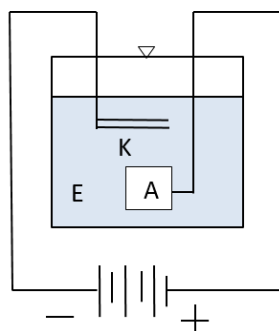


Obr. 25 Beilbyho vrstva [35]

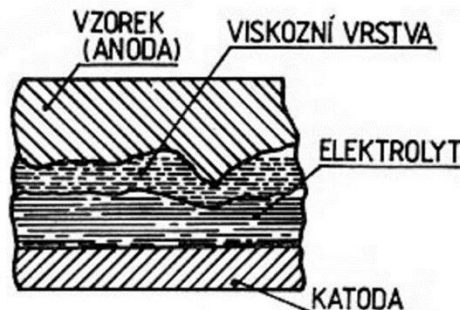
Samotné leštění pak tedy lze rozdělit na již zmíněné mechanické (ruční, poloautomatické, automatické) dále chemické, elektrolytické a jejich kombinace nebo podle druhu lešticí pasty na diamantové a oxidické. [25, 26]

Princip elektrolytického leštění spočívá v ponoření vhodně připraveného vzorku do elektrolytu a zapojení ho jako anodu. Katodou jsou nerezavějící oceli. Vzdálenost elektrod je závislá na velikosti vzorku. Schéma zařízení popisuje obr. 26. Působením stejnosměrného proudu po určitý čas, dojde k vytvoření tenkého viskózního filmu tzv. anodického filmu. Tloušťka filmu není ve všech oblastech vzorku stejná. V místech prohlubní je větší, v oblastech nad výstupky nižší, viz obr. 27. Výsledkem je vyšší proudová hustota v místech nad výstupky a ty se rychleji rozpouští. Výsledek leštění je závislý na mnoha faktorech, zejména pak na proudových podmínkách, chemickém složení elektrolytu i materiálu, době leštění, teplotě leštění a oblasti umístění vzorku v elektrolytu. Elektrolyty mají kyselý či zásaditý charakter. Kyselým charakterem se vyznačují roztoky kyseliny chloristé, sírové či fosforečné a zásaditý charakter roztoky hydroxidů alkalických kovů či kyanidů. Vzhledem k požadavkům na stabilní anodický film, se snažíme potlačovat proudění elektrolytu. Podle jeho typu se volí adekvátní teplota lázně. Správnou volbu proudové hustoty pro daný vzorek v daném elektrolytu lze ověřit charakteristikou, závislosti proudové hustoty na napětí. Na obr. 28 je pro představu znázorněná křivka leštění mědi. V oblasti mezi body 1-2 dochází k prudkému nárůstu proudové hustoty se zvyšujícím se napětím. V oblasti 2-3 stále stoupá napětí, ale proudová hustota již klesá. Pro okamžik 3-4 zůstává stejná. Zde dosahuje proudová hustota optimálních podmínek, probíhá leštění. Následně 4-5 dochází k tvorbě bublinek, které přilínají na povrch anody a izolují ji. Leštění již neprobíhá. Tento typ leštění je mnohem kvalitnější než leštění mechanické. Nedochozí ke vzniku nežádoucí Beilbyho vrstvy. Proto je tento způsob vhodný pro měkké materiály, kde je vysoká náchylnost na vznik Beilbyho

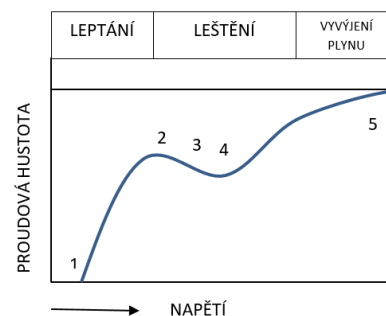
vrstvy. Nevýhodou je naleptání struktury vzorku a také nemožnost použití u všech materiálu. [2, 6]



Obr. 26 Schéma zařízení  
mědi



Obr. 27 Viskózní film [34]



Obr. 28 Charakteristika

Třetím typem je leštění chemické, svým způsobem se jedná o elektrolytické leštění bez elektrické energie. Stejného účinku docílíme v elektrolytu elementárními elektrochemickými články, které vznikají na povrchu vzorku. V případě neuspokojivých výsledků, lze typy leštění kombinovat, nejčastěji leštění mechanické s elektrolytickým nebo mechanické leštění s chemickým leptáním. [25, 26]

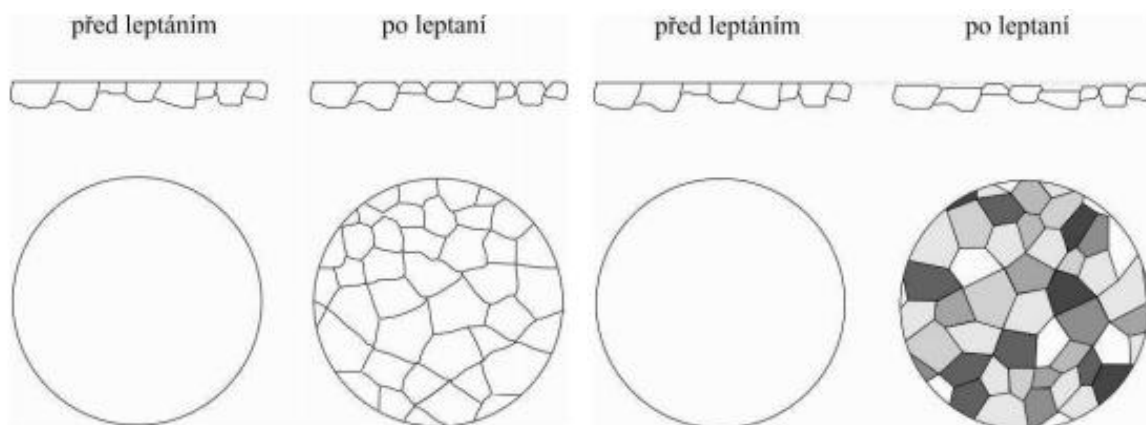
#### 4.2.4. Zviditelňování struktury

Po leštění následuje dokončovací operace zviditelňování struktury povrchu. Pokud bychom chtěli vyhodnocovat vyleštěný vzorek, viděli bychom pouze případné dutiny, nekovové vměšky či jiné nehomogenity. Pro pozorování struktury potřebujeme odstranit tenkou Beilbyho vrstvu a zviditelnit strukturu. Používají se tyto typy vyvolání struktury: chemické leptání, elektrolytické leptání, leptání okysličovaným povrchem vzorku během ohřevu (napouštění), tepelné leptání, vyvolání struktury pomocí magnetické suspenze, reliéfní leštění a napouštění. Nejčastěji se leptá chemicky. Ponořením vzorku do leptadla či vatou, kterou držíme v pinzetě, namáčíme do leptadla a potíráme vzorek. Dochází k působení chemických činidel na vyleštěnou plochu. Chemické složení leptadla záleží na leptaném materiálu. V tabulce 7 jsou uvedeny příklady leptadel pro vybrané neželezné kovy a jejich slitiny. Nejčastějším leptadlem pak bývá roztok kyseliny dusičné v alkoholu Marble. Rozlišujeme potom chemické leptání na hrabice zrn (obr 29) nebo plošné (obr 30). Na hranicích zrn dochází k naleptání důsledkem větší volné energie atomů než v oblastech plochy krystalů. U plošného chemického leptání vlivem různé rozpustnosti jednotlivých strukturních částí, docílujeme vzniku reliéfu. Následně oxidy nebo jiné sloučeniny, tyto části pigmentují. Stupeň naleptání pozorujeme podle zmatnění povrchu. Dopadající paprsky následně vytváří na

hranicích zrn stíny, které lze pozorovat. Po dokončení leptání vzorek musíme důkladně opláchnout destilovanou vodou. [2, 25]

Tab. 11 vybraná leptadla neželezných kovů a jejich slitin

Leptadlo	Složení	Způsob leptání	Použití
Nital	7,5 g FeCl <sub>3</sub> 7,5 g CuCl <sub>2</sub> 150 ml H <sub>2</sub> O 300ml HCl 50 ml HNO <sub>3</sub>	Vzorek leptat 5 až 15 sekund	Vyvolání struktury niklu a niklových super slitin
Marble	4 g CuSO <sub>4</sub> 20 ml HCl 20 ml dest. Vody	Vzorek leptat 5 až 10 sekund	Vyvolání struktury niklu a niklových super slitin
Keller a Wilcox	0,5 ml HF 1,5 ml HCl 2,5 ml HNO <sub>3</sub> 95,5 ml dest. voda	Několik sekund až minut	Vyvolání mikrostruktury a rozlišení strukturních částí Al slitin
Dix a Keith	0,5 ml HF 95,5 ml dest. voda	Potřít vatou 15 s	Zřetelně se naleptávání jednotlivé strukturní součásti Al slitin
Stein	10 ml H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 90 ml dest. voda	Ponořit do leptadla na 1 až 5 minut při 50 °C	Naleptávání struktury čistého Al, slitin Al-Mn, Al-Mg-Si (vyvolávání hranic zrn)
Chlorid železitý	5 g FeCl <sub>3</sub> 10 ml HCl 50 ml glycerín 30 ml dest. Voda	Potírat 16 až 60 sekund	Vyvolání struktury mědi, vyvolání struktury mosazy a mosazi s Pb
Směs kyselin	66 ml CH <sub>3</sub> COOH 38 ml H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 6 ml HNO <sub>3</sub>	Potírat 20 sekund	Chemické leštění medi a jejich slitin
Směs kyselin	45 ml HNO <sub>3</sub> 10 ml HF	Potírat 5 až 20 sekund	Chemické leštění a leptání struktury Ti a Ti slitin
Směs kyselin	10 ml HNO <sub>3</sub> 10 ml HF 20 ml glycerín	Potírat 5 až 20 sekund	Vyvolání struktury titanových slitin



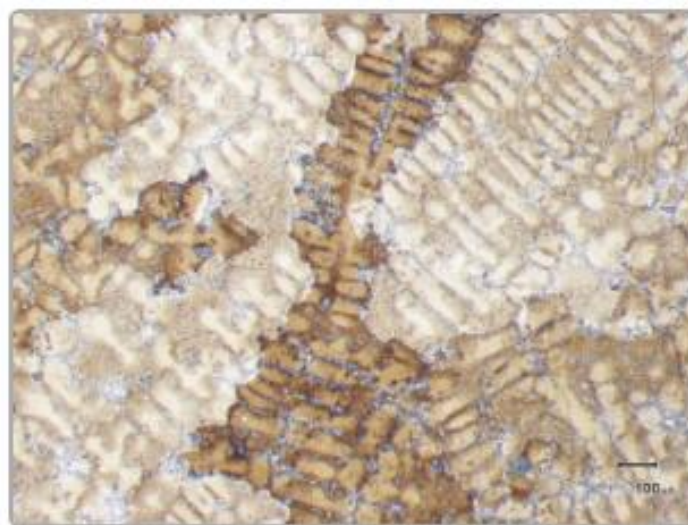
Obr. 29. Chemické leptání na hranicích zrn [35]

30. Chemické leptání plošné [35]

Další možností je elektrolytické leptání, které pracuje na stejném způsobu jako leštění. Liší se pouze hodnoty proudové hustoty. Tento způsob leštění se používá v případech, kdy nedosahujeme uspokojivých výsledku chemickým leptáním. [2]

#### 4.2.5. Vhodný způsob přípravy slitiny MAR M 246

Vhodným způsobem přípravy materiálu MAR M 246 je nejprve dělení abrazivním rozrušováním za mokra kotouči SiC a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Preparace lisováním za tepla do epoxidové pryskyřice s minerálním plnivem. Broušení brusnými papíry zrnitosti 280, 400, 600 po dobu 3 min. za doprovodu chlazení vodou. Následuje mechanické leštění po dobu 3 minut diamantovou pastou 3 a 1 μm. Dále pak leštění pomocí oxidické suspenze na bázi SiO<sub>2</sub> po dobu 1 minuty a oplach vodou po dobu 2 minut. Nakonec následuje chemické leptání za pokojové teploty leptadlem MARBLE. Výsledné snímky dendritické struktury jsou patrné z obr 31. [21, 27]



Obr. 31. Dendritická struktura slitiny Mar-M247 [28]

#### 4.2.6. Vhodný způsob přípravy slitiny Inconel 713C

Vhodným způsobem přípravy materiálu Inconel 713C je shodný s přípravou materiálu MAR M 246. Výsledné snímky dendritické struktury jsou patrné z obr. 32. Dále pro názornost jsou uvedeny obrázky výsledků metalografické analýzy, kvality svaru na turbínovém kole svařované elektronovým paprskem. Kde turbína je z materiálu Inconel 713 LC a hřídel je z oceli 15 230. Jedná se o modifikaci Inconelu 713C se snížením obsahem uhlíku. Kde příprava vzorku probíhala nejprve rozříznutím s ose turbínového kola a vyleptáním pomocí leptadla Kallings (CuCl<sub>2</sub>-2g, HCL-40 ml, etanol-60ml) pro pozorování mikrostruktury. Pro pozorování makrostruktury bylo použito leptadlo HCl – 50ml, H<sub>2</sub>O – 50ml, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – 10ml. Na obr. 33 je znázorněn snímek pro pozorování makrostruktury. Kde ve spodní části se nachází materiál Inconel 713 LC a v horní části základní materiál, ocel 15230. Na obr. 34. je dále znázorněn snímek pro pozorování mikrostruktury. Ve spodní části snímku se nachází základní materiál ocel 15230 a v horní části Inconel 713 LC. Ze snímku je krásně patrná trhlinka, která se nachází na hranici svaru a Ni-slitiny a sekundární trhliny, jak v oblasti svaru, tak v Inconelu 713 LC. Jedná se o velký problém při svařování EBW, což je zapříčiněno mikrostaženinami karbidů a nitridu v Inconelu 713 LC. [21, 27]



Obr. 32. Dendritická struktura slitiny Mar-M247 [29]





*Obr. 33 – Markostruktura svaru se zaměřením na Inconel 713 LC [27]*



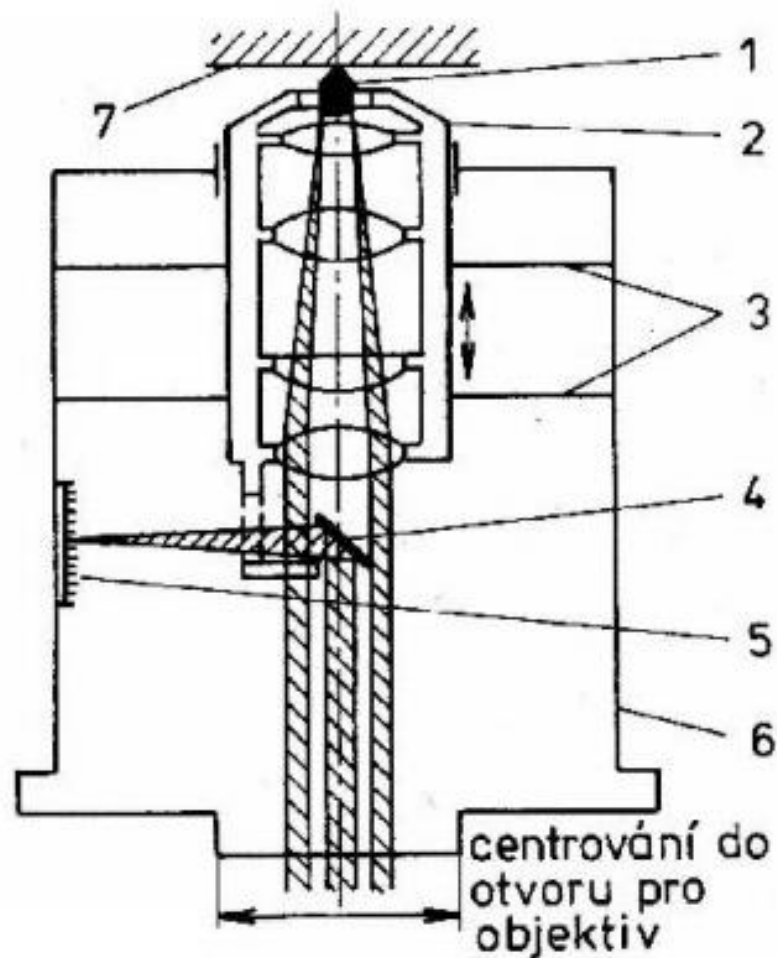
*Obr. 34 – Mikrostruktura svaru se zaměřením na Inconel 713 LC [27]*

### **4.3. Vyhodnocování analýzy materiálů**

Metalografickou analýzou můžeme vyhodnocovat čistotu kovu, stanovovat velikosti zrn či fázové složení kovu. Stanovení plošného podílu strukturních fází se provádí při takovém zvětšení na mikroskopu, abychom byli schopni rozlišit jednotlivé strukturní složky. Stanovení obsahu nekovových vměstků spočívá v porovnání vzorků s etalony příslušných norem. Pozorujeme velikost, rozložení a typ jednodílných vměstků. Stanovení velikosti zrna se opět provádí srovnáním s etalony. Hodnotíme zhrubnutí zrna a danou zrnitost struktury v oblastech tepelně ovlivněného materiálu. Makrostruktura je pozorování struktury při malém zvětšení maximálně dvacetinásobné. Pozoruje se nehomogenita vzorku, šířku tepelně ovlivněné oblasti, tvar svaru a vady, zejména pak jde o dutiny, řediny, póry a trhliny. Posuzovaný vzorek musí zahrnovat základní materiály neovlivněné svařováním, obě tepelně ovlivněné oblasti a svarový kov.

#### 4.3.1. Měření mikrotvrdomosti

Tvrdomost je odolnost materiálu vůči vniknutí cizího tělesa. Mikrotvrdomost je zkouška tvrdosti s hraničním zatížením 19,8N, při které vznikají velmi malé vtisky. Používají se pouze vnikající zkoušky tvrdosti. Vickersova, Knoopova nebo Bierkovičova metoda. Pro měření je nutné použít speciálního závaží či cejchované pružiny, běžné tvrdoměry nedosahují požadované přesnosti. [41, 42] Hanemannův mikrotvrdoměr je metalografický mikroskop, který má místo objektivu speciální objektiv, ve kterém je umístěn Vickersův jehlan, viz obr 35. Pohyb ve směru optické osy umožňují pružné membrány. Zatížení vnikajícího tělesa odpovídá průhybu membrán. Měří se ze stupnice v objektivu. Po odlehčení se měří vtisk. Tvrdomost materiálu se pak vypočítá ze vztahu  $HV = 0,189 \frac{F}{u^2}$ , kde F je zatěžovací síla a u velikosti úhlopříčky vtisku. [27, 28]



Obr. 35 – Schéma Hanemannova mikrotvrdoměru: 1 – Vickersova pyramida, 2 – nosič objektivů, 3 – závěsné membránové pružiny, 4 – optický hranol, 5 – stupnice zatížení, 6 kryt, 7 – výbrus

#### 4.3.2. Energiově disperzní spektroskopie

Pro analýzu materiálu pomocí elektronové mikroskopie je možné využít několik různých technik sloužících k analýze textury povrchu, chemického složení i krystalové struktury, empirického vzorce, chemického a elektronového stavu prvků ve vzorku. Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) analýza vzorků je kvalitativní i vysoce kvantitativní metoda sloužící k analýze chemického složení. Funguje na principu detekce charakteristického rentgenového záření vydávaného vzorkem. Záření buď dopadne do detektoru, či dochází k další interakci a předávání energie elektronů. Nemůžeme detekovat prvky lehčí než berylium. Možným problémem je s překrýváním čar různých prvků. [30, 31]

## 5. Experimentální práce

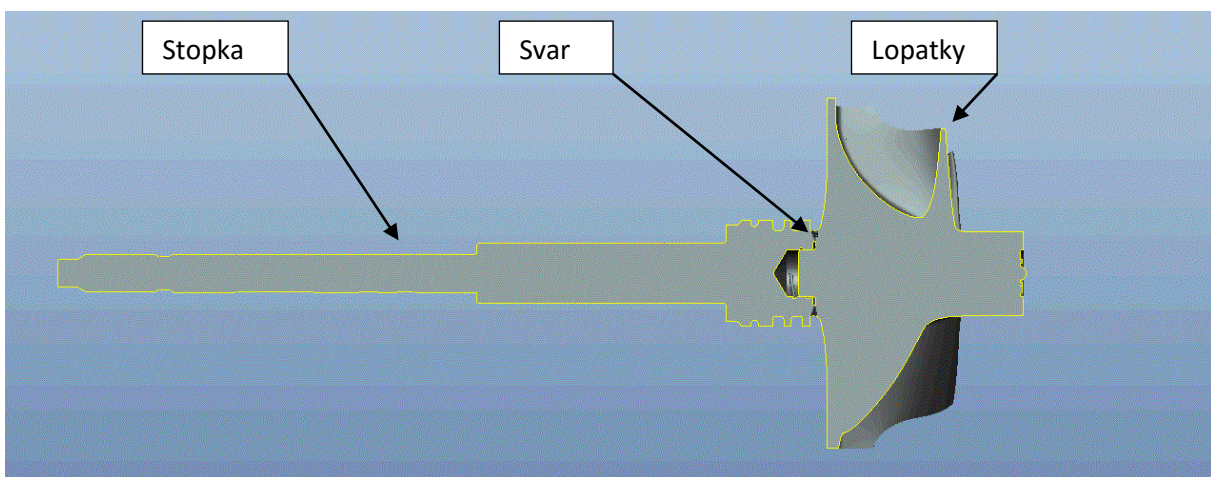
Hlavním cílem práce byla metalografická analýza vzorků svařených elektronovým paprskem. Vzorky byly vyhotoveny ve společnosti Continental Automotive Czech Republic, s.r.o.; Trutnov.

Celou experimentální práci můžeme rozdělit do pěti částí:

- 1.) Dělení vzorků.
- 2.) Preparace / zalisování vzorků
- 3.) Broušení a leštění
- 4.) Leptání
- 5.) Vyhodnocení optická mikroskopie, elektronová mikroskopie a měření mikrotvrdomosti.

### 5.1. Dělení vzorků

Vzorky jsme měli k dispozici již předřezané v ose na poloviny, viz obr 36. Pomocí kotoučové pily od firmy Strous. Dále jsme je pouze zarovnali, tak aby se vešli do formy na výlisky. Vzorky určené k elektrolytickému leptání jsme, z důvodu dostatečně velké kontaktní plochy zúžili na šířku přibližně jednoho centimetru. Použili jsme kotouč o průměru 150 mm s šířkou 0,15mm taktéž od firmy Strous. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kotouč je univerzální, používaný pro dělení kovů. Při dělení materiálu je kladen důraz na předejití možnému nežádoucímu tepelnému ovlivnění. Proto, jsme použili chlazení v místě řezu, které zabraňuje zahřívání a zajišťuje odvod třísky. Chladicí kapalina navíc obsahuje inhibitory koroze.



Obr. 36 – Řez turbodmýchadlem

### 5.2. Preparace vzorků

Zvolili jsme způsob preparace za tepla. Vzorek se lisuje za současného působení tepla a tlaku zároveň. Dále jsme použili práškovou hmotu na bázi termoplastu, kterou jsme vložili do přípravku ve stroji na zalisování vzorků. Na ní jsme nanесли hmotu průsvitného charakteru,

kteřou jsme zakryli identifikační štítek vzorku. Hmoty se při teplotě 180 °C roztaví a dokonale obstoupí vzorek. Za použití tlaku do 250 bar se vzorek zalisuje. Poslední fází zalisování je ochlazení vzorku proudící vodou po dobu 4 minut přímo ve stroji.

### 5.3. Broušení a leštění

Proces broušení jsme realizovali brusnými papíry s abrazivními částicemi SiC od firmy Struers. Začali jsme brusným papírem se zrnitostí 180. Nastavili jsme cyklus s 300 ot/min a směrem otáčení souběžný se vzorkem. Nejprve jsme zarovnali nerovnosti po řezání i hmotu po zalisování a to přitisknutím vzorku k brusnému papíru po dobu 30 až 60 sekund. Vzorky jsme poté umístili do unášče automatické brusky. Samotný cyklus broušení probíhal 4 minuty. Broušení probíhalo za mokra za použití vody. Po ukončení prvního cyklu byly vzorky vyjmuty, opláchnuty a proběhla kontrola připravovaného povrchu. V druhém cyklu byl použit papír zrnitostí 400. Proces měl zcela stejný průběh. Po ukončení byl použit brusný papír se zrnitostí 1 200. Následoval čtvrtý cyklus, kde byl použit brusný papír se zrnitostí 2 000. Nyní jsme vodu zaměnili za smáčedlo MetaDi Fluid. Vzorky vyjmuli, důkladně opláchnuli jarovou vodou a vysušili.

Stejným způsobem probíhalo broušení vzorků určených k elektrolytickému leštění/leptání. S tím rozdílem, že jsme je neměli upnuté v unášči, ale byli rovnoměrně přitisknuti rukou na brusné kotouče. Po broušení jsme tyto vzorky vložili do ultrazvukové vaničky ULTRASONIC CLEANER na dobu 1 až 2 minut, vanička vibruje a dochází tak k odstranění zbylých nečistot.

Leštění jsme zvolili dvojího druhu, mechanické a elektrolytické. Druhé z nich je popsáno níže, z důvodu úzké souvislosti s elektrolytickým leptáním. Brusný papír jsme vyměnili za látkové lešticí plátno Nanoclatk 0,05 μm. Vzorky jsme opět upnuli do unášče. Použili jsme oxidický lešticí prostředek MaterPrep se zrnitostí 0,05 μm. Viz obr. 37 Při leštění jsme zvolili pohyb vzorku v protisměru otáčení lešticího plátna. Zvolili jsme cyklus s 150 ot/min po dobu 4 minut. V polovině procesu v čase 2 minuty jsme znovu přidali lešticí přípravek. Po dokončení jsme vzorky opět důkladně opláchnuli a vysušili.



Obr. 37 – Lešticí prostředek MaterPrep [37]

## 5.4. Leptání

Poslední ale také nejrozsáhlejší částí přípravy vzorků, bylo leptání. Pracnost této části byla způsobena heterogenním spojením materiálů. Při leptání se každý choval odlišně. Pro ruční leptání jsme využili 3 různá leptadla, určena především na niklové slitiny. Jejich složení je patrné z rozpisu níže. Pro porovnání jsme se rozhodli, vzorky také elektrolyticky leptat/leštit. Proces ručního leptání probíhal u všech leptadel stejně. Vzorek byl po stanovený čas namáčen do lázně s daným leptadlem a následně důkladně opláchnut a vysušen. Poté byl již vzorek pozorován pod mikroskopem.

Leptadlo: <i>N</i>		Leptadlo: <i>Marble</i>		Leptadlo: <i>Adler</i>	
FeCl <sub>3</sub>	7,5g	CuSO <sub>4</sub>	4g	HCl	53,7%
CuCl <sub>2</sub>	7,5g	HCl	20ml	FeCl <sub>3</sub>	16%
H <sub>2</sub> O	150ml	H <sub>2</sub> O	20ml	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	3,3%
HCl	300ml				
HNO <sub>3</sub>	50ml				

Operaci elektrolytického leštění/leptání jsme realizovali v metalografické laboratoři FS ČVUT v Praze na zařízení od firmy Struers, které je vyobrazeno na obr. 39. Pečlivě vybroušený vzorek jsme umístili do přípravku v zařízení, viz obr. 38. Elektrolytické leštění a leptání jsme realizovali na ploše 2 cm<sup>2</sup> při teplotě 25°C. Použili jsme typ elektrolytu A2, který je vhodný pro Al, Fe, Ni, Ag, korozivzdorné ocele, ocele, Sn a Ti. Nastavili jsme doporučené hodnoty napětí 25 V a čas cyklu na dobu 8s. Nejprve jsme zvolili režim skenování povrchu, při kterém došlo k určení optimálních hodnot, pro vytvoření potřebné viskózní vrstvy. Následně jsme již spustili samotný proces leštění a leptání. Po dokončení jsme vzorek důkladně opláchny.



Obr. 38 – Zařízení pro Elektrolytické leštění/leptání Struers LectroPol - 5



Obr. 39 – Detail uchycení v zařízení během elektrolytické leštění/leptání

## 5.5. Vyhodnocení experimentu

Před provedením metalografické analýzy svarové spoje je vždy nejprve provedena vizuální kontrola svaru. Kontroluje se, zda je svar po celém obvodu turbíny i jeho barva. Dále je proveden torzní test. Turbína je upnuta do sklíčidla a pomocí speciálně upraveného měřicího zařízení je měřeno při, jak velkém zatížení dojde k oddělení lopatky od stopky. Interval adekvátní zátěže je u turbíny typu Inconel 713C a 42CrMo4 55 až 65 Nm u typu Mar M246 a X22CrMoV12 50 až 60 Nm. Hotové vzorky připravené k metalografické analýze jsou vyobrazeny na obr. 40.



Obr. 40 – Vzorky po leptání v levo Mar M246 + X22CrMoV12, v pravo Inconel 713C+42CrMo4

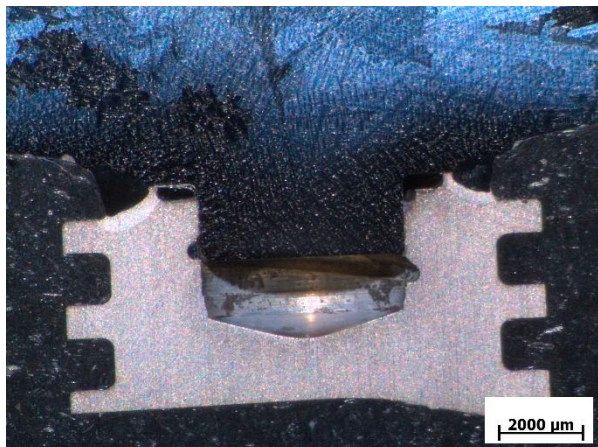
### 5.5.1. Optická mikroskopie

Vzorky jsme naleptali třemi různými leptadly a pozorovali jsme jejich reakci, poté jsme zhodnotili výsledky po elektrolytickém leptání turbín. Dále jsme se věnovali hodnocení kvality provedených svarů.

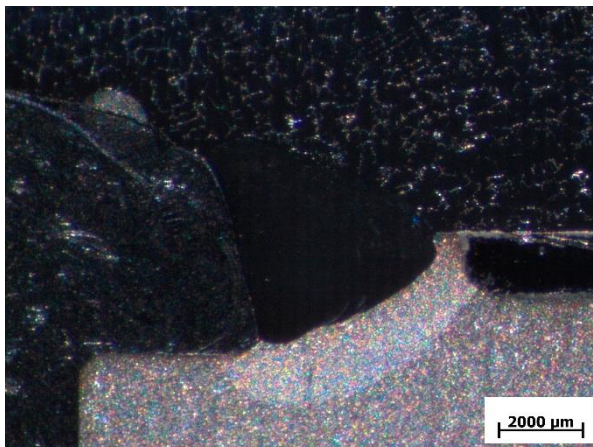
#### *Leptadlo N*

Na snímcích 41 až 44 je svar Inconel 713C a 42CrMo4, který byl naleptán leptadlem N. Na snímcích 45 až 48 je svar Mar M246 a X22CrMoV12 naleptán stejným leptadlem. U obou

typů svarů došlo k dobrému naleptání základního materiálu Ni lopatky, základní materiál stopky byl degradován. Můžeme pozorovat i TOO svarového spoje ze strany X22CrMoV12 a 42CrMo4. TOO ze strany Ni slitin však vidět není.



Obr. 41 – Inconel 713C+42CrMo4 Leptadlo N



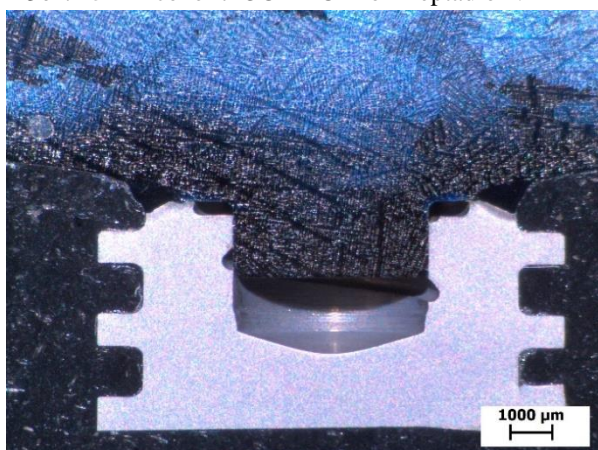
Obr. 42 – Inconel 713C+42CrMo4 Leptadlo N



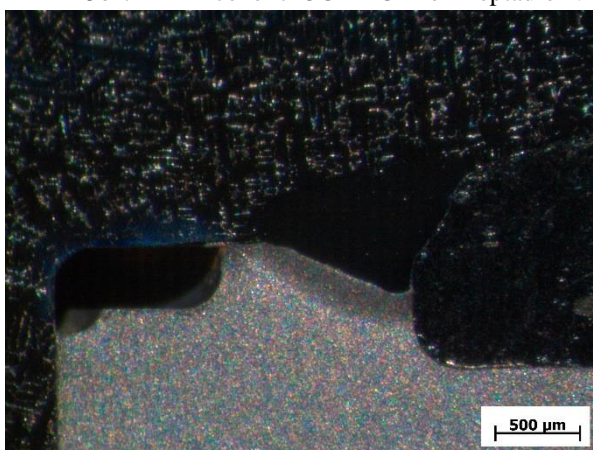
Obr. 43 – Inconel 713C+42CrMo4 Leptadlo N



Obr. 44 – Inconel 713C+42CrMo4 Leptadlo N

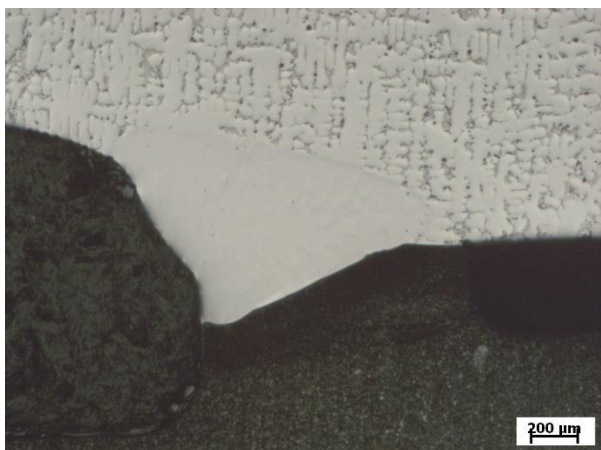


Obr. 45 - Mar M246 + X22CrMoV12 leptadlo N

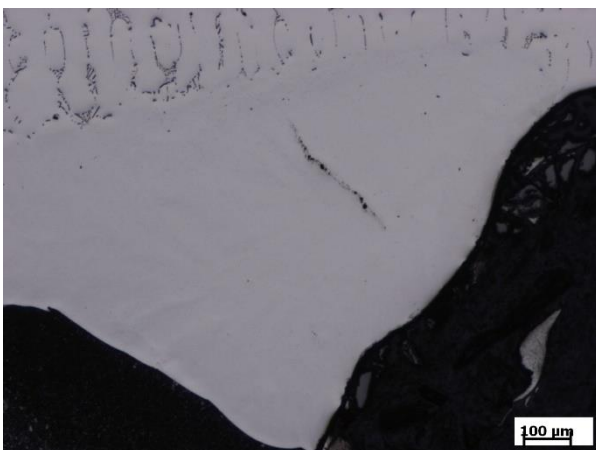


Obr. 46 - Mar M246 + X22CrMoV12 leptadlo N





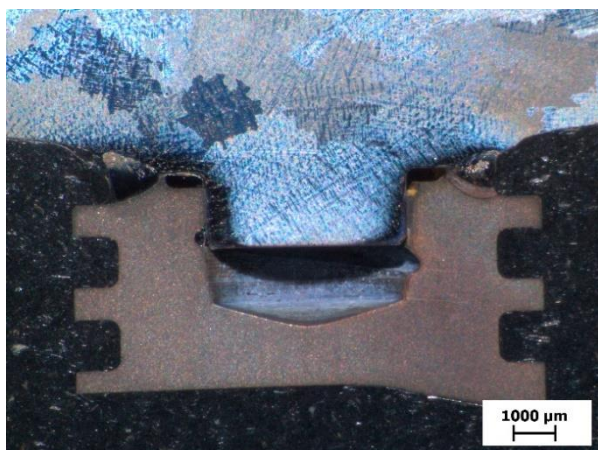
Obr. 47 - Mar M246 + X22CrMoV12 leptadlo N



Obr. 48 - Mar M246 + X22CrMoV12 leptadlo N

### Leptadlo Marble

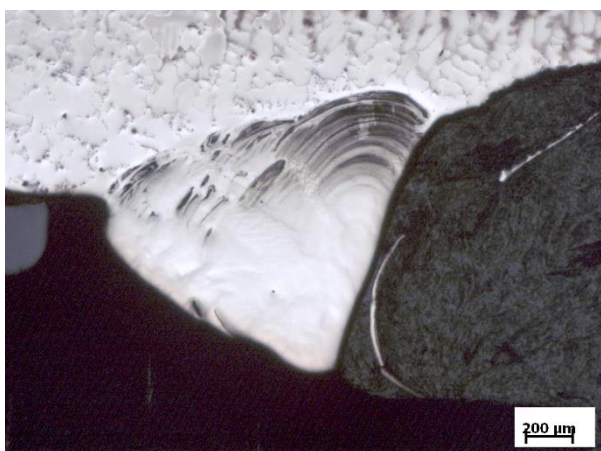
Na snímcích 49 až 52 jsme na spojení Inconelu 713C a 42CrMo4 požili leptadlo Marble a na snímcích 53 a 54 je použito stejné leptadlo na spojení Mar M246 a X22CrMoV12. U tohoto leptadla jsme dosáhli lepších výsledků ve všech oblastech. Upozornila bych na kresbu svarového kovu na snímku 52. Jsou patrné TOO z obou stran svaru i svarový kov.



Obr. 49 - Inconel 713C+42CrMo4 leptadlo Marble



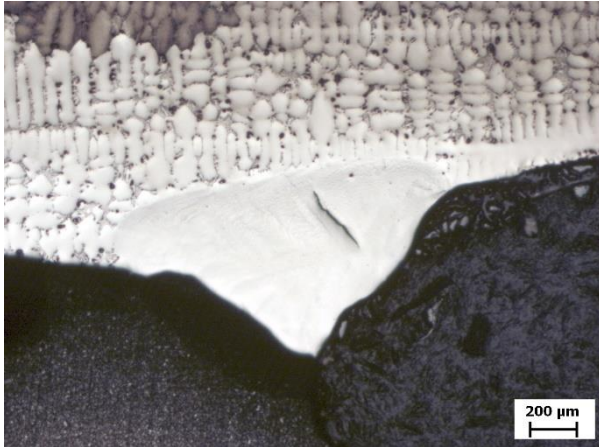
Obr. 50 - Inconel 713C+42CrMo4 leptadlo Marble



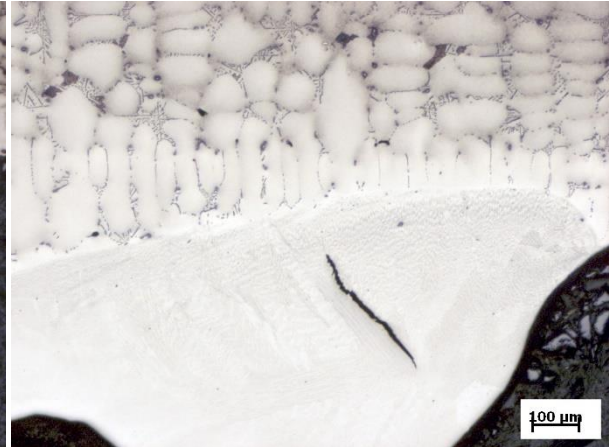
Obr. 51 - Inconel 713C+42CrMo4 leptadlo Marble



Obr. 52 - Inconel 713C+42CrMo4 leptadlo Marble



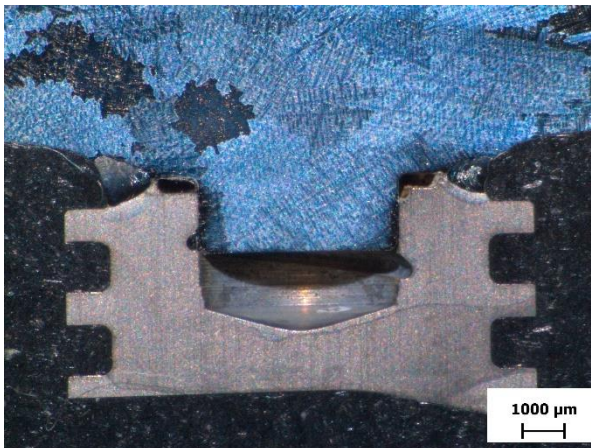
Obr. 53 - Mar M246+X22CrMoV12 leptadlo Marble



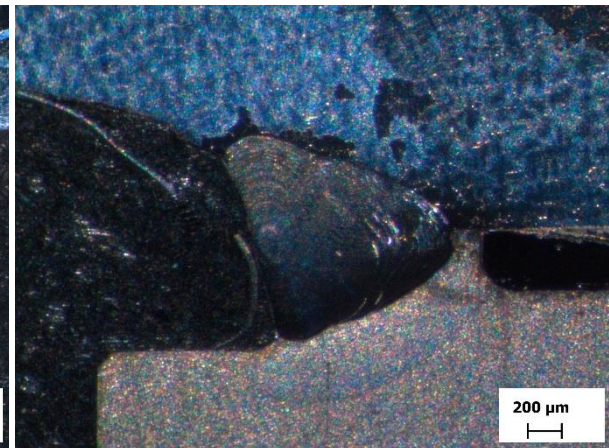
Obr. 54 - Mar M246+X22CrMoV12 leptadlo Marble

### *Leptadlo Adler*

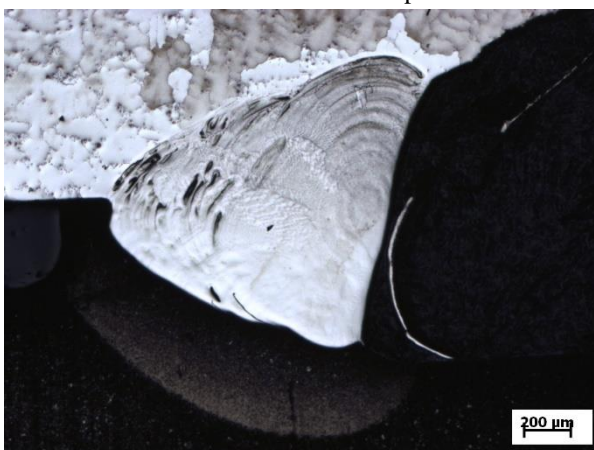
Na snímcích 55 až 62 je počito leptadlo Adler na snímcích 55 až 58 je spoj Inconel 713C a 42CrMo4 a na snímcích 59 až 62 spoj Mar M246 a X22CrMoV12. Na snímcích je dobře patrná jak TOO ze strany X22CrMoV12 a 42CrMo4, tak ze strany Ni-slitin. Oblast svarového kovu je také velmi dobře patrná. Použitím tohoto leptadla jsme dosáhli nejpřísnějšího zviditelnění jednotlivých struktur.



Obr. 55 - Inconel 713C+42CrMo4 leptadlo Adler



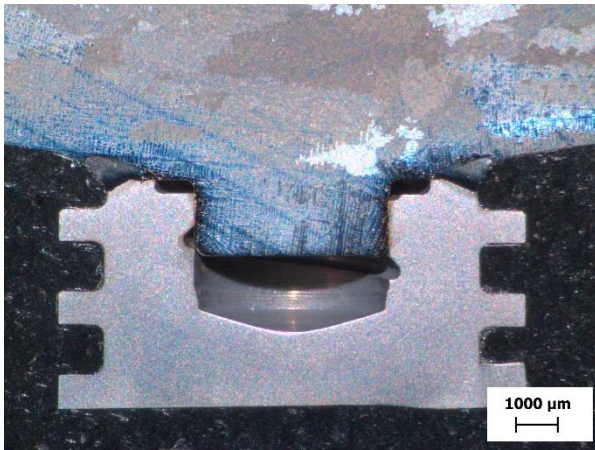
Obr. 56 - Inconel 713C+42CrMo4 leptadlo Adler



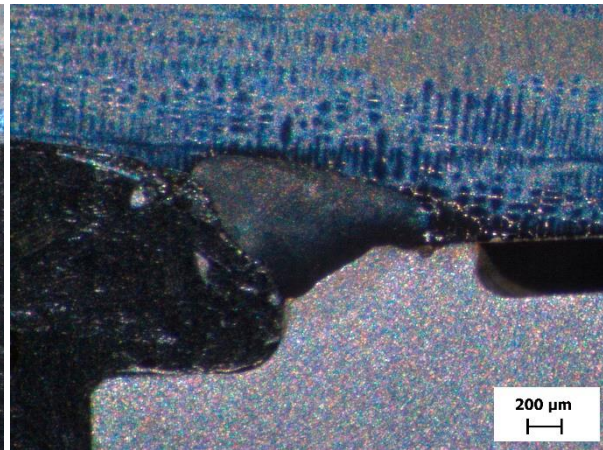
Obr. 57 - Inconel 713C+42CrMo4 leptadlo Adler



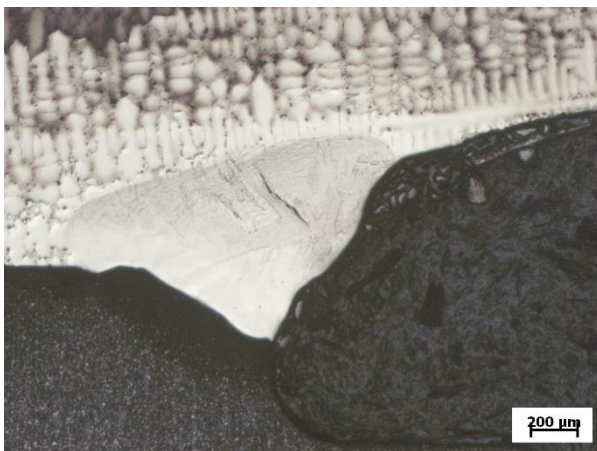
Obr. 58 - Inconel 713C+42CrMo4 leptadlo Adler



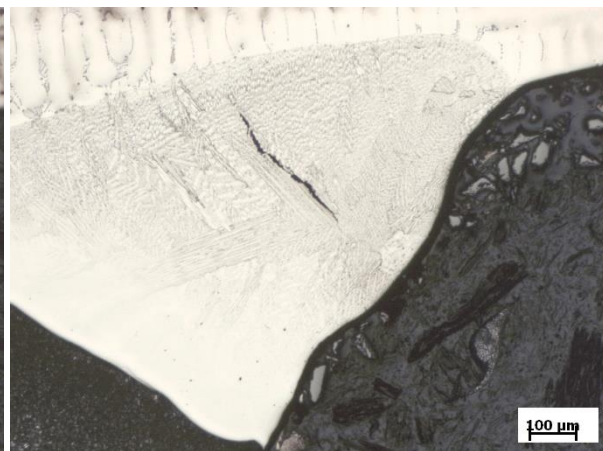
Obr. 59 - Mar M246 + X22CrMoV12 leptadlo Adler



Obr. 60 - Mar M246 + X22CrMoV12 leptadlo Adler



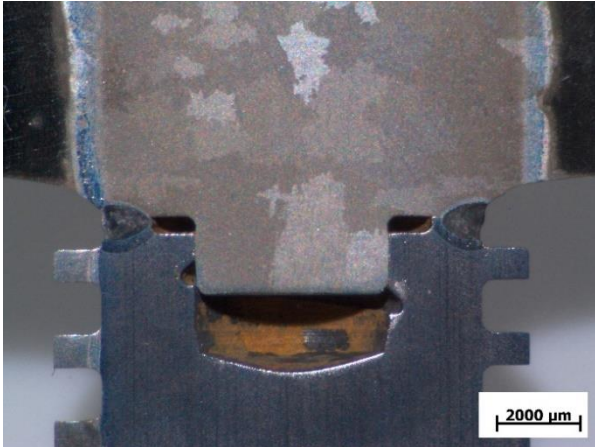
Obr. 61 - Mar M246 + X22CrMoV12 leptadlo Adler



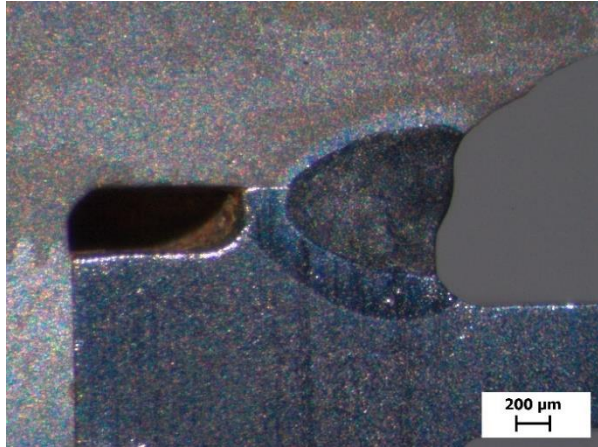
Obr. 62 - Mar M246 + X22CrMoV12 leptadlo Adler

### *Elektrolytické leštění/leptání*

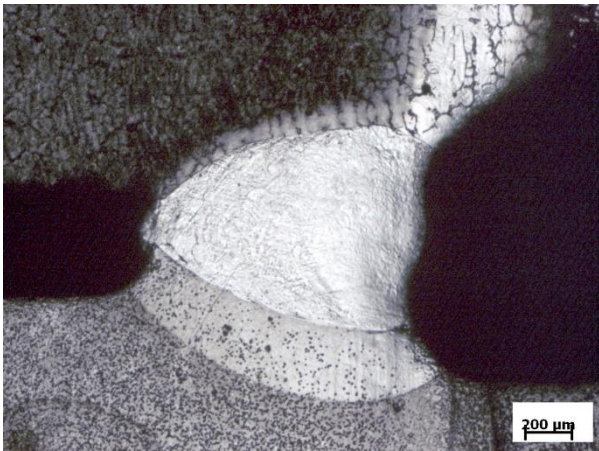
Na snímcích 63 až 66 jsou výsledky elektrolytického leštění spoje Inconel 713C a 42CrMo4. Na snímcích 67 až 68 potom spojení Mar M246 a X22CrMoV12. Došlo k dobrému naleptání všech oblastí. Nastavené parametry i elektrolyt jsme přizpůsobovali základnímu materiálu lopatek, tedy Ni-slutinám nikoli základnímu materiálu stopky. Při skenování povrchu tato část materiálu převažovala. Díky čemu došlo k použití nepřiměřeně vysoké hodnoty napětí pro základní materiál stopky. Což mělo za následek vznik kyslíku. Tento jev zapříčiňuje vznik bodové koroze, která je patrná ze snímku 65 a 66.



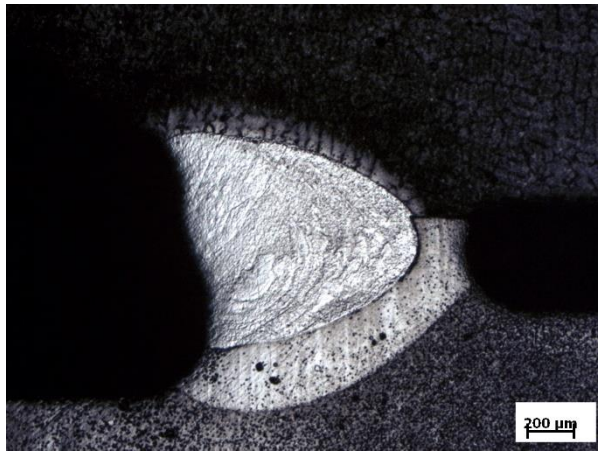
Obr. 63 - Inconel 713C+42CrMo4 elektrolit. leptadlo



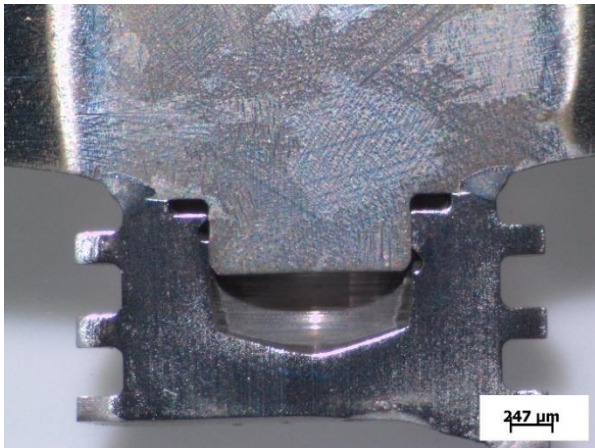
Obr. 64 - Inconel 713C+42CrMo4 elektrolit. Leptadlo



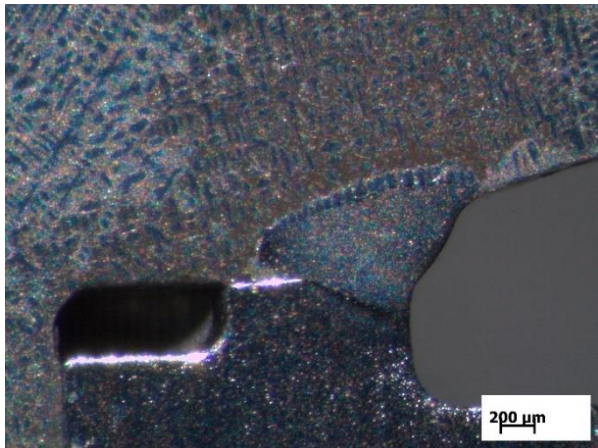
Obr. 65 - Inconel 713C+42CrMo4 elektrolyt. leptadlo



Obr. 66 - Inconel 713C+42CrMo4 elektrolyt. leptadlo



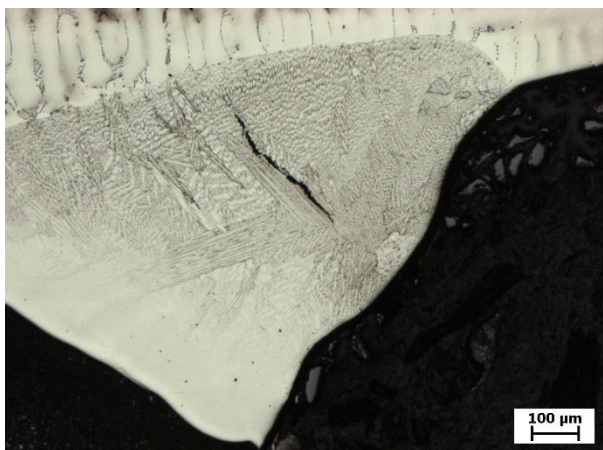
Obr. 67 - Mar M246 + X22CrMoV12 elektrolyt. leptání



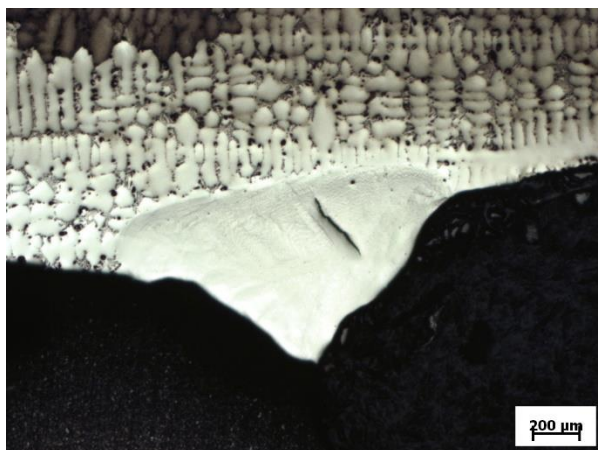
Obr. 68 - Mar M246 + X22CrMoV12 elektrolyt. leptání

### Hodnocení kvality svaru

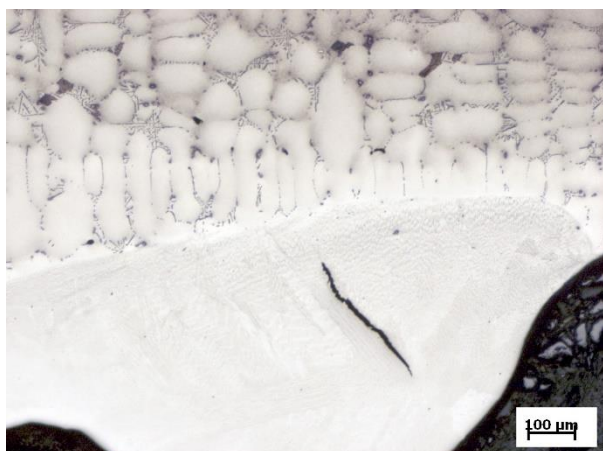
U vzorku svaru Mar M246 a X22CrMoV12 ručně leptaného jsme objevili objemovou vadu, pravděpodobně horoucí trhlinu o velikosti 315,13 μm viz snímek 63 a 64. Tento typ vady je typický právě pro Ni - slitiny. U stejného vzorku jsme také objevili prostorovou vadu, která vznikla pravděpodobně při přípravě svarových ploch. Kontaktem nástroje s polotovarem, viz obr 65.



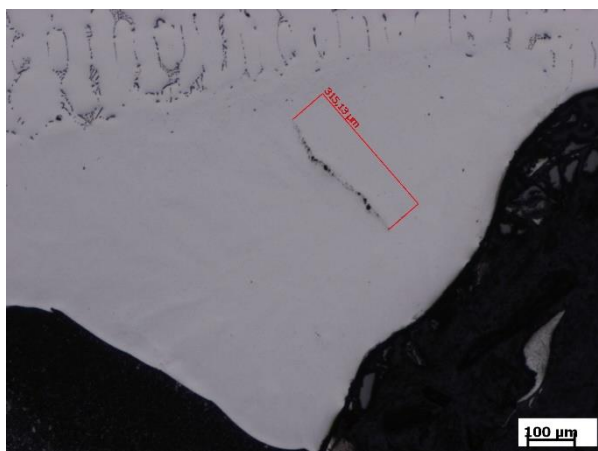
Obr. 69 - Mar M246 + X22CrMoV12 - trhlina



Obr. 70 - Mar M246 + X22CrMoV12 – trhlina



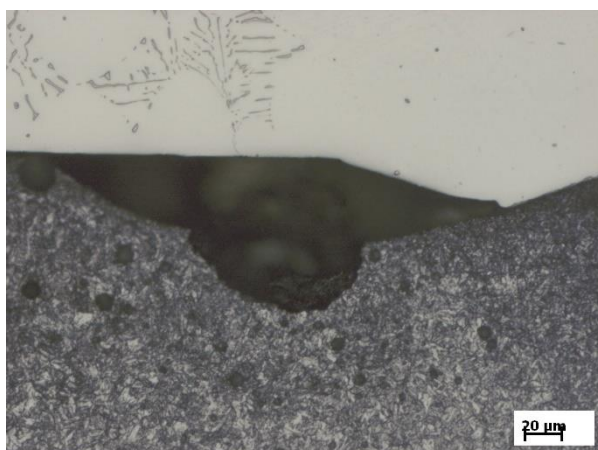
Obr. 71 - Mar M246 + X22CrMoV12 - trhlina



Obr. 72 - Mar M246 + X22CrMoV12 – trhlina



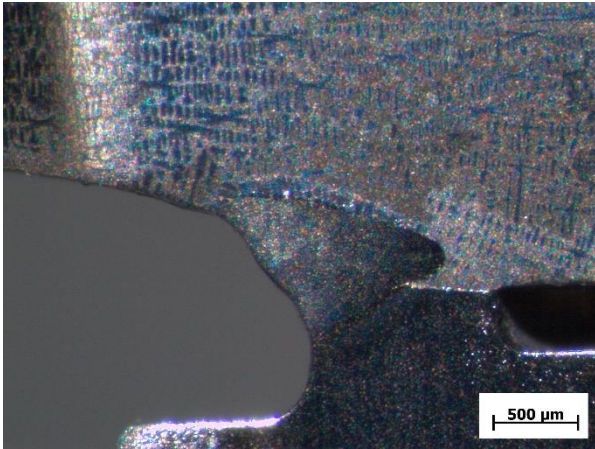
Obr. 73 - Mar M246 + X22CrMoV12 - trhlina



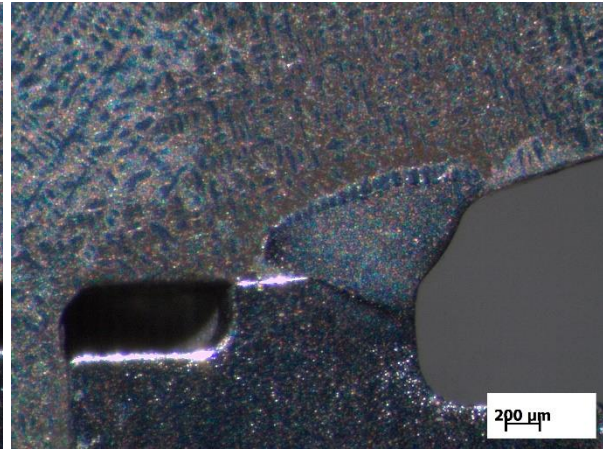
Obr. 74- Mar M246 + X22CrMoV12 – objemová vada

U vzorku svaru Mar M246 a X22CrMoV12 určeného pro elektrolytické leptání jsme si všimli výrazného vyosení svaru, zapříčiněno pravděpodobně špatným upnutím do přípravku v zakládání stanice. Jedná se o koncentrátor napětí. Dochází ke snížení mechanických vlastností daného svaru. Následkem potom můžeme být narušení spojení stopky s lopatkou při

provozu. Vyosení, které je patrné ze snímku 66 a 67 je ještě v toleranci v rámci vnitropodnikové normy.



Obr. 75 - Mar M246 + X22CrMoV12 – vyosení



Obr. 76 - Mar M246 + X22CrMoV12 – vyosení

#### 5.5.6. Měření mikrosvrdosti

Průběh mikro tvrdosti byl měřen napříč svarem pomocí mikrotvrdoměru Buehler Mat 1105 D. Při zatížení HV 0,5. Jednotlivé vtisky jsou od sebe vzdáleny 0,5 mm avšak v TOO, která je příliš úzká, byly měřeny podél svaru. V tabulce níže jsou zpracované naměřené hodnoty. Mikrosvrdost oceli CrMo4 byla přibližně o 100 HV vyšší oproti X22CrMoV12. V TOO došlo k výraznému nárůstu hodnot tvrdosti u obou spojů. U spojení Inconelu 713C a CrMo4 při přechodu ze základního materiálu stopky na svarový kov přibližně o 350 HV. U spojení Mar M246 a X22CrMoV12 při přechodu ze základního materiálu stopky na svarový kov došlo k podobnému nárůstu opět přibližně 350 HV. Tento nárůst je způsoben svařováním kovů s odlišným chemickým složením. Výrazný nárůst tvrdosti způsobuje snížení houževnatosti spoje a dochází k porušení přechodu mezi TOO a základním materiálem. Při namáhání spoje se z tohoto místa začne pravděpodobně šířit trhlinka. Hodnoty mikrosvrdosti svarového kovu byly u spojení Inconelu 713C a CrMo4 přibližně o 50 HV nižší než u Mar M246 a X22CrMoV12. Stejně tak hodnoty Inconelu 713C oproti Mar M246.

Tab. 12 – průběh mikrotvrdosti Inconelu 713C + CrMo4

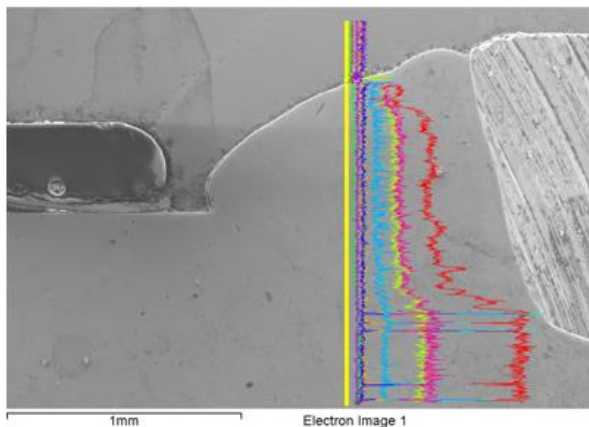
Měřená oblast	HV 0,5
Základní materiál stopky	391
	379
	415
TOO	753
	738
	726
Svarový kov	218
	230
	248
TOO	379
	364
	390
Základní materiál Ni lopatky	375
	350
	374

Tab. 13 – průběh mikrotvrdosti Mar M246 + X22CrMoV12

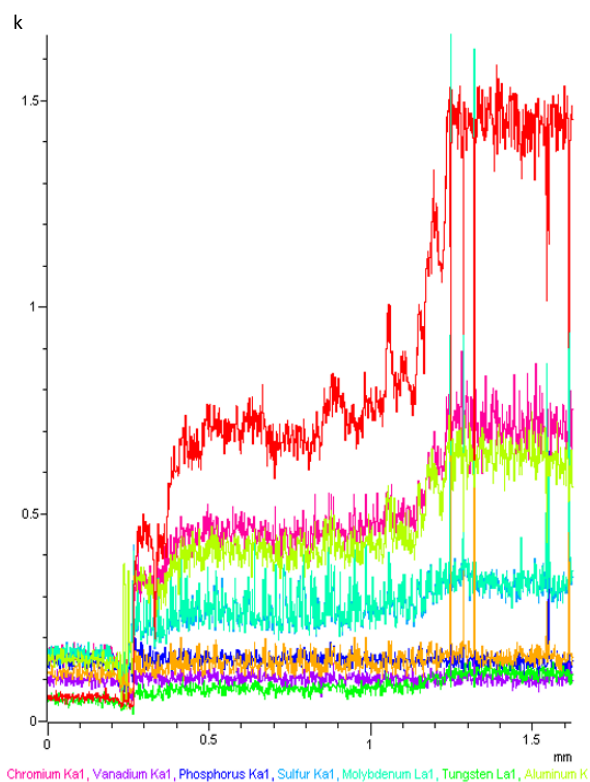
Měřená oblast	HV 0,5
Základní materiál stopky	274
	276
	276
TOO	591
	679
	627
Svarový kov	283
	297
	324
TOO	440
	426
	434
Základní materiál Ni lopatky	428
	404
	438

### 5.5.7. Elektronová mikroskopie

EDX analýza zaznamenává četnost rentgenového signálu. Výška zaznamenaných hodnot znázorňuje koncentraci daného prvku ve zkoumaném materiálu. Na obr. 77 je zaznamenána oblast analýzy u spojení Inconelu 713C + CrMo4. Průběh chemického složení je patrný z obr. 78. Je zřejmé, že můžeme chemické složení oblasti svaru, rozdělit do třech částí. TOO mezi svarovým kovem a základním materiálem Ni lopatky, svarovým kovem a TOO mezi svarovým kovem a základním materiálem stopky tedy CrMo4.

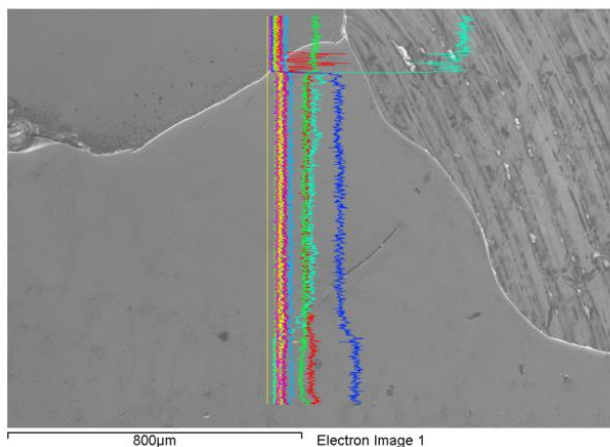


Obr. 77 – Inconel 713C + CrMo4 EDX

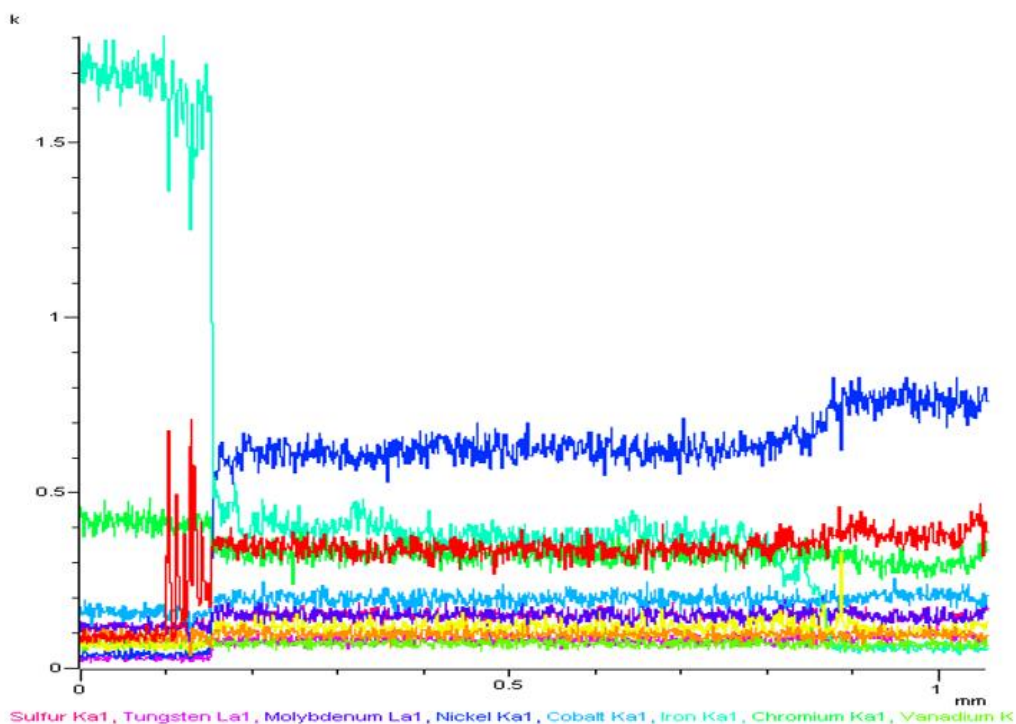


Obr. 78 – Inconel 713C + CrMo4 EDX

Na obr. 79 je zaznamenána oblast analýzy u spojení Mar M246 + X22CrMoV12. Průběh chemického složení je patrný z obr. 80. Je zřejmé, že můžeme chemické složení oblasti svaru, opět rozdělit do třech částí. TOO mezi svarovým kovem a základním materiálem Ni lopatky, svarovým kovem a TOO mezi svarovým kovem a základním materiálem stopky tedy X22CrMoV12. Na snímku 81 je potom zachycena již zmiňovaná trhлина ve svaru.

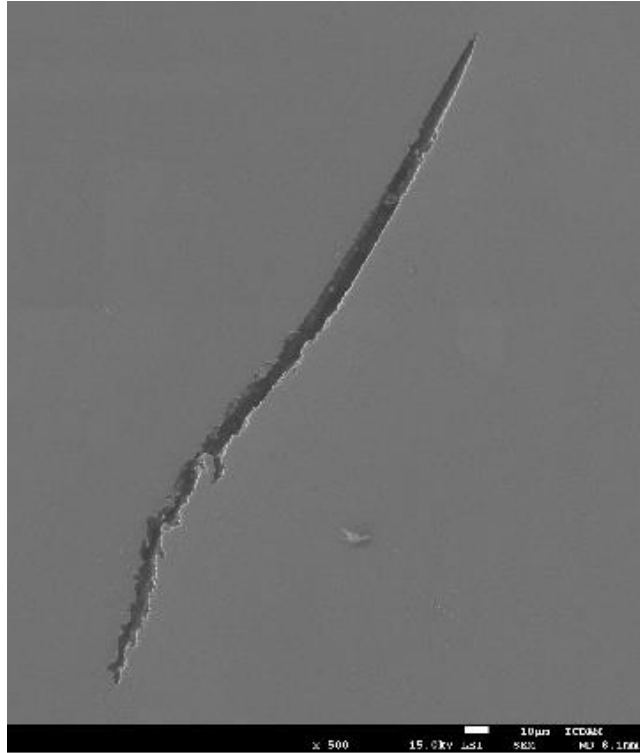


Obr. 79 - Mar M246 + X22CrMoV12

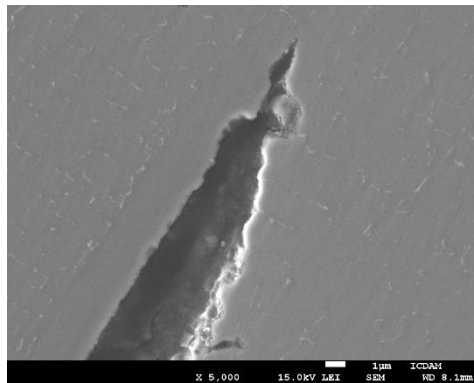


Obr. 80 - Mar M246 + X22CrMoV12

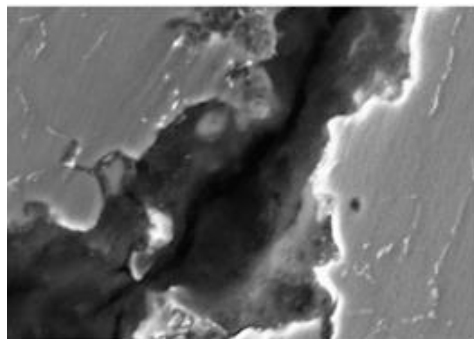




Obr. 81 - Mar M246 + X22CrMoV12 - trhlina



Obr. 82 - Mar M246 + X22CrMoV12 – detail trhliny



Obr. 83- Mar M246 + X22CrMoV12 – detail trhliny

Z detailů na snímku 82 a 83 se domníváme, že se jedná o horoucí trhlinu.

## 6. Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na metalografický rozbor dvou turbín, který zahrnuje použitou technologii svařování elektronovým paprskem, svařitelnost a vlastnosti niklových slitin, nízkolegovaných ocelí a korozivzdorné oceli a také na problematiku metalografické analýzy.

Z heterogenních svarových spojů, které se skládají v prvním případě z niklové slitiny Inconel 713C a nízkolegované oceli 42CrMo4 a v druhém případě z niklové slitiny Mar M246 a korozivzdorné oceli X22CrMoV12, byli připraveny metalografické vzorky. U kterých docházelo k zviditelňování struktury elektrolytickým leptáním a chemickým leptáním, pomocí třech různých leptadel určených pro niklové slitiny. Hodnotila se vhodnost způsobu daného zviditelňování struktury a použité leptadlo. Vzhledem k tomu, že se jedná o heterogenní svarový spoj, bylo obtížné docílit zviditelnění základního materiálu lopatky, TOO oblastí, svarového kovu a základního materiálu stopky zároveň. Při použití chemického leptání a leptadla Adler se docílilo nejpříznivějších výsledků. Došlo k dobrému zviditelnění oblasti základního materiálu lopatky, TOO oblasti mezi základním materiálem lopatky a svarovým kovem, svarového kovu i TOO oblasti mezi svarovým kovem a základním materiálem stopky. U elektrolytického leptání se dosáhlo dobrého zviditelnění všech oblastí. Nedostatkem, však byl výskyt bodové koroze. Ukázalo se, že tento způsob leptání by uvítal rozsáhlejší zaměření a nalezení optimálnějších podmínek elektrolytického leptání pro tyto heterogenní spoje. Při pozorování vzorků jsme si také všimli trhliny v materiálu o velikosti 315  $\mu\text{m}$  a objemové vady, zpozorovali jsme i vyosení svaru. Dalším bodem bylo měření mikrotvrdomosti, u obou typu spojení jsme pozorovali nárůst tvrdosti v oblasti svarového kovu. Nakonec se provedla analýza chemického složení vzorků pomocí elektronové mikroskopie. Získalo se také detailnější snímky více zmíněné trhliny, díky čemu se domníváme, že se jedná o horoucí trhlínu.

Mým názorem je používání přípravy vzorku chemickým leptáním výhodnější oproti elektrolytickým leptáním za předpokladu podobné analýzy heterogenního svaru. Elektrolytické leptání bylo doprovázeno nežádoucí bodovou korozí.

## Použitá literatura:

- [1] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľ'nost' materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľství STU, 2009. 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6
- [2] JONŠTA, Zdeněk, František FILUŠ a Lubomír ČÍŽEK. *Praktikum z nauky o kovech*. 3. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7078-957-3.
- [3] *Www.strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.cz*[online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.cz/2011/03/3951-svaritelnost-kovovych-materialu.html>
- [4] HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Bratislava: Veda, 1989. ISBN 80-224-0016-5
- [5] WĘGŁOWSKI, Marek St., Jerzy DWORAK a Sylwester BŁACHA. Electron beam welding – equipment and accessories. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2014, 2014(4), 22 - 30.
- [6] *NÁVODY K LABORATORNÍM PRACÍM* [online]. Praha: ČSČHTt, 2008 [cit. 2016-08-06]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_metalografie\\_1/teorie.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm)
- [7] ERBEN, Milan. *Vakuová technika: Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií*. Pardubice, 2008. Dostupné také z: <http://www.upce.cz/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf>
- [8] Deflection & correction coils. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-08-06]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Deflection\\_%26\\_correction\\_coils.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Deflection_%26_correction_coils.jpg)
- [9] MALTÁK, Jiří. *Povrchové zpracování vybraných ocelí pomocí elektronového svazku*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Miloslav Kouřil, CSc.
- [10] PALÁN, Marek. *Svařování rotorových materiálů*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav DANĚK, CSc.
- [11] JONŠTA, Zdeněk, Lubomír ČÍŽEK a František FILUŠ. *Praktikum z nauky o kovech*. 3. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 80-707-8957-3.
- [12] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1

- [13] LOSERTOVÁ, Monika. *Úvod do nauky o materiálu*. Ostrava, 2013. Dostupné také z: [http://katedry.fmfi.vsb.cz/637/soubory/KOVYII\\_Ni\\_VT\\_IMC.pdf](http://katedry.fmfi.vsb.cz/637/soubory/KOVYII_Ni_VT_IMC.pdf)
- [14] VNOUČEK, Milan. *Nikl a jeho slitiny, Titan a jeho slitiny*. Plzeň. Dostupné také z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/nikl-titan-09\\_10.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf)
- [15] *Nikl* [online]. Straka, c1998-2016 [cit. 2016-08-06]. Dostupné z: <http://www.tabulka.cz/prvky/ukaz.asp?id=28>
- [16] \_ANDRŠOVÁ, Zuzana a Pavel KEJZLAR. *NIKL A JEHO SLITINY*. Liberec, 2009. Dostupné také z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM2/NOM2.htm](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/NOM2.htm)
- [17] SCHULTZ, H. *Electron beam welding*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 1994. ISBN 18-456-9878-9.
- [18] *Engineering properties of alloy 713C*. Toronto, 1989. Dostupné také z: [https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/Alloy713C\\_337\\_.ashx](https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/Alloy713C_337_.ashx)
- [19] Microstructural changes in padding welds made from the 713C alloy after heat treatment. *ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING*. 2010, **10**(Special 3), 11-16. ISSN 1897-3310.
- [20] KOREN, A., M. ROMAN, I. WEISSHAUS a A. KAUFMAN. Improving the Weldability of Ni-Base Superalloy 713C. *WELDING RESEARCH SUPPLEMENT*. 1982, **1982**(11), 348 - 351.
- [21] ŠMÍD, Bc. Michal. *Optimalizace makrostruktury odlitků z niklových slitin*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaromír Roučka, DSc.
- [22] BP optimalizace výroby
- [23] FRANCEK. *KOROZIVZDORNÉ A ŽÁRUVZDORNÉ OCELI*. Praha, 2007. Dostupné také z: [http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/3SV/3SV\\_2.test\\_%20v%C3%BDtah%20teorie.pdf](http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/3SV/3SV_2.test_%20v%C3%BDtah%20teorie.pdf)
- [24] *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
- [25] KONEČNÁ, Radomila a Stanislava FINTOVÁ. *Praktická metalografie: Projekt KEGA č.3/6110/08*. Žilina, 2010.
- [26] MINISTR, Zdeněk. *Praktická metalografická mikroskopie: určeno pracovníkům metalografických laboratoří*. Praha: SNTL, 1956. Řada hutnické literatury.

- [27] ŠEBEK, Bc. Jan. *Metody svařování těžko svařitelných kovů*. Brno, 2008. Diplomová práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Vlastimil Chrást, CSc.
- [28] WASSERBAUER, Jaromír. Tvrdost (mikrotvrdost): významná mechanická vlastnost materiálů. *Vědci pro průmysl a praxi* [online]. 2011 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tvrdost-mikrotvrdost>
- [29] *Zkoušky tvrdosti*. Plzeň, 2010. Dostupné také z: [http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrdosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf)
- [30] ED. BY S. AMELINCKX .. *Electron microscopy: principles and fundamentals*. [Online-Ausg.]. Weinheim: VCH, 1997. ISBN 3527294791.
- [31] VIJ, D. R. *Handbook of applied solid state spectroscopy*. New York: Springer, c2006. ISBN 0387324976.
- [32] DRŽÍK, Milan, Andrej PLECENIK, Miroslav ZAHORAN, et al. *Moderná mikroskopia a digitálne spracovanie obrazu*. Bratislava, 2008. ISBN 978-80-89186-37-2.
- [33] [online]. In: . [cit. 2016-08-11]. Dostupné z: <http://www.ptr-gmbh.de/images/stories/maschinen/modular/modulkonzept.jpg>
- [34] *Metalografie I.: Příprava vzorku pro pozorování mikroskopem*. Praha, 2008. Dostupné také z: [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_metalografie\\_1/teorie.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm)
- [35] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii*. Olomouc, 2009. Dostupné také z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
- [36] [online]. In: . [cit. 2016-08-11]. Dostupné z: <http://www.vyukovematerialy.cz/fyzika/9/svetlo/odraz.htm>
- [37] [online]. In: . [cit. 2016-08-11]. Dostupné z: <http://www.hanyko-praha.cz/produkty/metalografie/spotrebni-material-2/brouseni-a-lesteni/spotrebni-material-s-o-200-350-mm/>

## Seznam použitých zkratk a symbolů:

Zkratka/znak:	Vysvětlení zkratky/znaku:
Symbol	Popis
EBW	Svařování elektronovým paprskem
PLC	Programovatelný logický počítač
Ni-slitin	Niklové slitiny
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
FS ČVUT	České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
EDX	Energiově disperzní spektroskopie
$E_p$	Potenciální energie [J]
$e$	náboj elektronu [kg]
$U$	urychlovací potenciál [kg]
$E_k$	kinetická energie [J]
$m$	hmotnost elektronů [kg]
$v$	rychlost sváření [mm/s]
$\lambda$	vlnová délka [nm]
$h$	Planckova konstanta
$P$	Příkon paprsku [W]
$I$	Proudová hustota [I]
$Q$	Tepelný příkon [J/mm]
$E$	Urychlovací napětí paprsku [V]
HV	Tvrдость podle VIKRSE
$F$	Zatěžovací síla [N]
$U$	velikost úhlopříčky