



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POROVNÁNÍ TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ MATERIÁLŮ LASEREM A SVAŘOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ

COMPARISON OF LASER WELDING AND ELECTRON BEAM WELDING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Trost

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Daniel Trost**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Porovnání technologie svařování materiálů laserem a svařování svazkem elektronů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Porovnání geometrie svarů v závislosti na svařovacích parametrech při svařování laserovým svazkem a svazkem elektronů na zadaném materiálu.

Cíle bakalářské práce:

- Osvojit si základy technologie laserového svařování.
- Osvojit si základy technologie svařování svazkem elektronů.
- Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.
- Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru.

Seznam doporučené literatury:

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technológie,1. vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4

KANNATEY-ASIBU, E.: Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3

SCHULTZ. Elektronenstrahlschweißen. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Düsseldorf: Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren, DVS-Verl, 2000. ISBN 3871551929.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

TROST Daniel: Porovnání technologie svařování materiálů laserem a svařování svazkem elektronů

Práce předkládá porovnání a technické hodnocení dvou technologií svařování – tedy nerozebíratelného spojení dvou materiálů, v našem případě superslitiny Inconel 718. Na základě technologického parku společnosti Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. přichází v úvahu dosud používaný způsob svařování svazkem elektrod, který je v této práci porovnáván se svařováním laserem z důvodu jeho rychlosti svařování a malého vneseného tepla během svařovacího procesu.

Klíčová slova: Inconel 718, svařování, laser, svazek elektronů

ABSTRACT

TROST Daniel: Comparison of laser welding and electron beam welding technology

Thesis presents a comparison of technical evaluation of two welding technologies – dismountable connection of two materials, in this case superalloy Inconel 718. On the basis of the technological park of Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. coming into consideration still used the electron beam welding method which is compared in this work with the laser welding due to speed up the welding and a little heat input during the process of the welding.

Keywords: Inconel 718, welding, laser beam, electron beam

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TROST, Daniel. *Porovnání technologie svařování materiálů laserem a svařování svazkem elektronů*. Brno, 2017. 34 s, 3 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 27.5.2017

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D za cenné a velmi přínosné rady týkající se zpracování bakalářské práce, dále děkuji za velikou pomoc Liboru Dupákovi Ph.D. Poděkování patří také společnosti Honeywell Aerospace Olomouc, s.r.o. za poskytnuté téma bakalářské práce a jejím zaměstnancům za ochotnou pomoc při řešení práce. A nakonec, ne však významem, chci poděkovat své rodině za velikou podporu v průběhu celých studií.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Možnosti svařování	10
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ	11
2.1 Svařování svazkem elektronů	11
2.1.1 Fyzikální princip	11
2.1.2 Princip svařování	13
2.1.3 Konstrukce elektronové svářečky	15
2.2 Svařování laserem	18
2.2.1 Princip svařování	19
2.2.2 Vlastnosti laserového svazku	20
2.2.3 Rozdělení laserů.....	20
2.2.4 CO ₂ laser	22
2.2.5 Nd: YAG laser	24
2.2.6 Vláknový laser	26
2.3 Porovnání technologií svařování	27
3 INCONEL 718	28
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
4.1 Makro snímky	30
4.2 Mikro snímky	32
5 ZÁVĚR	34
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD

I proudové motory používané k pohonu letadel jsou v dnešní době nuceny snižovat spotřebu paliva a zvyšovat svoji účinnost, jednou z možností, jak účinnost motoru zvýšit je zvýšení teploty spalování, které ovšem klade zvýšené nároky na použitý materiál a konstrukci plynových turbín, kde jednou z klíčových součástí je spalovací komora. Společnost Honeywell jako jedna z lídrů, která se na výrobu proudových motorů zaměřuje, vlastní jak vývoj, tak výrobu v České republice. Přičemž v tomto vývoji požaduje porovnání dvou špičkových technologií svařování, které se používají při výrobě spalovací komory. Komora je vyrobena ze super slitiny Inconel 718.



Obr. 1 Proudový motor typ TFE731 [14]



Obr. 2 Hawker 900XP (Business jet) [8]

Obr. 3 Typický příklad: Falcon 900 [24]

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Důvody společnosti Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. pro vypsání této bakalářské práce, která se zabývá porovnáním dvou metod svařování, byly zejména nízká produktivita výroby zapříčiněna časem vakuování, nízká spolehlivost zařízení (poruchy) a neuspokojivá dostupnost servisu a náhradní dílů. Podstatný vliv na tento stav má stávající unikátní dodavatel zařízení a absence alternativních dodavatelů dílů a servisu. Bakalářská práce se věnuje prozkoumání možnosti dosavadní způsob svařování nahradit jinou ekonomičtější metodou, která by však splňovala náročné kvalitativní požadavky, které společnost požaduje.

1.1 Možnosti svařování [2], [3], [5], [13], [14]

TIG - běžná metoda používaná pro svařování vysoce legovaných materiálů, ale metoda s relativně vyššími náklady, která má navíc velkou tepelně ovlivněnou oblast a proto není vhodná

MIG/MAG - pro svařování tohoto typu materiálů se nepoužívá, jednou z příčin je vysoká cena potřebného přídavného materiálu, který se průmyslově pro tyto účely téměř nevyrábí

PLASMA - tato metoda by zřejmě byla vhodná, například jako mikro plazma, avšak problém by byl stejný jako u předchozí metody a to s přídavným materiálem, další nevýhoda je velké teplotní ovlivnění okolí svaru

SWAZEK ELEKTRONU - metoda bude popsána v následujících kapitolách

LASER - metoda bude popsána v následujících kapitolách

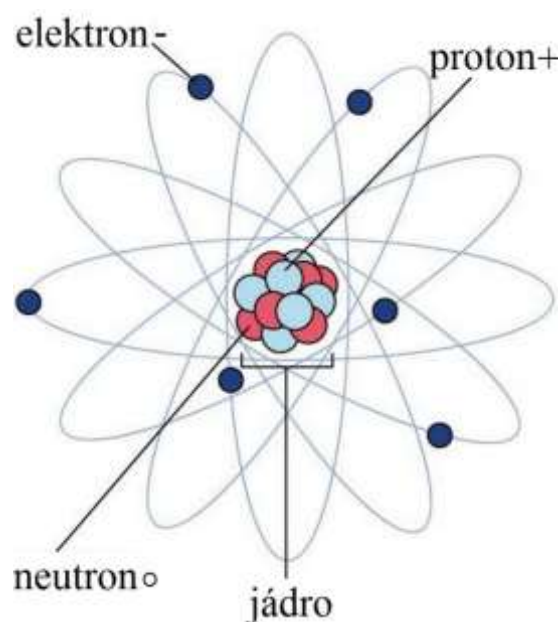
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

2.1 Svařování svazkem elektronů [5], [11], [17], [19], [22], [23], [27], [31]

Urychlený a zaostřený proud elektronů dopadá na povrch materiálu, kterým díky své vysoké kinetické energii proniká hluboko do materiálu. Při srážkách dopadajících elektronů s atomy základního tělesa, dochází ke zbrzdění elektronu a tím ke vzniku tepla. Kvůli rozptylu svazku elektronů v běžné atmosféře je nutné svařovat ve vakuu přibližně 10^{-4} Pa.

2.1.1 Fyzikální princip [11], [17], [19], [22], [23], [27], [31]

Atom je tvořen jádrem a obalem. V jádru se nachází proton a neutron, obal tvoří záporně nabitě elementární částice- elektrony. Základní fyzikální vlastnosti elektronu jsou uvedeny v tab. 1. Hmotnost elektronu je o tři řády nižší než hmotnost kladně nabitých protonů a elektricky neutrálních neutronů, které společně tvoří jádro atomu. Lze tedy říci, že v jádře se soustřeďuje většina hmotnosti atomu, vedle toho elektronový obal tvoří většinu objemu atomu. Zdánlivá nevýhoda malé hmotnosti elektronu je však kompenzována jeho záporným nábojem, díky kterému je možné elektron urychlit vložení do elektrického pole a tak získat požadované množství energie, díky jeho urychlení.



Obr. 4 Atom a jeho části [30]

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti elektronu [28], [30].

Základní veličiny	
Hmotnost	$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ [kg]
Elementární náboj	$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ [C]
Poloměr	$r_e = 2,82 \cdot 10^{-15}$ [m]

Elektron pohybující se v elektromagnetickém poli může získat či ztratit kinetickou energii, která je dána vztahem:

$$E_k = |q_e \cdot U| = \frac{1}{2} m_e v^2, \quad (2.1)$$

kde: q_e [C] - náboj částice
 U [V] - urychlovací napětí
 m_e [kg] - hmotnost elektronu
 v [$m \cdot s^{-1}$] - rychlost elektronu

Jednotka energie se většinou používá Joule (J), ale v částicové fyzice se používá jednotka elektronvolt (eV). Přičemž vztah mezi nimi je $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Dle rovnice (2.1) tedy platí, že kinetická energie elektronu je dána jeho hmotností a rychlostí. Z uvedené rovnice můžeme tedy snadno vyjádřit vztah, kterým je definována rychlost elektronu urychleného z klidového stavu:

$$v = \sqrt{2 \frac{|q_e \cdot U|}{m_e}} \quad (2.2)$$

Dále pro elektrony pohybující se v elektrickém poli rychlostí 'v' platí, že jsou ovlivňovány elektromagnetickým polem, které na ně působí silou označovanou jako Lorentzova síla:

$$\vec{F}_L = q_e \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (2.3)$$

kde: E [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$] - intenzita elektrického pole

\vec{B} [T] - magnetická indukce pole

Z toho vyplývá, že pomocí elektromagnetického pole jsme schopni měnit jak velikost rychlosti elektronu, tak i jeho směr.

Avšak výše uvedené vztahy a tedy i případné výsledky výpočtů kinetické energie, rychlosti elektronu a Lorentzovi síly jsou platné v nerelativistické fyzice. V našem případě se velikost energie používaná při obrábění či svařování svazkem elektronu pohybuje od 60 do 120 kW a více. Při dané energii se rychlost elektronu pohybuje kolem $134\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. To odpovídá přibližně 30% rychlosti světla ve vakuu a tím se dostáváme do relativistické fyziky. Přičemž danou rychlostí se elektrony pohybují již od urychlovacího napětí $U = 50 \text{ kV}$ a proudu 10 mA. Relativistickou fyzikou se má smysl zabývat již od přibližně 10% rychlosti světla, kdy se relativistické jevy více projevují a výsledky se tedy výrazněji liší. A to z důvodu zvyšující se hmotnosti tělesa pohybující se touto rychlostí. Tento poznatek je tedy při výpočtech nutno brát v potaz. Výsledek vypočítaný v nerelativistickém modelu odpovídá hodnotě $v = 1,45 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($145\,000\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$). Rozdíl rychlostí při urychlovacím napětí $U = 50 \text{ kV}$ jsou tedy téměř 4%.

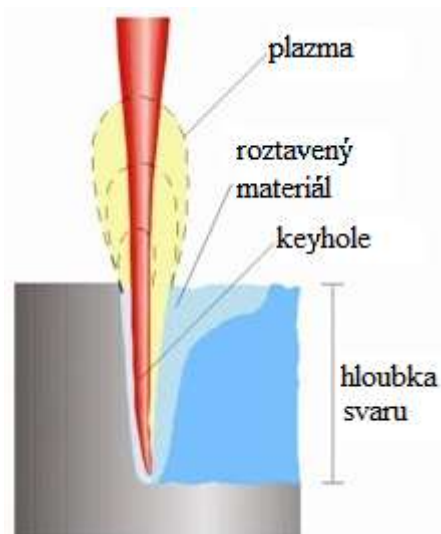
Obecně tedy platí, že rychlost elektronu je dána elektrickým polem o intenzitě E , které urychluje elektron jako záporně nabitou částici. Elektrické pole je dáno rozdílem elektrických potenciálů mezi anodou a katodou tedy tzv. urychlovacím napětím. Čím větší je urychlovací napětí tím větší je i jeho rychlost. Dále platí, že s rostoucí rychlostí roste i velikost energie elektronu a tím vnesené teplo do tělesa ostřelovaného elektrony. Urychlovací napětí lze tedy považovat za jeden ze základních parametrů technologie svařování svazkem elektronu.

Vliv magnetického pole zmíněného výše na elektron je analogický. Pokud se částice pohybuje ve směru rovnoběžném se směrem magnetických indukčních siločar, tak na něho nepůsobí žádná síla a jeho počáteční rychlost se nemění. Naopak pokud elektron a směr indukčních siločar svírají úhel 90° , tak jsou na něho magnetické síly největší možné. Z toho plyne, že při pohybu elektronu v magnetickém poli na něj působí magnetická síla, ta vychyluje jeho dráhu a tím mění jeho směr rychlosti. Tento poznatek se využívá pro přesné řízení a zaostření elektronového svazku.

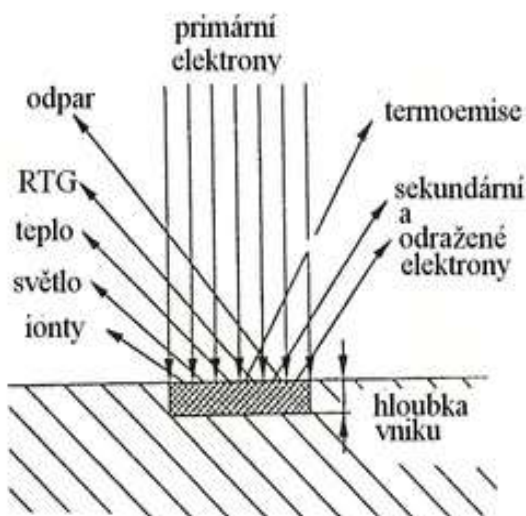
2.1.2 Princip svařování: [5], [17], [19], [23], [27]

Nepružné srážky urychlených primárních elektronů si předávají kinetickou energii. Ovšem pouze část elektronů zasáhne a tím předá svoji kinetickou energii krystalové mřížce svařovaného materiálu, přičemž právě těmto srážkám elektronů s krystalovou mřížkou je přímo úměrné vnesené teplo do elektrony ostřelovaného materiálu.

Po určité době, se elektrony ostřelovaný materiál zahřeje, nataví, začne vypařovat (sublimovat) a páry kovu začnou unikat do okolního prostředí. Díky tomu, že proces probíhá ve vakuu, tak dochází k silné expanzi par kovu do okolního vakua. Tím vzniká válcová paroplynová dutina obklopená roztaveným kovem tzv. keyhole (klíčová dírka), viz obr. 5 díky které je možno svařovat značné tloušťky materiálu s vysokou štíhlostí svaru. Hloubka dutiny závisí jednak na kinetické rychlosti elektronů, tak na rychlosti posuvu a vlastnostech ostřelovaného materiálu.



Obr. 5 Keyhole [28]



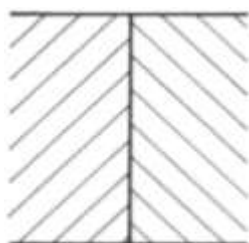
Obr. 6 Ztráty během svařování [23]

Jak již bylo zmíněno, část elektronů se zcela pružně odrazí od povrchu materiálu, kvůli čemuž klesá účinnost daného typu svařování. Dále u této metody platí, že změnou rychlosti elektronu vzniká spojitě rentgenové záření, které se opět projevuje jako ztráta. Další ztrátou výkonu je například ionizace, vyzářené světlo či teplo. Všechny tyto průvodní jevy jsou nazývány ztrátami během svařování. Přičemž celkové ztráty svařování svazkem elektronů běžně činí 10 až 40% energie svazku. Viz obr. 6.



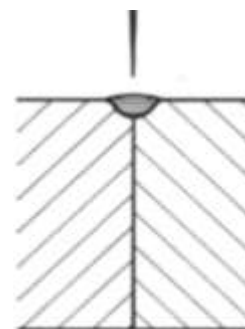
Obr. 7 Půdorys s označením oblastí svařování metodou keyhole [23]

Nyní se podíváme na jednotlivé fáze vzniku keyhole podrobněji:



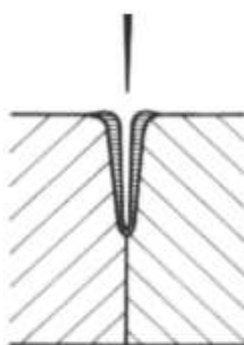
typý spoj

A... těsně přiložené spojované materiály
(bez přídavného materiálu)



materiál se na
povrchu tavi

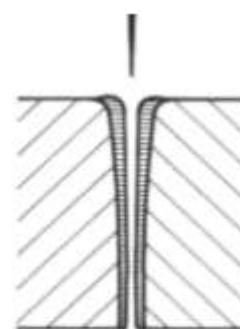
B... začátek svařování, elektrony dopadají na
povrch tělesa a natavují ho



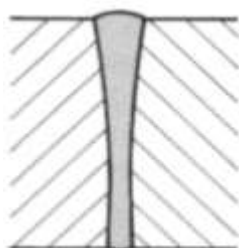
vznik keyhole

C... díky elektrony vnesené energii se materiál tavi, poté povrchové napětí
roztaveného materiálu a tlak odpařovaných par odtlačuje roztavený kov
a tím vzniká volný prostor pro dopad elektronů do větší hloubky,
kde se mechanismus stále opakuje. Tím vzniká tzv. keyhole, přičemž
proces vytváření keyhole je výrazně vyšší než odvod tepla do okolí

D... keyhole v plné tloušťce



keyhole v plné
tloušťce



svar po ztuhnutí

E... ochlazení svařovaného materiálu pod teplotu
solidu díky odvodu tepla do okolního materiálu a prostředí (vakua)

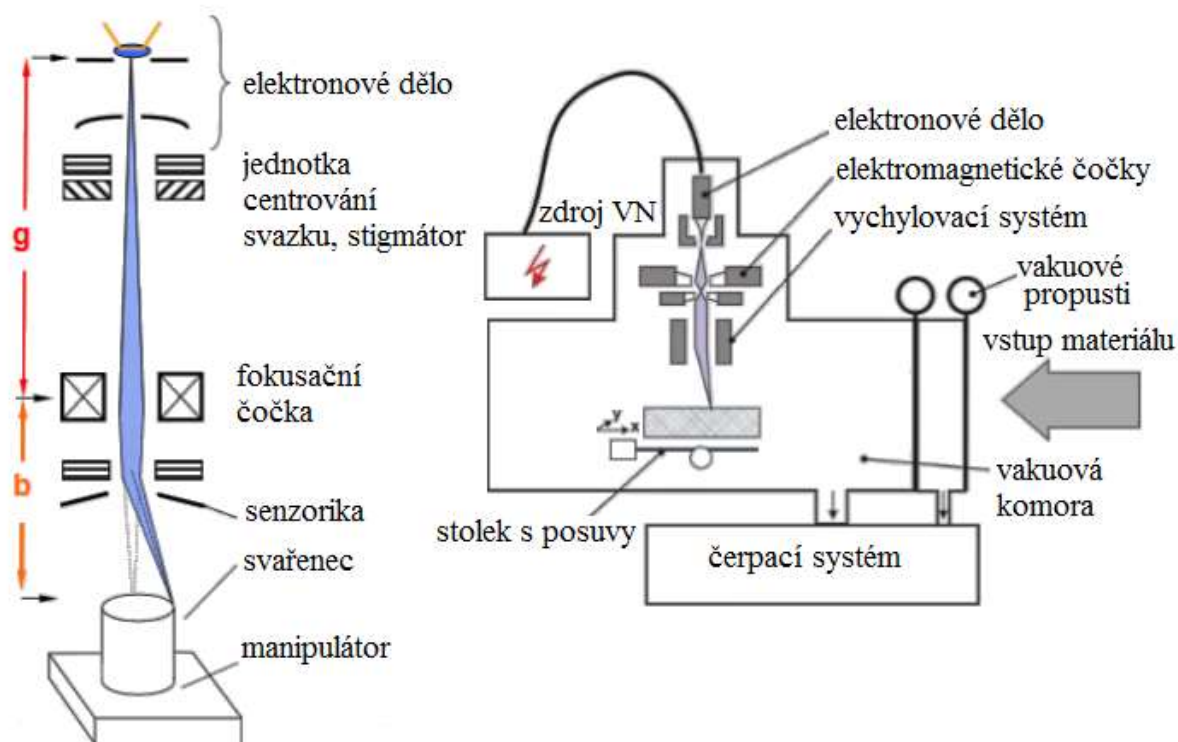
Obr. 8 Jednotlivé fáze vzniku keyhole [23]

2.1.3 Konstrukce elektronové svářečky [11], [17], [19], [22], [23]

Elektronová svářečka viz obr. 9 je zařízení, které generuje, přivádí a během jeho cesty ovlivňuje svazek elektronů. V průběhu let, kdy se tato technologie vyvíjela, vzniklo nesčetné množství typů svářeček, od malých, jednoduchých či velkých, složitých a tím i nákladných zařízení. Tím, že je tato metoda používána v různých oborech s velkou variabilitou svařovaných materiálu, geometrie a rozměrů svarů se elektronové svářečky téměř výhradně vytváří na míru dle požadavků zákazníka. Konstrukce samotná je z velké části určena zkušeností výrobce elektronových svářeček. Rozměrovými, kvalitativními či výkonnostními požadavky zákazníka a dále pak jeho požadavky na robotizaci či automatizaci výrobního procesu.

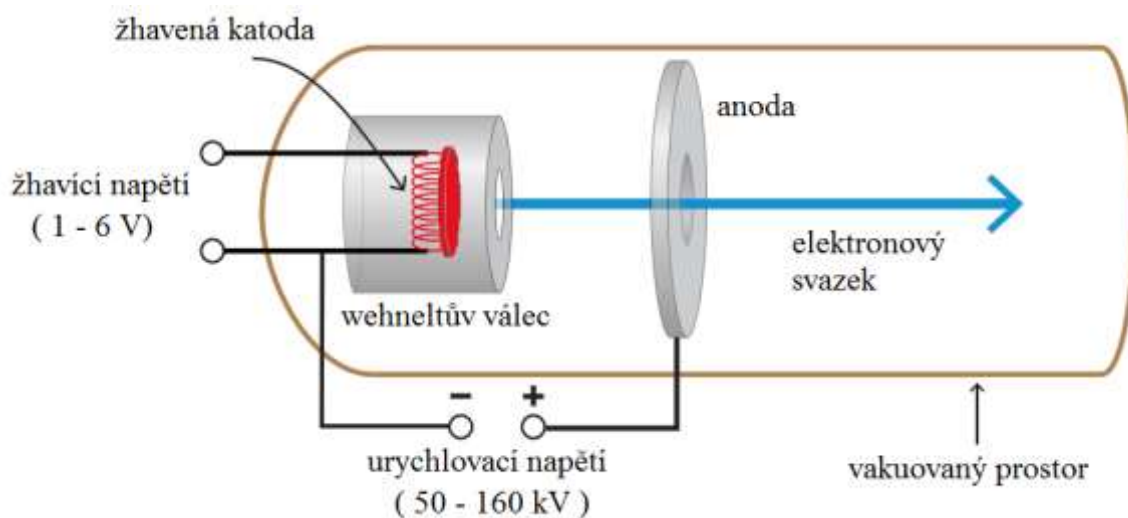
Zařízení pro svařování svazkem elektronů, tedy elektronovou svářečku tvoří následující části - elektronové dělo, zdroj vysokého napětí, vychylovací a zaostřovací systém, vakuová část, mechanické manipulátory. Součásti i s jejich funkcí jsou podrobněji popsány níže v práci.

Schéma zařízení:



Obr. 9 Schéma elektronové svářečky [19]

Nyní se podrobněji zaměříme na jednu z hlavních částí a to na elektronové dělo:



Obr. 10 Elektronové dělo [11]

Žhavená katoda- tvoří ji ohnutý drátek wolframu, pro vyšší supluje výkony pásek, pro nejvyšší výkony se používá wolframová destička. Ta je nejvhodnější variantou kvůli rovnoměrnému ohřátí a tím rovnoměrnému vyzařování elektronů. Destička je ohřáta na teplotu přibližně 2 500 °C žhavicím napětím 3V (odporově). Termoemisí se z povrchu destičky oddělují elektrony, které jsou následně usměrněny a urychlovány požadovaným směrem

Wehnetlův válec- jeho účel spočívá v zaostření svazku elektronů. Záporný náboj Wehnetova válce a přítomné elektrické pole společně zaostřuje letící elektrony do osy svazku

Urychlovací napětí- vytváří el. pole mezi žhavenou katodou a anodou. Toto pole urychluje uvolněné elektrony ve směru anody.

Anoda - pro zjednodušení ocelový kruhový výstřižek plechu s dírou uprostřed. Díky vysokému napětí mezi žhavenou katodou a anodou má anoda kladný náboj. Tím elektrony přitahuje a urychluje. Elektrony prolétají středovým kruhovým otvorem a tvoří svazek elektronů.



Obr. 11 Katoda s Wehnetlovým válcem

Zaostřovací systém- funguje jako optická spojka. Používá se elektromagnetická čočka, která je tvořena cívkami s pólovými nástavci. Čočka vytváří elektromagnetické pole a tím zakřivuje dráhy prolétajících elektronů zpět k ose svazku a tím dochází k fokusaci.



Obr. 12 Vychylovací cívkky

Vychylovací systém - elektronové dělo je statické. Proto je zapotřebí nějakým způsobem ovlivnit směr svazku, aby bylo možné svařovat potřebné geometrie svarů. Za tímto účelem se používají tzv. vychylovací cívkky. V cívkách se změnou přiváděného elektrického proudu změni i magnetické a elektrické pole a tím se změni směr svazku elektronu a tedy i místo dopadu.

Čerpací systém - park odčerpávacích zařízení je volen dle potřebné dosahované hloubky vakua. Pro předvakuum tj. asi do 1 Pascalu se používají rotační olejové vývěvy. Pro hlubší vakuum, přibližně kolem 10^{-2} Pa se používají turbomolekulární vývěvy.

Prostor elektronového děla jako i zbylé prostory elektronové svářečky musí být vakuované, aby nedocházelo k předčasným srážkám elektronů s ostatními částicemi atomů v atmosféře.



Obr. 13 Rotační olejová vývěva [9]



Obr. 15 Princip rotační olejové vývěvy [4]



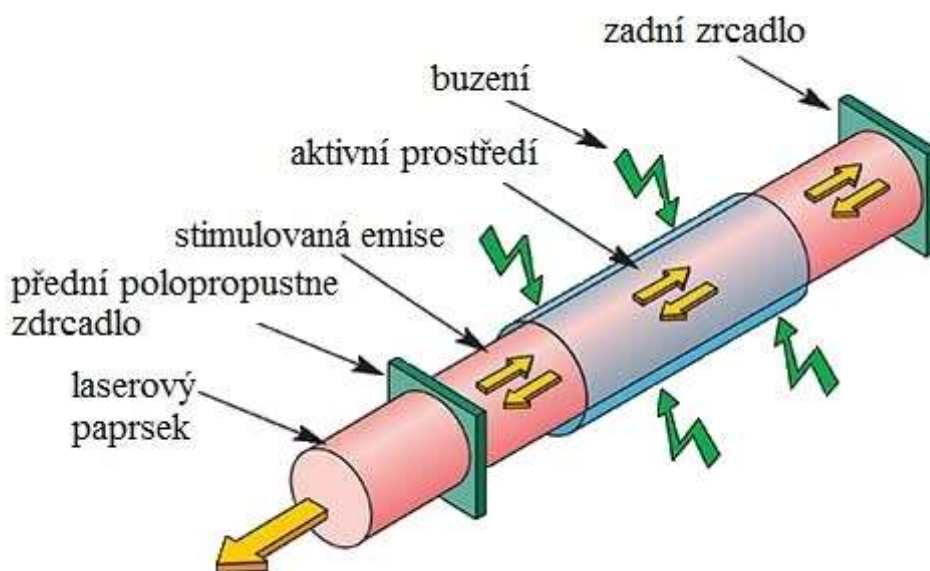
Obr. 14 Turbomolekulární vývěva [25]

2.2 Svařování laserem [2], [3], [6], [7], [10], [13], [20], [21], [26], [27]

Historie laseru sahá do roku 1916, kdy Albert Einstein ve své práci „Emise a absorpce světla podle kvantové teorie“, poprvé upozornil na možnost existence stimulované emise, vedle již známé spontánní emise. Přičemž stimulovaná emise představuje jeden ze základních principů kvantové elektroniky. Každý zdroj světla excituje velké množství atomů, kterým je jednorázově nebo nepřetržitě dodávána energie a právě Einstein poukázal na možnost, že atomy mohou vyzařovat světlo nejen spontánně, ale také vynuceným způsobem.

Název LASER je zkratkou počátečních písmen anglického spojení slov (akronymu):

„Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“. Které v českém jazyce znamená „zesílení světla stimulovanou emisí záření“.



Obr. 16 Schéma principu laseru [6]

V současné době laserové technologie nacházejí využití v široké škále oborů a to v medicíně, metrologii, stomatologii až po vysoce výkonové lasery používané převážně pro průmyslové aplikace. Rozdíl mezi průmyslovými a ostatními energetickými zdroji energie je v možnosti dosažení různé velikosti hustoty výkonu na dopadové ploše, běžně užívané hodnoty jsou 10^4 až $10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ přičemž v maximu lze dosáhnout výkonu až $10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Daný výkon lze navíc přesně dávkovat a reprodukovat.

Samotným laserem chápeme svazek fotonů, který je netečný vůči magnetickému či elektrickému poli. Právě díky této vlastnosti se dají svařovat i magnetické materiály. Další odlišností, kterou laser poskytuje je fokusace - tedy schopnost zaostření paprsku jednak na velmi malou plochu (o průměru až $10 \mu\text{m}$), ale také do určité hloubky, čehož se využívá při povrchovém kalení nebo právě při svařování.

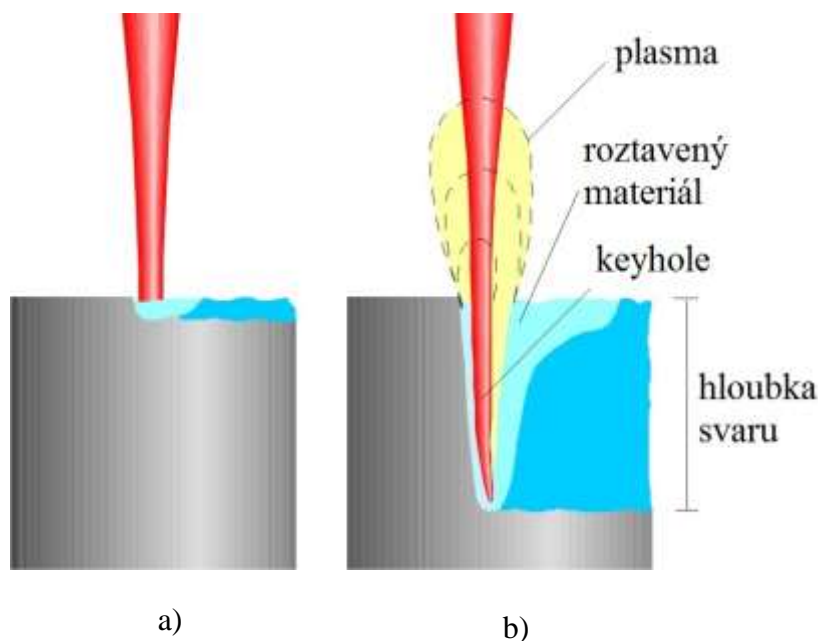
2.2.1 Princip svařování [2], [7], [10], [20], [21], [26]

- princip vzniku i postup vytvoření keyhole je téměř totožný jako u svařování svazkem elektronů

Při vzájemném působení laserového záření s povrchem předmětu dochází postupně k těmto procesům. V první fázi může dojít k reflexi významné části laserového záření, avšak část energie je vždy absorbována povrchem materiálu a tím dochází k jeho zahřátí. S postupným nárůstem teploty se zvětšuje i schopnost absorpce tepla a tím teplota předmětu roste rychleji. Tímto procesem dojde až k lokálnímu natavení a následně k odpaření materiálu. V případě odpařování materiálu vzniká v základním materiálu paroplynový kanál tzv. klíčová dírka (keyhole). Tento režim se používá pro svařování velkých tloušťek materiálu. Vyznačuje se vysokou štíhlostí svaru (viz obr. b)). Ke vzniku keyhole je nezbytná dostatečná hustota výkonu a to minimálně $10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Druhý možný režim svařování je tzv. kondukční režim, kdy nízkou hustotou energie svazku je zahřát pouze povrch součásti a teplo se šíří pouze vedením (kondukcí) a netvoří se keyhole, viz obr. a. Tato metoda je podobná principu svařování například metodou MIG či TIG. Používá se zejména pro svařování tenkých plechů a fólií. Typickou vlastností kondukčního režimu je menší hloubka penetrace a větší tepelně ovlivněná oblast.

- kondukční svařování (vedením tepla)
- metoda klíčové dírky (keyhole)

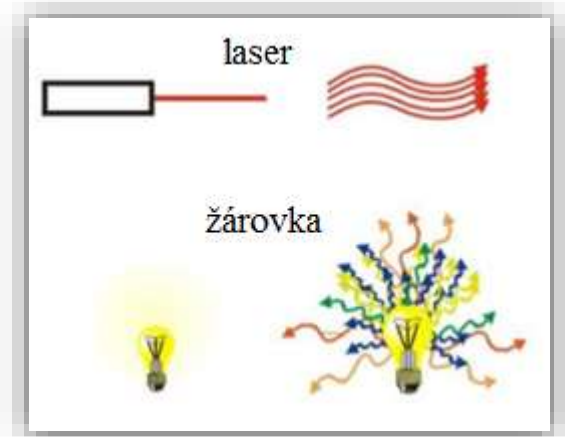


Obr. 17 Možné režimy svařování laserem a) kondukční režim b) režim keyhole [28]

2.2.2 Vlastnosti laserového svazku: [2], [7], [20], [26]

Soustředěný svazek fotonů jako zdroj energie

- ✓ má vysokou hustotu výkonu na dopadové ploše ($5 \cdot 10 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)
- ✓ schopnost soustředit energii na malou plochu (v ideálním případě průměr zaostřené stopy je stejný s vlnovou délkou)
- ✓ svazek fotonů nemá elektrický náboj a nelze jej tedy ovlivnit magnetickým či elektrickým polem
- ✓ přeměna energie záření se děje přímo ve svařovaném materiálu
- ✓ příkon tepla do materiálu se blíží teoretickému minimu a vnáší se do svaru ve velice krátkém čase
- ✓ vzniká minimální deformace svařovaného materiálu
- ✓ generátor emitující laserové záření umožňuje velice přesné dávkování energie



Obr. 18 Laserový paprsek [7]

2.2.3 Rozdělení laserů [20], [21]

1. dle délky generovaného impulsu

- ✚ kontinuální
- ✚ pulzní (ms-ns)
- ✚ ultrakrátké pulzní (ps-fs)

Tab. 2 Rozdělení laserů podle délky generovaného pulzu [20]

laserové zařízení	průměrný výkon	frekvence pulzů	špičkový výkon
kontinuální	1 mW – 100 kW	0 Hz – 1 kHz	1 mW – 100 kW
pulzní (5 – 500 ns)	100 mW – 1 kW	1 Hz – 100 kHz	1 kW – 1 GW
ultrakrátké pulzní (100 ps – 100 fs)	10 mW – 10 W	1 kHz – 10 GHz	10 W – 10 MW

2. dle aktivního prostředí

V závislosti na volbě aktivního prostředí mohou lasery produkovat záření různé barvy (vlnové délky).

Rozlišujeme následující druhy laserů:

- + plynové
 - nejčastějšími zástupci jsou CO₂ lasery, dále pak helium-neonový, argon- iontový a jódový laser
- + kapalinové
 - médiem je roztok barviva, díky čemu lze barvu laserového paprsku měnit v širokém rozmezí
- + pevnolátkové
 - nejčastěji užívaný je neodymový YAG laser, který využívá syntetický monokrystal yttrium- aluminiového granátu, kde některé yttriové ionty jsou nahrazeny neodymovými, dále do této kategorie patří vláknový laser
- + polovodičové = diodové
 - nejnovější typ laseru, kde k vytvoření laserového svazku dochází již v relativně velmi malém prostoru

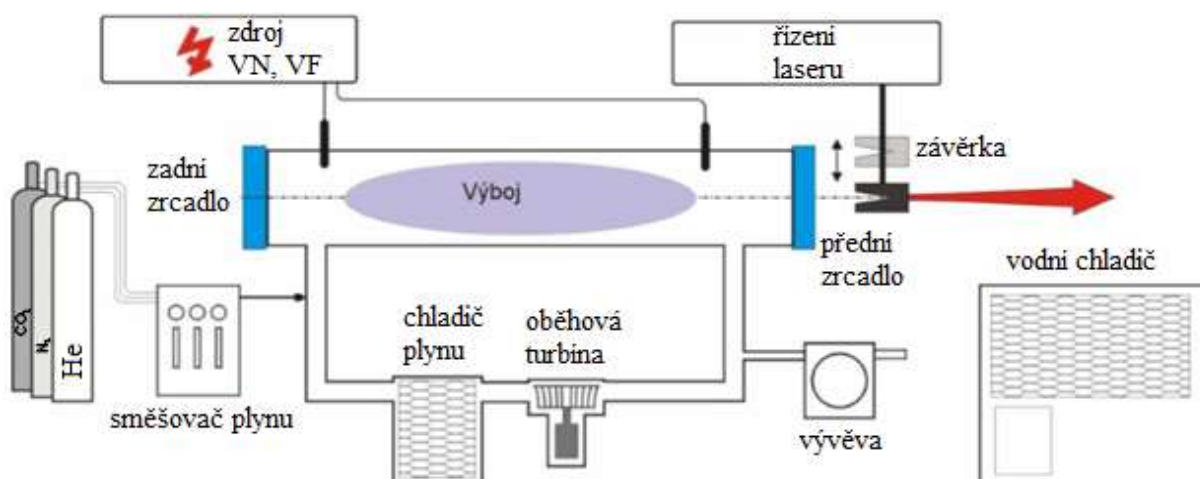
3. dle typu čerpání (buzení)

- + opticky (světlem): Nd: YAG, vláknové lasery
- + chemicky: chemické lasery využívané v armádě
- + elektrickým výbojem: CO₂, He-Ne
- + elektrickým proudem (injekcí nosičů náboje): laserové diody
- + elektronovým svazkem
- + rekombinací
- + tepelnými změnami

V současné době se v praxi používá celá řada průmyslových laserů, nyní se na některé z nich podíváme podrobněji.

2.2.4 CO₂ laser [7], [10], [20], [21], [26], [27]

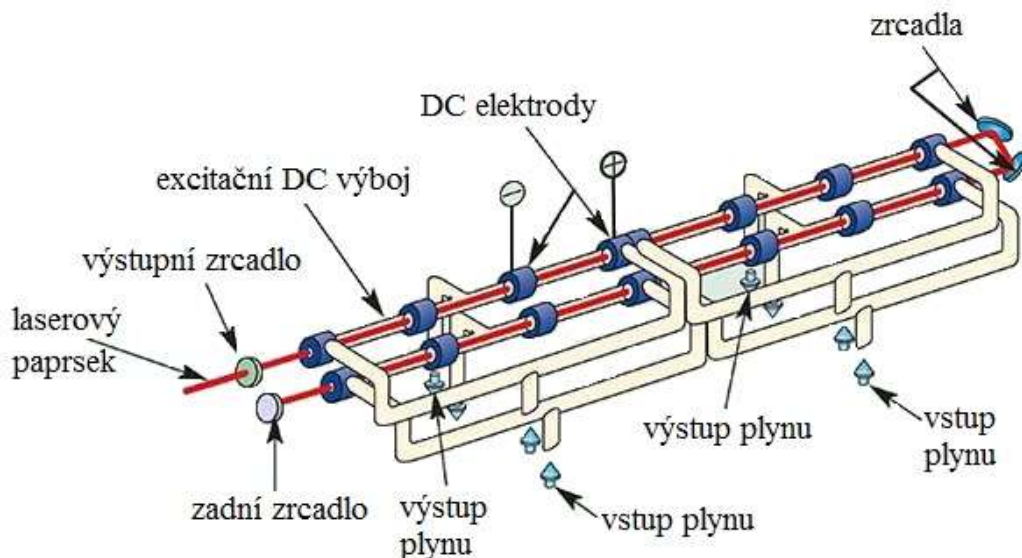
Spadá do kategorie plynových laserů. Aktivní prostředí je tvořeno směsí následujících plynů: CO₂, N₂ a He v poměru 1:4:5. Princip funkce je založen na zesílení paprsku laseru mnohonásobným průchodem skrze plyné prostředí. Buzení je zajištěno většinou elektrickým výbojem, ale existují i možnosti buzení elektronovým svazkem či chemickou reakcí. Vlnová délka výstupního záření je 10,6 μm, spadá tedy do infračervené oblasti. CO₂ lasery jsou schopny provozu jak v kontinuálním tak pulzním režimu. Účinnost daného typu laseru je mezi 10 až 15% a výkon je od několika wattů do přibližně 20 kW.



Obr. 19 Součásti CO₂ laseru [20]

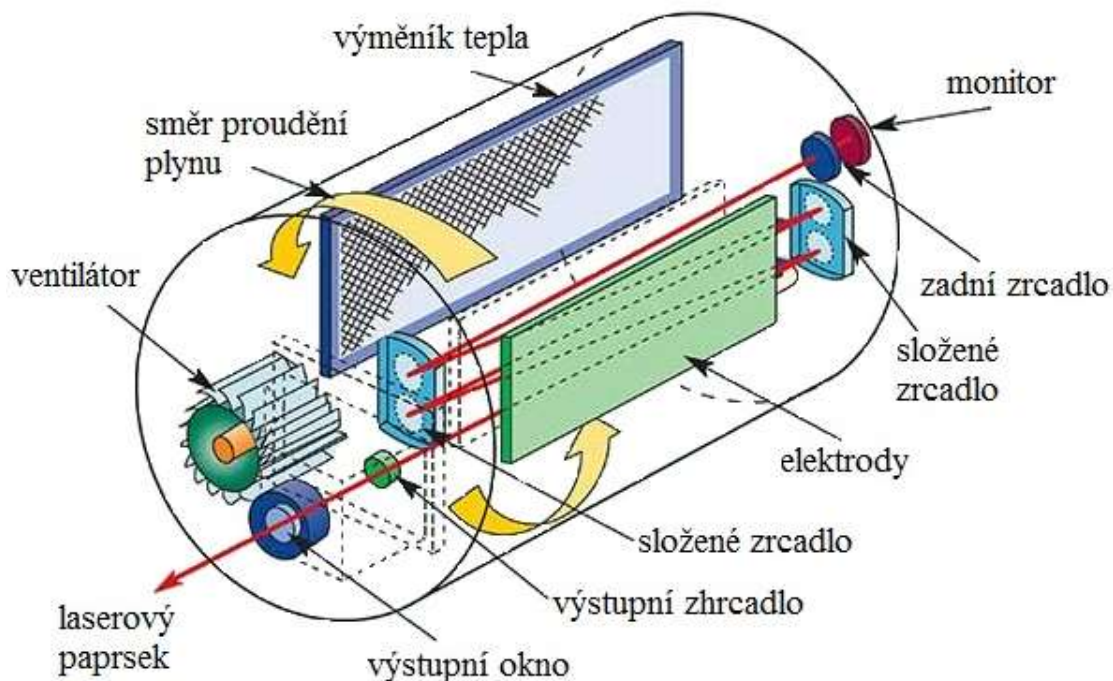
V průmyslu jsou používány tři základní typy CO₂ laseru. Jsou děleny dle směru proudění plynu v rezonátoru.

První typ je CO₂ laser s podélným prouděním, viz obr. 20. Buzení je pomocí elektrického výboje. Výkon tohoto typu laseru přesahuje i 10 kW. Díky své vysoké kvalitě výstupního paprsku ($K > 0,8-0,95$) je vhodný pro řezání.



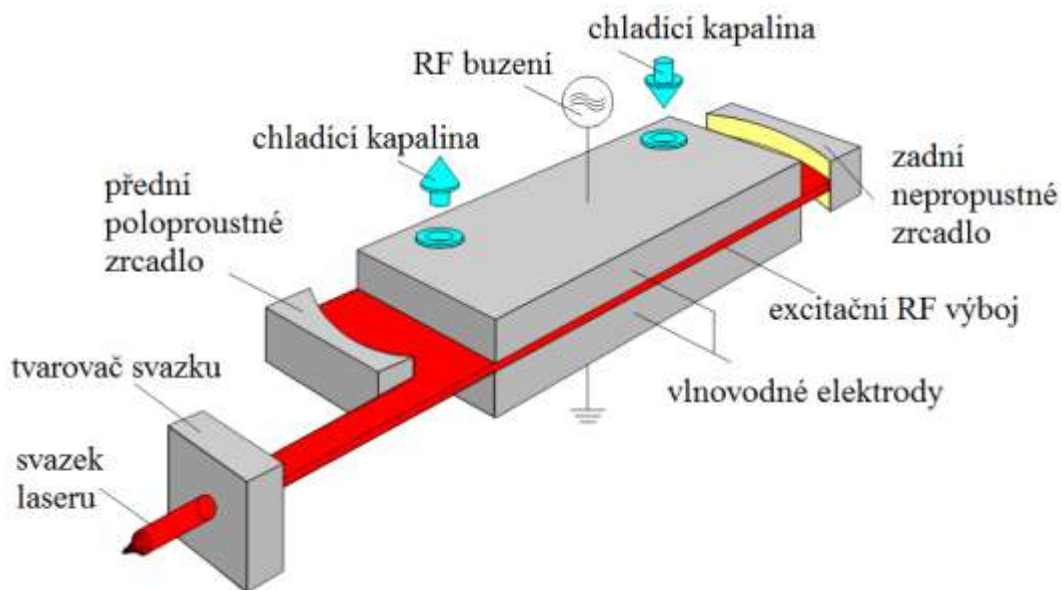
Obr. 20 CO₂ laser s podélným prouděním [6]

Druhý typ je CO₂ laser s příčným prouděním, kde díky nízké rychlosti proudění směsi plynu kolmo na osu rezonátoru tento typ poskytuje nižší kvalitu svazku ($K > 0,18$). Využití tento typ laseru nachází zejména při povrchovém kalení či svařování.



Obr. 21 CO₂ laser s příčným prouděním [6]

Třetím a nejmodernějším typem CO₂ laseru je deskový difuzně chlazený SLAB laser, který obsahuje 10 litrový zásobník na plynovou směs, který dle údajů výrobce vystačí na rok nepřetržitého provozu. Odvod tepla je řešen difuzí mezi aktivním prostředím a deskovými elektrodami, které jsou chlazeny vodou. Tento typ laseru zajišťuje vysokou kvalitu výstupního svazku ($K > 0,8$), rovněž snižuje spotřebu energie a plynů. Navíc díky absenci pohyblivých částí dosahuje delší životnosti.

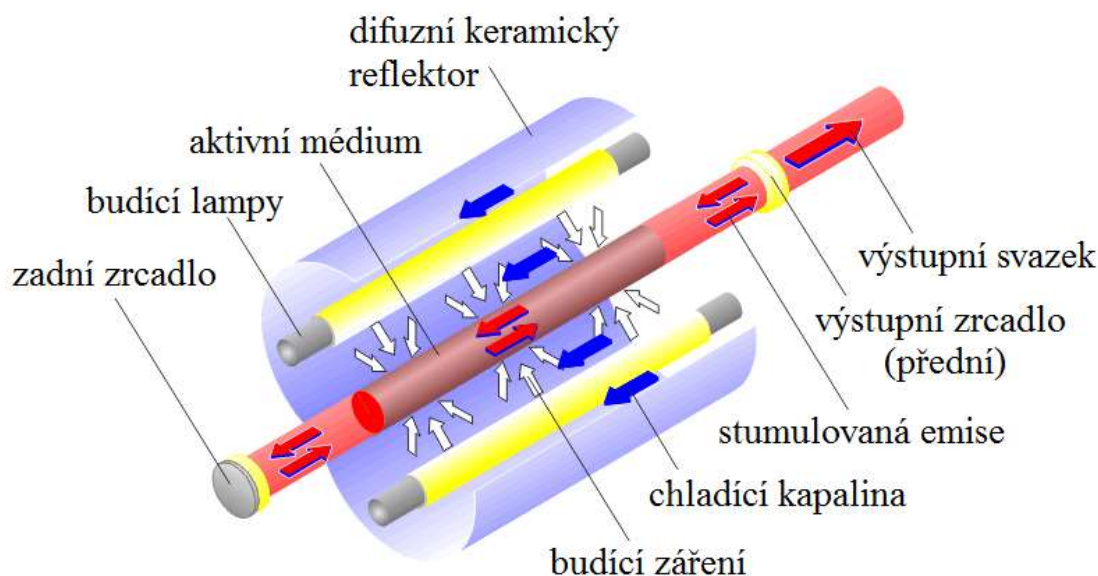


Obr. 22 Deskový difuzně chlazený SLAB CO₂ laser [20]

Vlivem požadavku, především automobilového průmyslu, se postupně přechází z CO₂ laserů k ekonomicky i fyzikálně výhodnějším pevnolátkovým laserům. Kam řadíme i následující typy.

2.2.5 Nd: YAG laser [2], [13], [20]

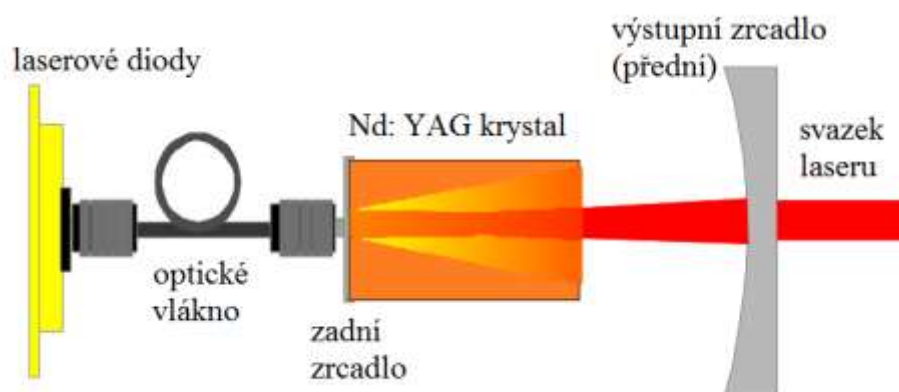
Je v průmyslové praxi nejčastěji používaným pevnolátkovým laserem. Aktivní prostředí je tvořeno tyčinkou monokrystalu yttria alumina granátu (odtud YAG), dále dopované neodymem (Nd³⁺). Tato tyčinka je dlouhá 15 až 20 cm s průměrem přibližně 10 mm. Záření generuje za pokojové teploty v pulzním i kontinuálním režimu na vlnové délce 1064 nm, lze dosáhnout i kratší vlnové délky, avšak s nižší účinností. Maximální výkon při vlnové délce 1064 nm a kontinuálním režimu je od stovek do tisíců wattů. Samotný laserový paprsek vzniká ozařováním tyčinky krystalu budícím zařízením. Pro tuto úlohu nejčastěji slouží výbojky nebo diody. Lasery buzené výbojkou (viz obr. 23) jsou méně účinné, protože výbojka oproti diodě produkuje značnou část energie ve formě tepla, které je později odvedeno vodním chlazením. Účinnost Nd: YAG laseru buzeného výbojkami jsou pouze 2 až 3, další nevýhodou jsou vysoké provozní náklady (energetická náročnost) a krátká životnost výbojek (přibližně 1 000 h). Použití tyto lasery nacházejí zejména při bodovém či švovém svařování. V pulzním režimu je dále možné vrtání a řezání zušlechťených ocelí.



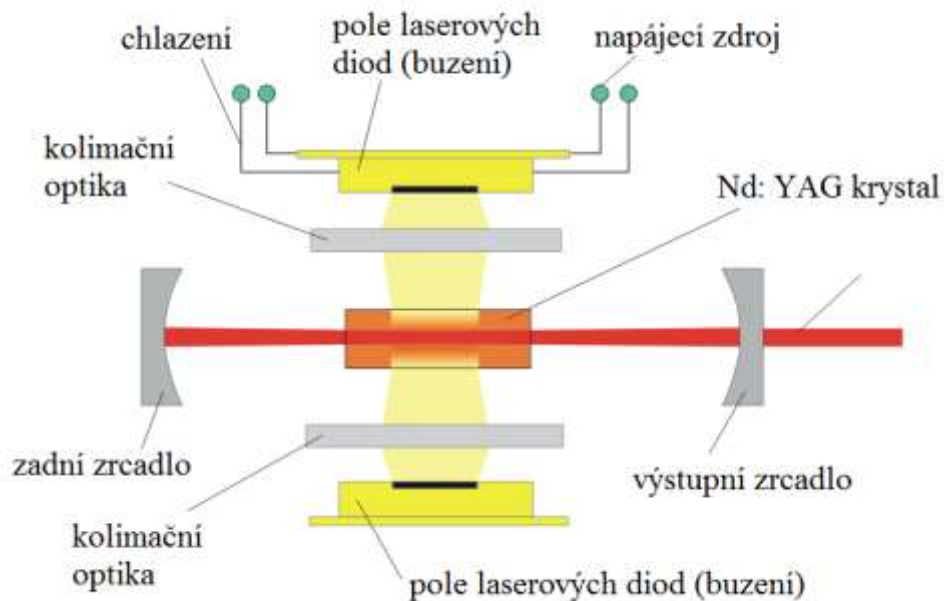
Obr. 23 Nd: YAG laser buzený výbojkou [13]

Nd: YAG lasery buzené polovodičovými diodami mají účinnost kolem 15 až 20% (přeměna el. energie na světelnou). Dále mají řádově menší spotřebu energie, vynikají kompaktností a nízkou hmotností. Avšak překážkou jejich většího rozšíření je vysoká pořizovací cena tohoto typu laseru.

V případě Nd: YAG laserů buzených diodami se rozlišují dva hlavní typy buzení. Podle umístění rezonátoru rozlišujeme: zadní buzení viz obr. 24 a boční buzení viz obr. 25. U zadního buzení se budící záření z laserových diod přivádí do YAG krystalu optickým vláknem (pozor nejedná se zde o vláknový laser, což je častý omyl) – diody tak mohou být externě mimo rezonátor, což je výhodné. Dále zadní buzení dosahuje lepší kvality svazku, nevýhodou tohoto umístění rezonátoru je nižší výkon. Přičemž u bočního buzení jsou vlastnosti laseru přesně opačně.



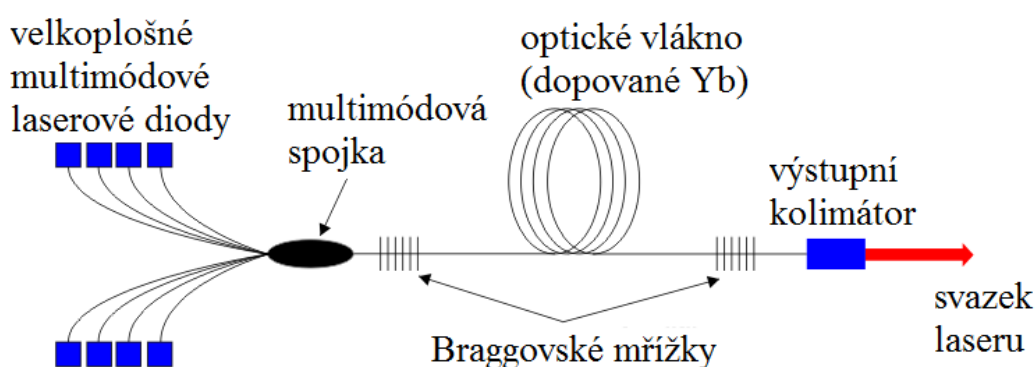
Obr. 24 Nd: YAG se zadním buzením [13]



Obr. 25 Nd: YAG s bočním buzením [13]

2.2.6 Vláknový laser [3], [13], [20], [21]

Nejmodernější typ patřící do skupiny pevnolátkových laserů. Aktivní prostředí je tvořeno optickým (křemenným) vláknem o délce několika metrů s průměrem v řádu mikrometrů. Vláknem je dopováno prvky vzácných zemin, nejčastěji ionty ytterbia (Yb). Buzení přichází z laserových diod skrze optickou spojku do optického vlákna. Namísto zrcadel jsou u tohoto typu laseru použity tzv. Braggovské mřížky. Tyto mřížky jsou struktury vytvořené na vnitřní straně optického vlákna. Pomocí UV záření mají zapsanou periodickou změnu indexu lomu. Díky tomuto nastavenému indexu lomu se mřížky chovají jako „zrcátko, které odráží pouze určitou vlnovou délku spektra světelného záření. Laserový svazek poté vychází z vlákna pomocí kolimátoru, kde dochází k jeho zaostření.



Obr. 26 Vláknový laser [13]

Velikou předností vláknového laseru je jeho jednoduchá konstrukce (celý laser je tvořen optickým vláknem), oproti CO₂ laseru je u tohoto typu absence čerpadel a nevyžaduje ani vodní chlazení jako Nd: YAG laser. Další výhodou je schopnost modularity. Laserové moduly lze jednoduše spojovat a tak lze postupně dosáhnout výkonu až 80 kW. Vláknové lasery mají vysokou účinnost a to 30 až 35%, dlouhou dobu životnosti, přibližně 100 000h, malé rozměry zařízení, vysokou kvalitu laserového svazku, dále nejnižší provozní náklady ze všech laserů na trhu a téměř nulové nároky na údržbu.

To vše přispívá k tomu, že vláknové lasery jsou v současné době nejprodávanějším typem průmyslových laserů na trhu. Použití nacházejí při mikroobrábění, gravírování, řezání a svařování.

2.3 Porovnání technologií svařování [2], [7], [11], [18], [19], [20]

laser:

- ☯ nižší pořizovací náklady
- ☯ nižší provozní náklady (el. energie)
- ☯ horší kvalita svaru
- ☯ vyšší efektivita, díky absenci času potřebného pro odčerpání vakua
- ☯ jednodušší mechanizace
- ☯ práce bez ochranné atmosféry

svazek elektronu:

- ☯ vyšší dosažitelná štíhlost svaru
- ☯ schopnost svaření větších tloušťek
- ☯ díky vakuu nejvyšší dosažitelná čistota svaru
- ☯ nižší svařovací rychlost
- ☯ vyšší výkon/účinnost (při stejném výkonu větší průvar)
- ☯ vyšší pořizovací náklady
- ☯ ještě menší (už tak malé) teplotní ovlivnění svaru
- ☯ vyšší produkční časy plynoucí z přečerpání vakua vně a dovnitř svařovací komory

3 INCONEL 718 [1],[15]

Je vytvrditelná (= vysoce legovaná) super slitina na bázi Ni-Cr známá také pod označením UNS N07718. Chemické složení viz tab. 3. Tato slitina spojuje korozivzdorné, žárupevné a žáruvzdorné vlastnosti. Je zaručeně svařitelná s vysokou odolností proti praskání.

Časté uplatnění nachází v leteckém průmyslu, při výrobě spalovacích turbín, raketových motorů, při extrakci ropy, plynu či v jaderném průmyslu.

Tab. 3 Chemické složení super slitiny Inconel 718 [15]

C	Mn	Si	Cr	Fe	Ni	P	B
0,08	0,35	0,35	17-21	zůstatek	50 - 55	0,015	0,006
Al	Mo	Cu	Nb + Ta	S	Ti	Co	
0,2 - 0,8	2,8 - 3,3	0,3	4,75 - 5,5	0,015	0,65 - 1,15	1,0	

Prvky v tabulce jsou uvedené v jednotkách %

Hodnota uvedena samostatně značí maximální možné zastoupení ve slitině

Tab. 4 Základní vlastnosti Inconelu 718 [15]

Základní vlastnosti	
Hustota	$\rho = 8220 \text{ [kg/m]}$
Teplota tání	$T_m = 1356 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Elektrická vodivost	$G = 1210 \text{ [mA/mm]}$
Tvrdost	$HB = 100 \text{ [B]}$

Tepelné zpracování:

K získání nejvhodnější kombinace pevnosti a zároveň zachování tažnosti se doporučuje následující tepelné zpracování: ohřev na 954 až 982 °C, 1 hodinu výdrž na dané teplotě, následně chladit na vzduchu, dále výdrž 8 hodin při konstantní teplotě 718 °C, poté opět chladit o 38 °C (100 °F) za hodinu až na teplotu na 621 °C, tuto teplotu držet 8 hodin a poté chladit na vzduchu na pokojovou teplotu.

Svařování:

Slitinu lze svařovat metodami: laserem, svazkem elektronů, metodu TIG a mikro plazmou, přičemž u posledních dvou metod použijeme jako přídavný materiál elektrodu INCONEL Filler Metal 718.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experiment, tedy vyhotovení svarů s následným metalografickým výbrusem, pozorováním daných svarů pod mikroskopem a jejich následný rozbor. Svařování super slitiny Inconelu 718 bylo provedeno jak laserem, tak svazkem elektronů. Chemické složení svařovaných vzorků získaných od společnosti Honeywell dle materiálové listu zasláného se vzorky vidíme v tab. 5. Tloušťka svařovaných desek byla 2mm a 1,8mm. Na snímcích uvedených níže jsou použity obě tloušťky materiálu a rozdíl je vždy na snímku okótovaný, případně uvedený v postranní tabulce.

Tab. 5 Chemické složení svařované super slitiny Inconel 718 [1]

C	Mn	Si	Cr	Fe	Ni	P	C
0,05	0,6	0,1	18,2	19,79	52,23	0,008	0,002
Al	Mo	Cu	Cb	Ta	Ti	Co	B
0,58	2,88	0,01	5,06	0,01	1,00	0,03	0,002

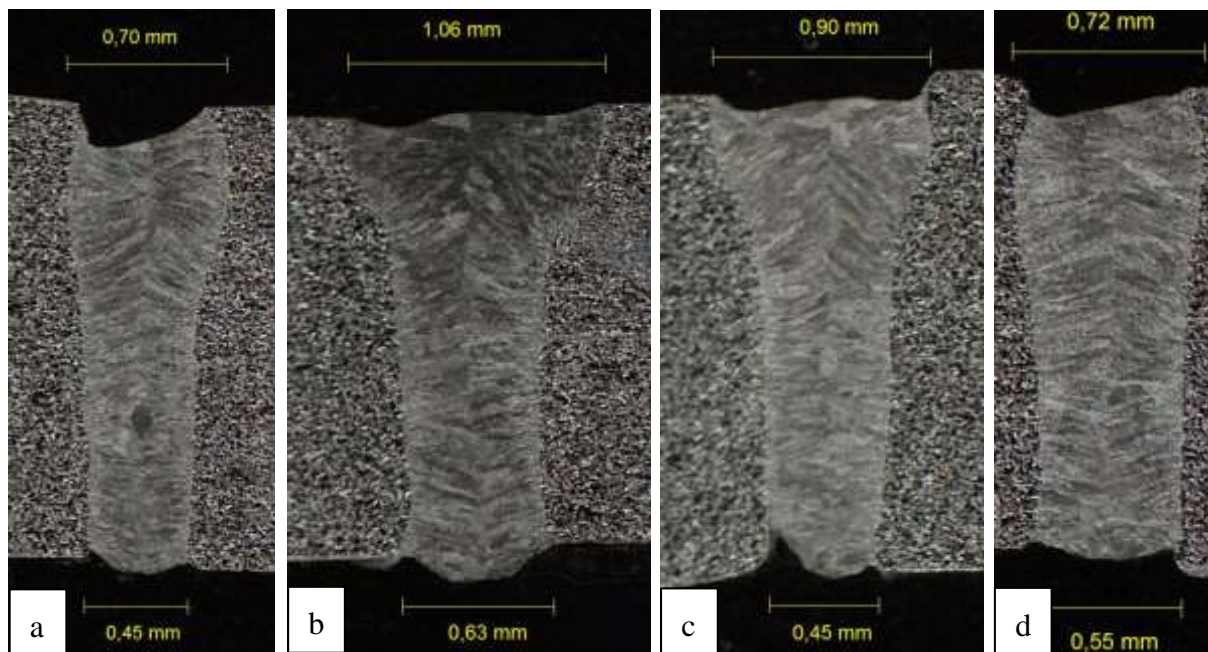
Prvky v tabulce jsou uvedené v jednotkách %

Laserem i svazkem elektronů byl tentýž materiál svařen vždy s různými svařovacími parametry, aby se prověřila kvalita svaru za různých svařovacích podmínek.

4.1 Makro snímky

EBW(elektronový paprsek)

parametry svařování: $U = 55 \text{ kV}$
 $v = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
vakuum = $2\cdot 10^{-2} \text{ Pa}$
poloha ohniska = 1 až 2 mm nad povrchem



Obr. 27 Makro snímky svarů vyhotovených metodou EBW

Tab. 6 Parametry svařování jednotlivých svarů (EBW)

svar	a	b	c	d
proud I [mA]	14	14	12	16
oscilace [mm]	0,1	0,15	0,1	0,15
výkon P [W]	770	1045	660	880
tloušťka mat. [mm]	1,8	2,0	1,8	2,0

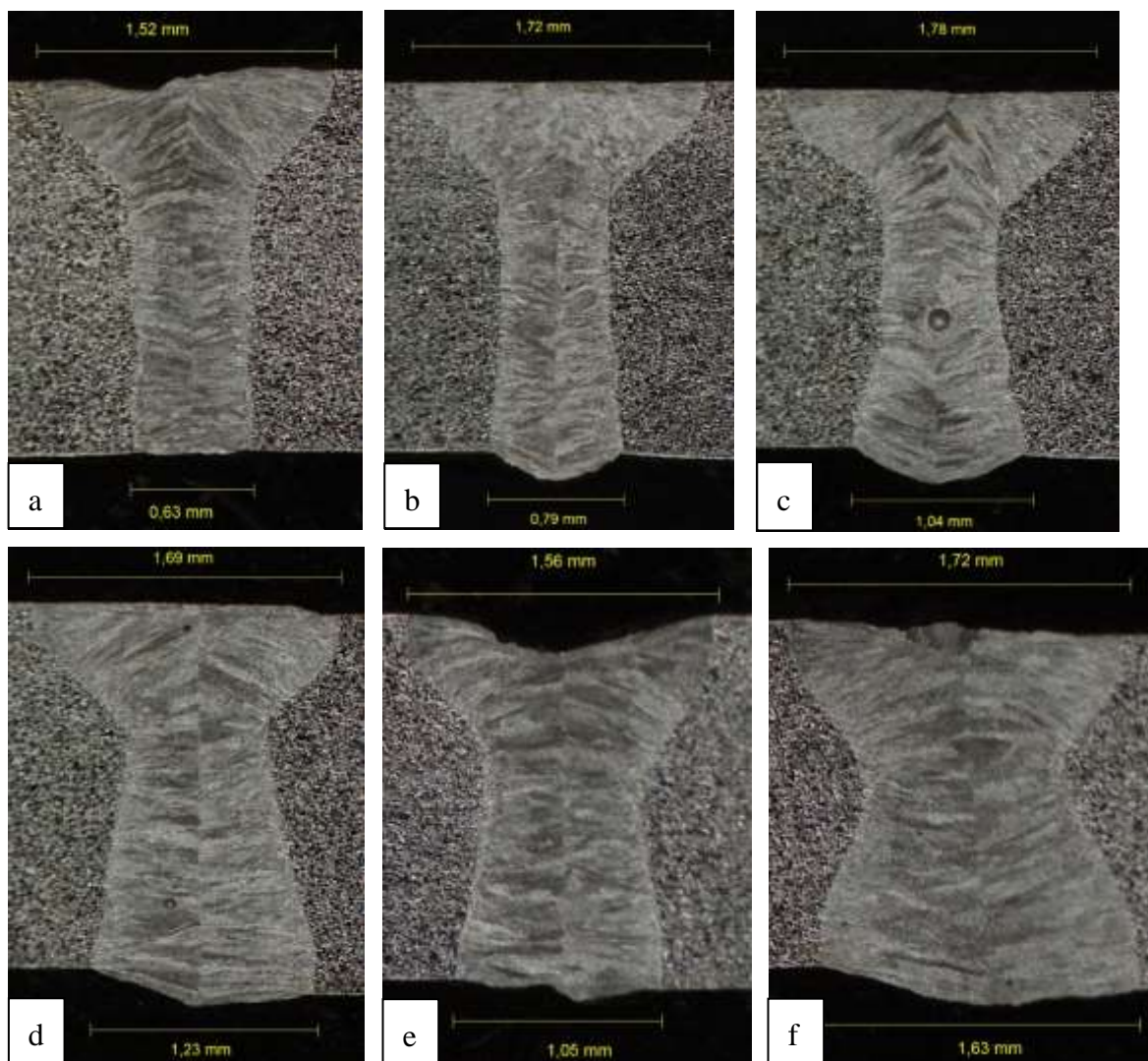
Svary vykazují různou geometrii, dle oscilace či tloušťky svařovaného vzorku. Všechny však vykazují vysokou štíhlost a téměř stejný průměr svaru v celé výšce.

Laser

parametry svařování: $v = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

poloha ohniska = 0 mm

ochranný plyn = Argon; 30 l/min



Obr. 28 Makro snímky svarů vyhotovených laserem

Tab. 7 Parametry svařování jednotlivých svarů (laser)

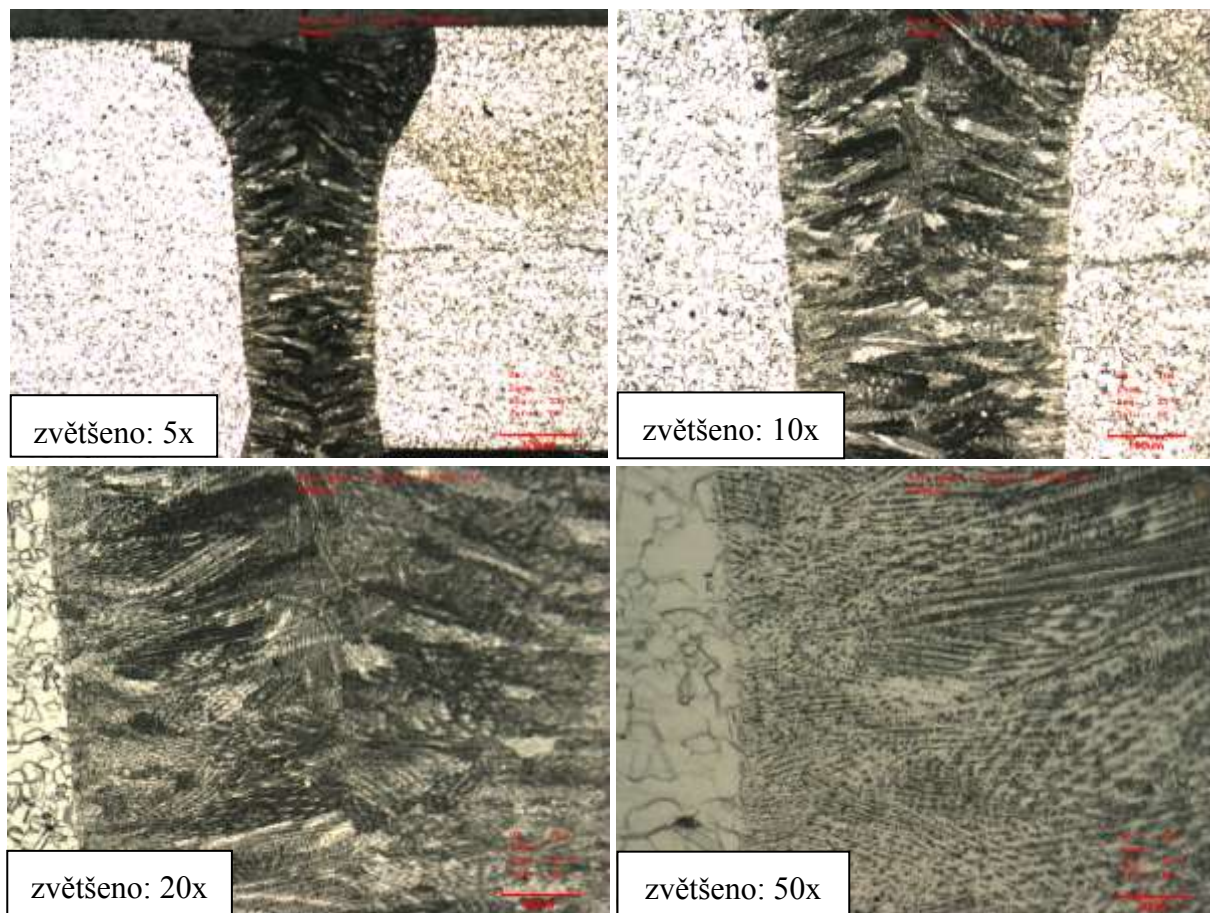
svar	a	b	c	d	e	f
výkon P [W]	1 000	1 000	1 100	1 100	1 200	1 300
tloušťka mat. [mm]	2,0	1,8	2,0	1,8	2,0	2,0

Svary vykazují typickou geometrii typu hřebík. S rostoucím výkonem se však geometrie mění a i tloušťka spodní části svaru se výrazně rozšiřuje a to až na tloušťku vrchní části svaru.

4.2 Mikro snímky

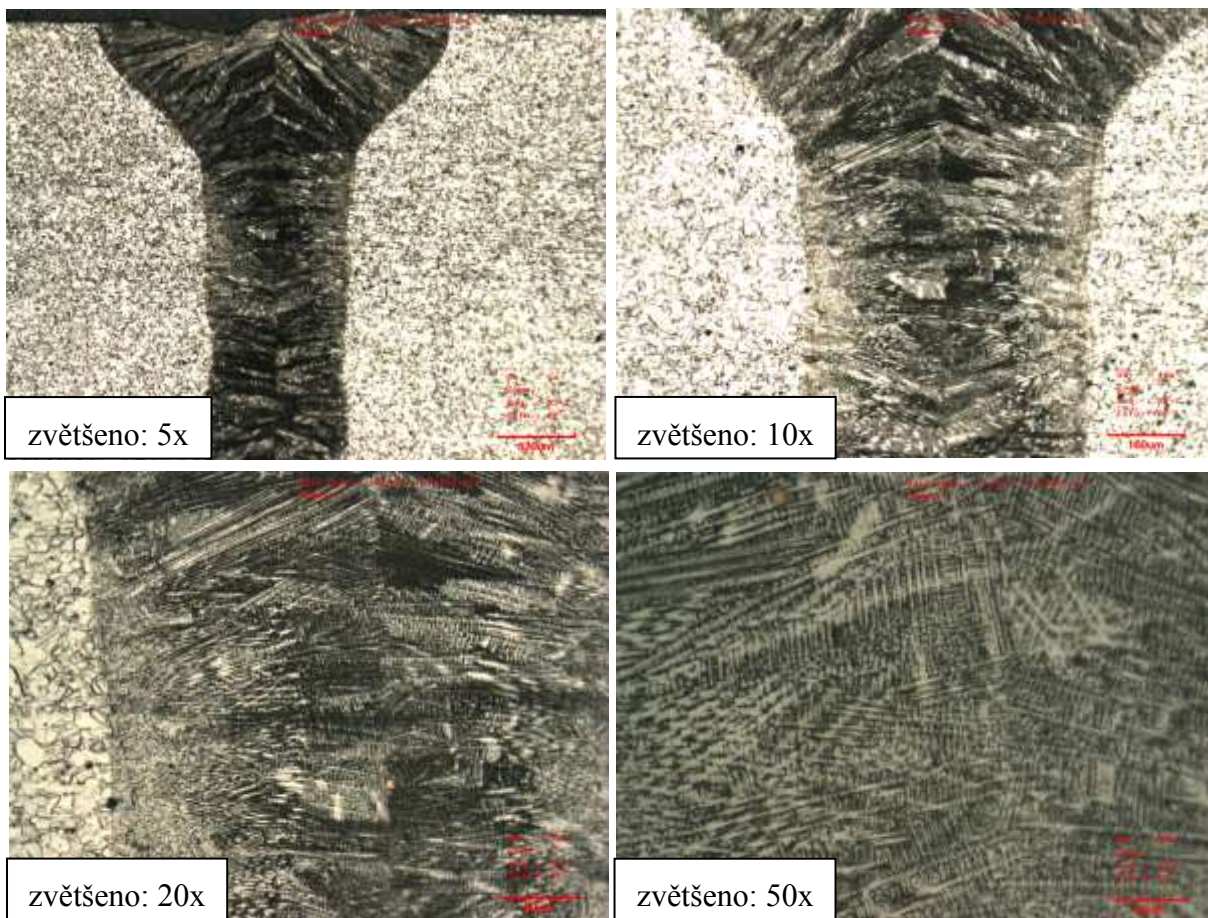
EBW(elektronový paprsek)

Mikrostruktura svarů je u obou metod téměř identická, obsahuje austenitickou matici s určitými mezikrystalickými a vnitrokrystalickými precipitáty, které se projevují jako stejně dlouhé a ve stejném směru orientované dendrity. Zmiňované dendrity jsou nejlépe vidět při zvětšení 20x a 50x viz snímky níže.



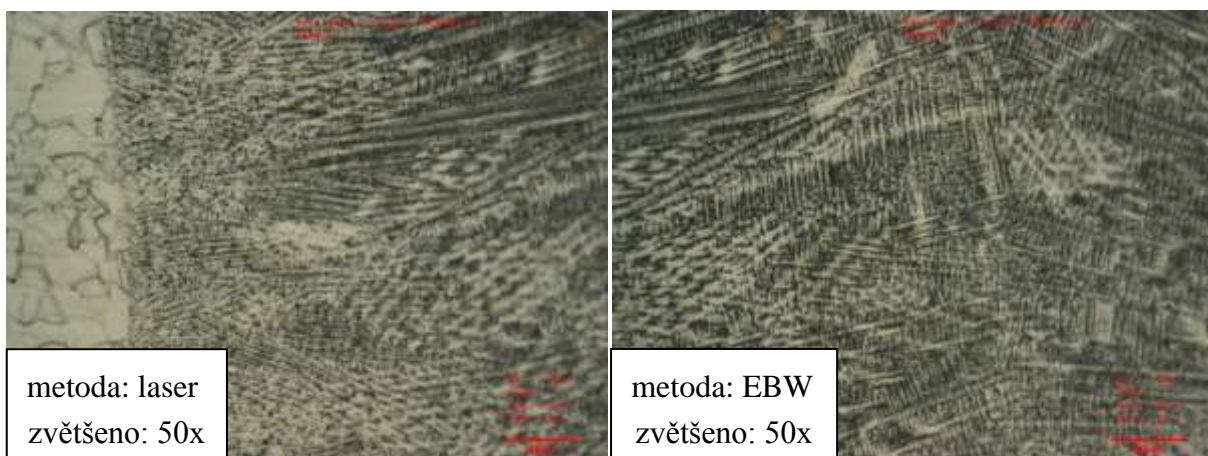
Obr. 29 Mikro snímky svarů vyhotovených EBW

Laser



Obr. 30 Mikro snímky svarů vyhotovených laserem

Porovnání mikro struktury, vzniklé při svaření vzorku oběma metodami:



Obr. 31 Makro snímky obou prověřovaných metod

5 ZÁVĚR

Na základě provedeného experimentu byly porovnány metody svařování svazkem elektronů (EBW) a svařování laserem. Bylo zjištěno, že svary provedené svazkem elektronů jsou užší a jejich geometrie se v celém průřezu svaru téměř nemění. Avšak svary provedené touto metodou vykazují poměrně často svarové vady, jako např. póry, neprovařený kořen nebo propadlou vrchní část svaru. Vedle toho svary provedené laserem vykazují typickou geometrii typu hřebík a jejich kvalita je ve všech případech vyhovující. Ze snímků je dále patrné, že s rostoucím výkonem se geometrie svaru mění, horní i spodní šířka svaru se výrazně zvětšuje a to natolik, že od výkonu 1 300 W je průměr průřezu spodní i vrchní části svaru téměř stejný.

Tepelně ovlivněná oblast je jak u metody svařování svazkem elektronů, tak i laserového svařování zanedbatelná. Zhrubnutí zrn na snímcích nebylo pozorováno.

Svary provedené oběma metodami jsou z hlediska geometrie i struktury srovnatelné. Z ekonomického a technologického hlediska se však jako značně výhodnější jeví použití laserového svařování.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ATI, Flat Rolled Products. *US certificate of test no. 044 0171*: „ATI 718,, NICKEL ALLOY SHEET. 9.4.2014. USA, OH.
2. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1. vydanie. Bratislava, Vydavateľstvo STU. Slovenská technická univerzita, 2000. 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
3. BEZDĚK, Pavel. *Povrchové kalení litiny výkonovým polovodičovým laserem*. Brno, 2015. 52s, 3 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D
4. Bezolejová lamelová vývěva. *Energoekonom* [online]. Česká Republika [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.energoekonom.cz/faq/vyvevy-314>
5. ČADA, Radek. *Postup údržby I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-802-4815-060.
6. CO2 Lasers: The Industrial Workhorse. *EDU.photonics* [online]. USA,Massachusetts [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25155>
7. ČÍP, Tomáš. *Svařování vysokopevnostních ocelí laserem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 107 s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
8. Debonair: Private Charter. *Debonair.co.uk* [online]. United Kingdom [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.debonair.co.uk/aircraft/hawker/900xp-h25x>
9. Dvoustupňová olejová rotační vývěva VALUE VE225N. *Česká Republika* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.havog.cz/obchod/vyvevy/dvoustupnova-olejova-rotacni-vyveva-value-ve225n/>
10. DULEY W.W.: *Laser welding*, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4
11. Electron Motion in Electric and Magnetic Fields. www.didaktik.physik.uni-muenchen.de [online]. Germany [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/elektronenbahnen/en/kanone/klassisch/Aufbau.php>
12. HALLIDAY, D., WALKER, J., RESNICK, R. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Vyd. 1. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: VUTIUM, 2000, vii, 890-[1064] s. ISBN 80-214-1868-0

13. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Megablog* [online]. Česká Republika, 2013 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
14. Honeywell: Aerospace. *Aerospace.honeywell.com: TFE731* [online]. 2015 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/en/products/engines/tfe731-turbofan-engineobr.2:>
15. INCONEL 718 Technical data. *High Temp Metals* [online]. 2015 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718data.php>
16. KANNATEY-ASIBU, E.: *Principles of Materials Processing*, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3
17. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Vienaľa, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
18. Měření tlaku: Přepočty jednotek. *Cressto.cz* [online]. 2010 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.cressto.cz/prepocety-jednotek>
19. MRŇA, Libor. *Svařování svazkem elektronů* [online]. In: 2013, s. 32 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_svazkem_elektronu_2013__mrna.pdf
20. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky*. Odbor technologie svařování a povrchových úprav: Speciální metody svařování [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zakl_ady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf
21. NOVÁK, Miroslav. Seriál na téma lasery: *Základní princip laseru a jejich dělení*. LAO: Lasery a optika [online]. 2011 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-1273>
22. SCHULTZ. *Elektronenstrahlschweißen*. 2., völlst. überarb. und erw. Aufl. Düsseldorf: Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren, DVS-Verl, 2000. ISBN 3871551929
23. SCHULTZ, Helmut. *Electron Beam Welding*. 1. vyd. Cambridge : Abington Publishing, 1/1994.240 s. ISBN 978-185573050
24. TAGAviation. *Tagaviation.com: Our Charter Fleet* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.tagaviation.com/en/charter-services/our-charter-fleet/aircraft-types/falcon-900-dx/>
25. Turbomolecular Pumps. *National Instruments: Case Study* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-14907#prettyPhoto/gallery/0/>

26. TURŇA, Milan; KOVAČÓCY, Pavel. *Zváranie laserovým lúčom*. 1. vydanie. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2003. 90 s. ISBN 80-227-1921-8.
27. TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvárania*. 1.vyd. Bratislava: Alfa, 1989. 383 s. ISBN 80-05-00097-9.
28. Vision. Vesindia.org: *Laser welding* [online]. Gujarat, INDIA [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.vesindia.org/blog/laser-welding/laser-welding-methods.aspx>
29. VISSER, A. *Werkstoffabtrag durch Elektronen-und Photonenstrahlen*. Bern: Technische Runhschau, 1972. Český překlad L. Zobač, ÚPT AV ČR
30. WordlessTech. *Wordlesstech.com: Electrons are almost perfectly round* [online]. 2011 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://wordlesstech.com/electrons-are-almost-perfectly-round/>
31. ZOBAČ, Martin. *Řízení a diagnostika elektronového svazku pro pokročilé technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s. 158. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
\vec{B}	Magnetická indukce	[T]
\vec{E}	Intenzita elektrického pole	[A · m ⁻¹]
E_k	Kinetická energie	[eV]
\vec{F}_L	Lorentzova síla	[F]
m_e	Hmotnost elektronu	[kg]
q_e	Náboj částice	[C]
U	Urychlovací napětí	[V]
v	Rychlost elektronu	[m · s ⁻¹]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Proudový motor typ TFE731 [14]	9
Obr. 2 Hawker 900XP (Business jet) [8]	9
Obr. 3 Typický příklad: Falcon 900 (Business jet) [24]	9
Obr. 4 Atom a jeho části [30].....	11
Obr. 5 Keyhole [28]	13
Obr. 6 Ztráty během svařování [23].....	13
Obr. 7 Půdorys s označením oblastí svařování metodou keyhole [23]	13
Obr. 8 Jednotlivé fáze vzniku keyhole [23]	14
Obr. 9 Schéma elektronové svářečky [19]	15
Obr. 10 Elektronové dělo [11]	16
Obr. 11 Katoda s Wehneltovým válcem	16
Obr. 12 Vychylovací cívký	17
Obr. 13 Rotační olejová vývěva [9]	17
Obr. 14 Turbomolekulární vývěva [24]	17
Obr. 15 Princip rotační olejové vývěvy [4].....	17
Obr. 16 Schéma principu laseru [6]	18
Obr. 17 Možné režimy svařování laserem [28].....	19
Obr. 18 Laserový paprsek [7]	20
Obr. 19 součásti CO ₂ laseru [20].....	22
Obr. 20 CO ₂ laser s podélným prouděním [6].....	22
Obr. 21 CO ₂ laser s příčným prouděním [6]	23
Obr. 22 Deskový difuzně chlazený SLAB CO ₂ laser [20]	23
Obr. 23 Nd: YAG laser buzený výbojkou [13]	24
Obr. 24 Nd: YAG se zadním buzením [13]	25
Obr. 25 Nd: YAG s bočním buzením [13].....	25
Obr. 26 Vláknový laser [13].....	26
Obr. 27 Makro snímky svarů vyhotovených metodou EBW	30
Obr. 28 Makro snímky svarů vyhotovených laserem	31
Obr. 29 Mikro snímky svarů vyhotovených EBW.....	32
Obr. 30 Mikro snímky svarů vyhotovených laserem	33
Obr. 31 Makro snímky obou prověřovaných metod	33

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti elektronu [28], [30].....	11
Tab. 2 Rozdělení laserů podle délky generovaného pulzu [20].....	20
Tab. 3 Chemické složení super slitiny Inconel 718 [1], [15].....	28
Tab. 4 Základní vlastnosti Inconelu 718 [15]	28
Tab. 5 Chemické složení svařované super slitiny Inconel 718 [1]	29
Tab. 6 Parametry svařování jednotlivých svarů (EBW)	30
Tab. 7 Parametry svařování jednotlivých svarů (laser).....	31

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Experimentální část
Příloha 2	Měření vakua, převody jednotek [18]
Příloha 3	Materiálový list INCONEL 718 [1]

Příloha 1

Experimentální část: snímky svarů

- k experimentu byly použity vzorky superslitiny Inconel 718 získané od společnosti Honeywell Aerospace Omlomouc

- tloušťka svařovaného materiálu je rozdílná a to 1,8 a 2,0 mm viz snímky

Makro snímky

EBW(elektronový paprsek):

Svary vykazují různou geometrii, dle oscilace či tloušťky svařovaného vzorku. Avšak můžeme říci, že svary vykazují vysokou štíhlost a téměř stejný průměr svaru po celém průřezu.

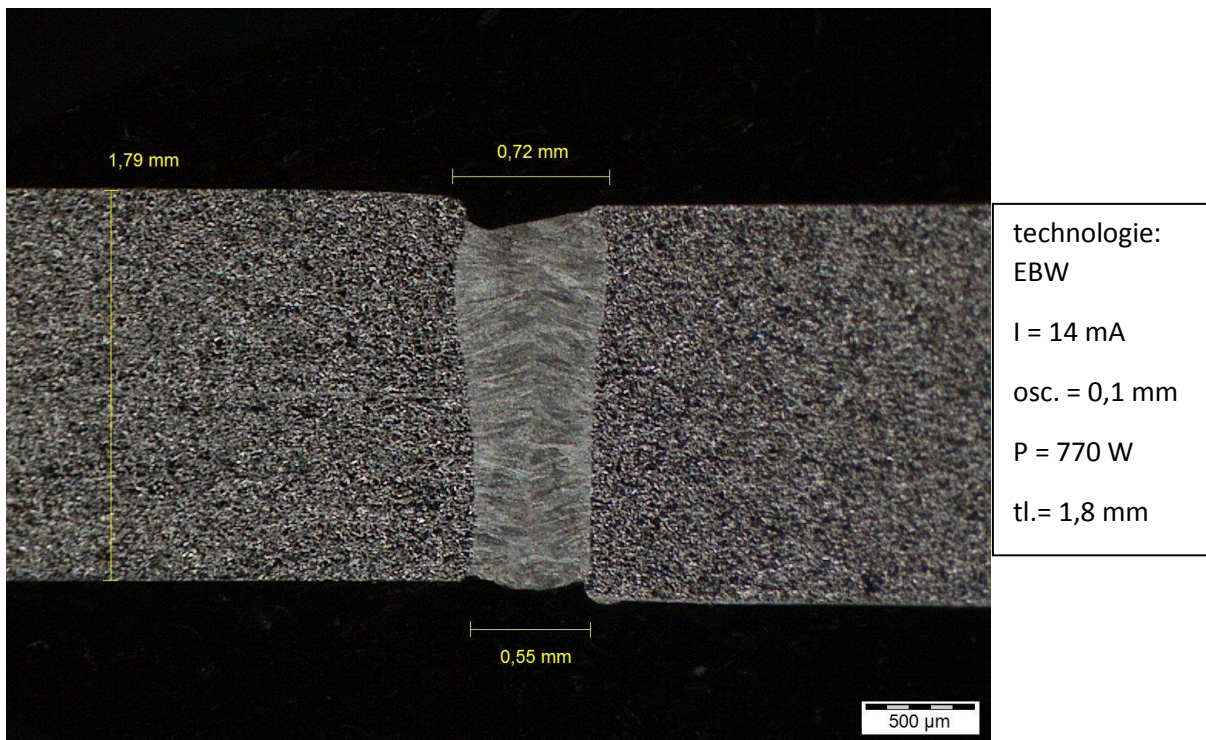
parametry svařování:

$U = 55 \text{ kV}$

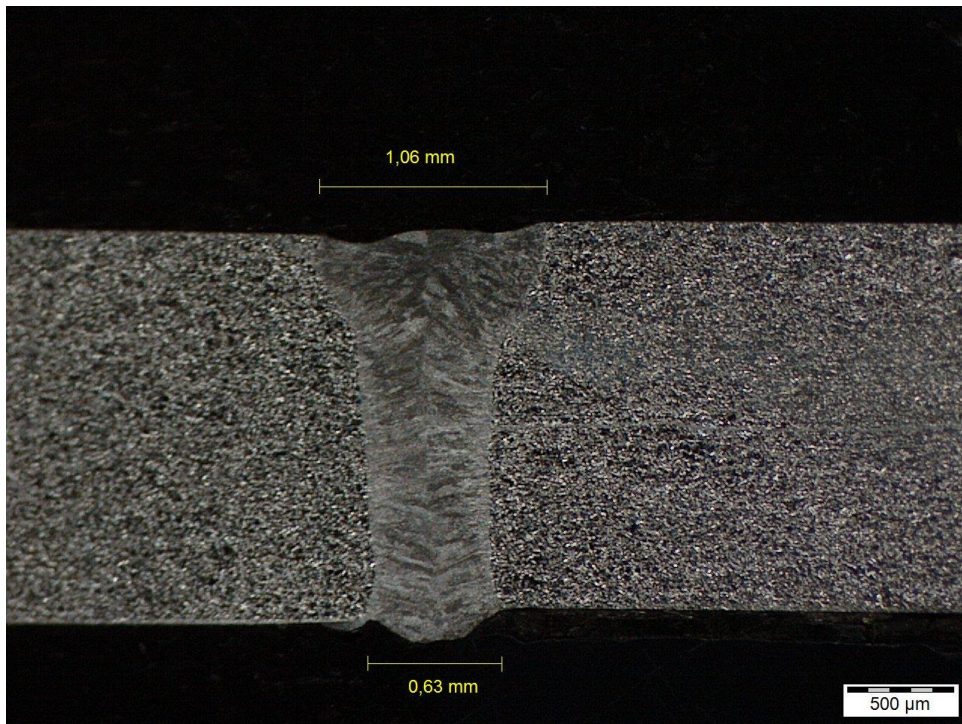
$v = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

$\text{vakuum} = 2\cdot 10^{-2} \text{ Pa}$

poloha ohniska = 1 až 2 mm nad povrchem



Svar je po celé tl. materiálu provařený, včetně kořene svaru. Ve svaru se nenachází žádné póry či jiné vady. Svar je mírně propadlý.



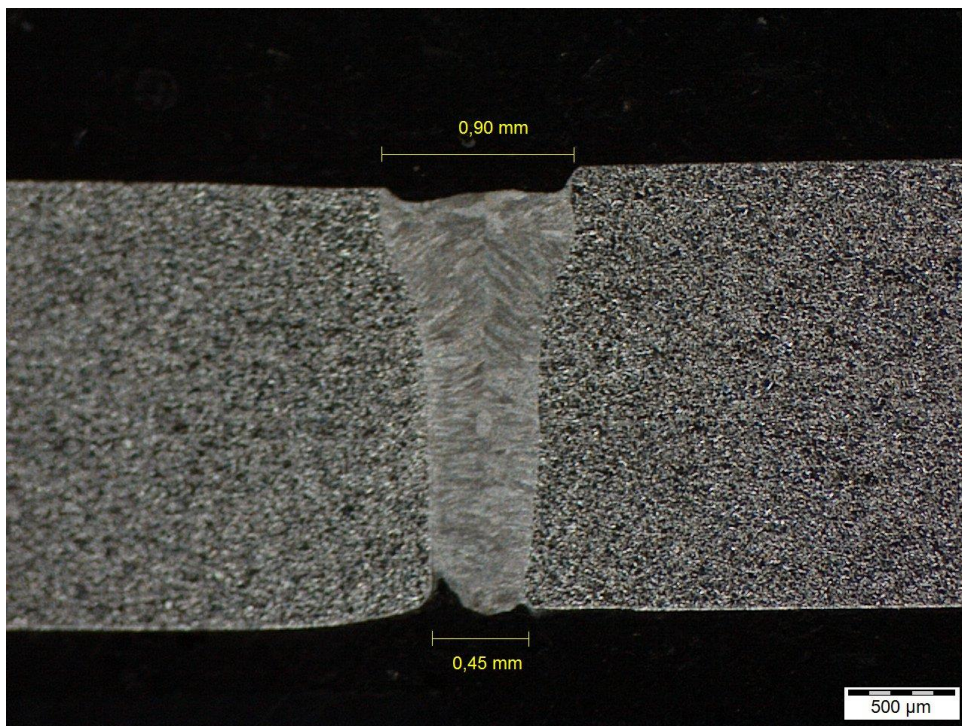
technologie:
EBW

I = 14 mA

osc. = 0,15 mm

P = 1045 W

tl. = 2,0 mm



technologie:
EBW

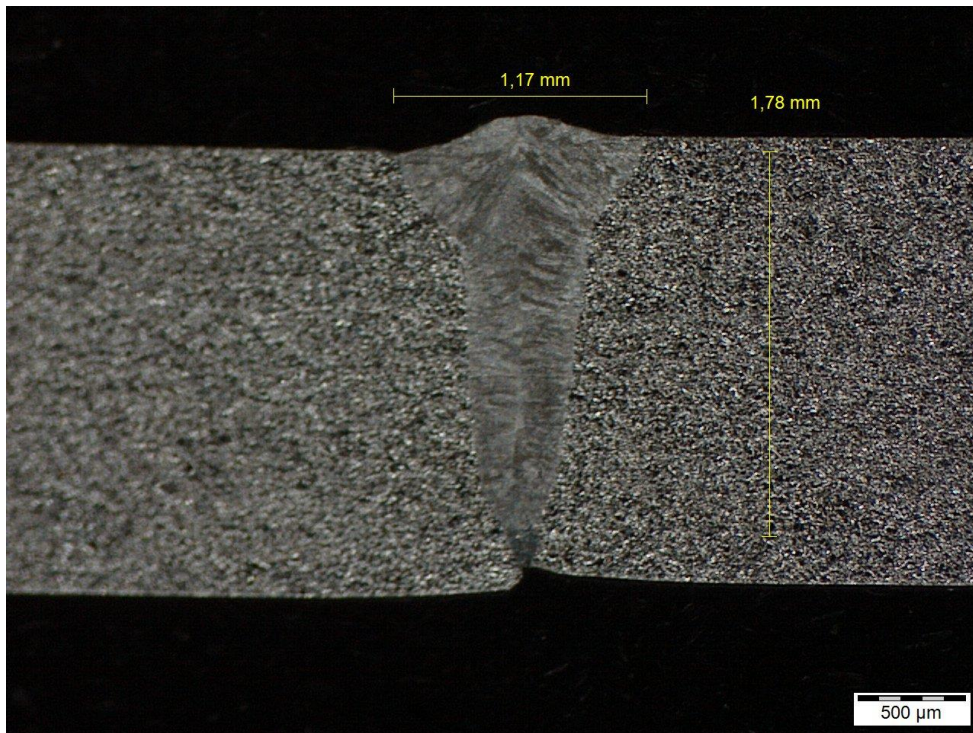
I = 12 mA

osc. = 0,1 mm

P = 660 W

tl. = 1,8 mm

Svar je mírně propadlý, dále je po levé straně patrný ne úplně provařený kořen.



technologie:

EBW

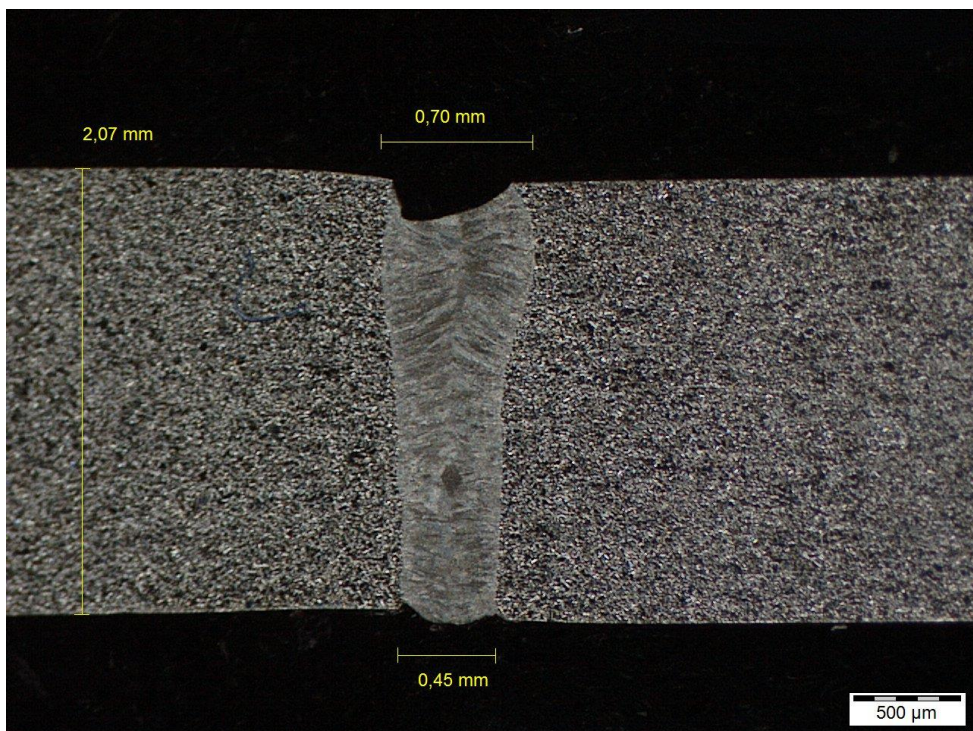
I = 10 mA

osc. = 0,1 mm

P = 550 W

tl. = 2,0 mm

Neprovařený kořen v celém průřezu svaru. Svar přibližně pouze do tl. 1,78 mm.



technologie:

EBW

I = 16 mA

osc. = 0,15 mm

P = 880 W

tl. = 2,0 mm

Svar je výrazně propadlý, ve spodní části se nachází relativně velká póra.

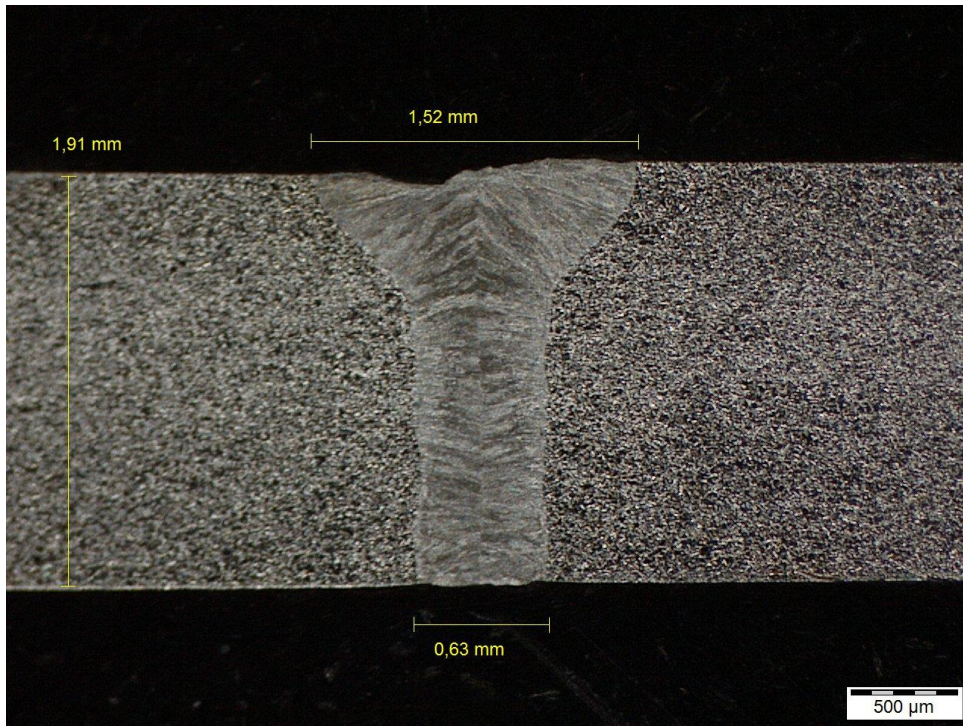
Laser:

Svary vykazují typickou geometrii typu hřebík. S rostoucím výkonem se však geometrie mění a i tloušťka spodní části svaru se výrazně rozšiřuje a to až na tloušťku vrchní části svaru.

parametry svařování: $v = 30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

poloha ohniska = 0 mm

ochranný plyn = Argon; 30 l/min

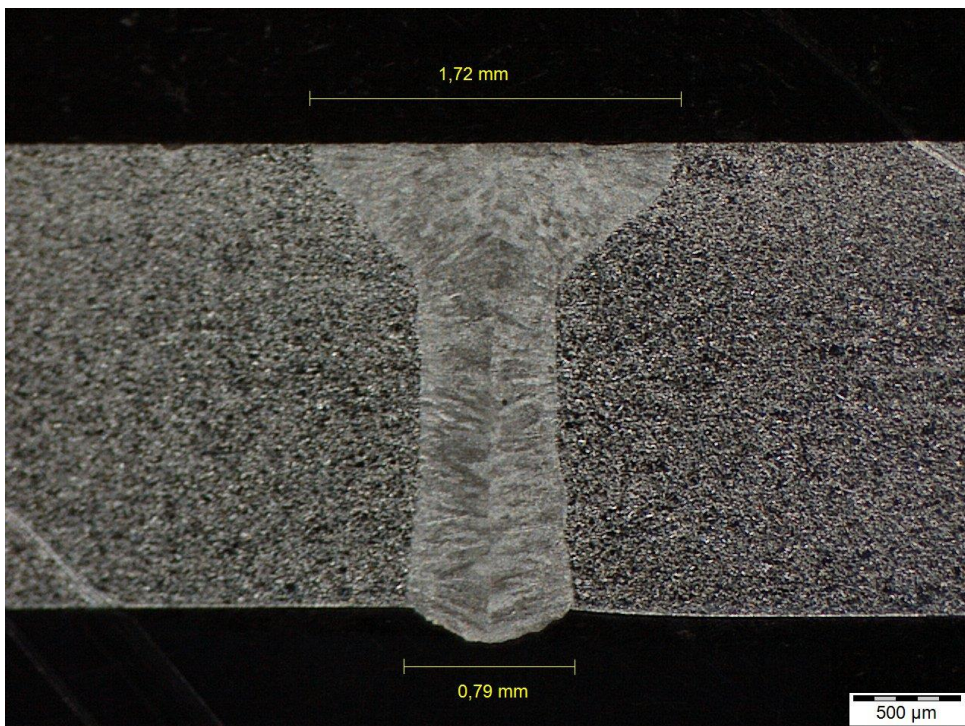


technologie:
laser

P = 1 000 W

tl. = 2,0 mm

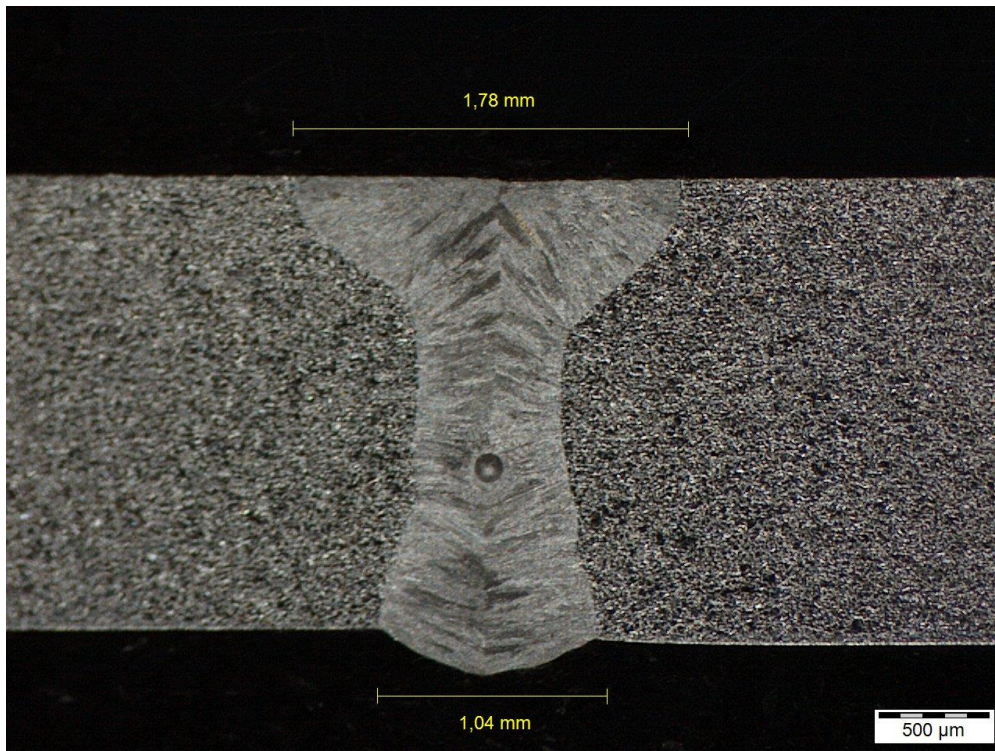
Oba svary jsou provedeny kvalitně. Svary jsou provařeny v celé tloušťce. Bez propadu materiálu a přítomných pór.



technologie:
laser

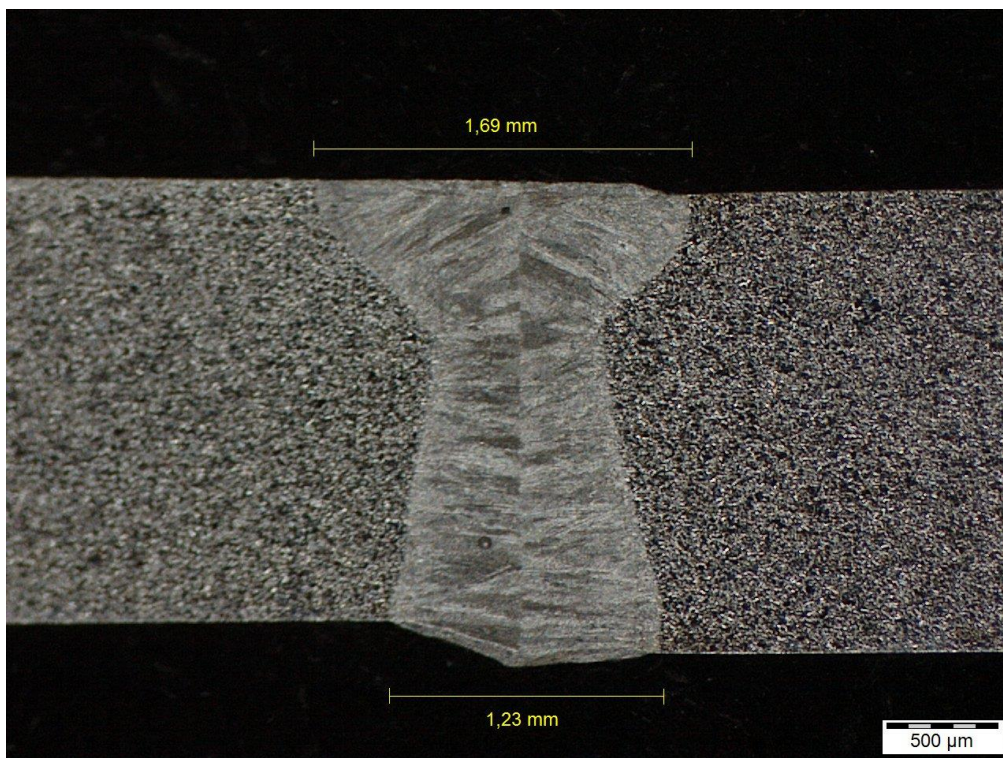
P = 1 000 W

tl. = 1,8 mm



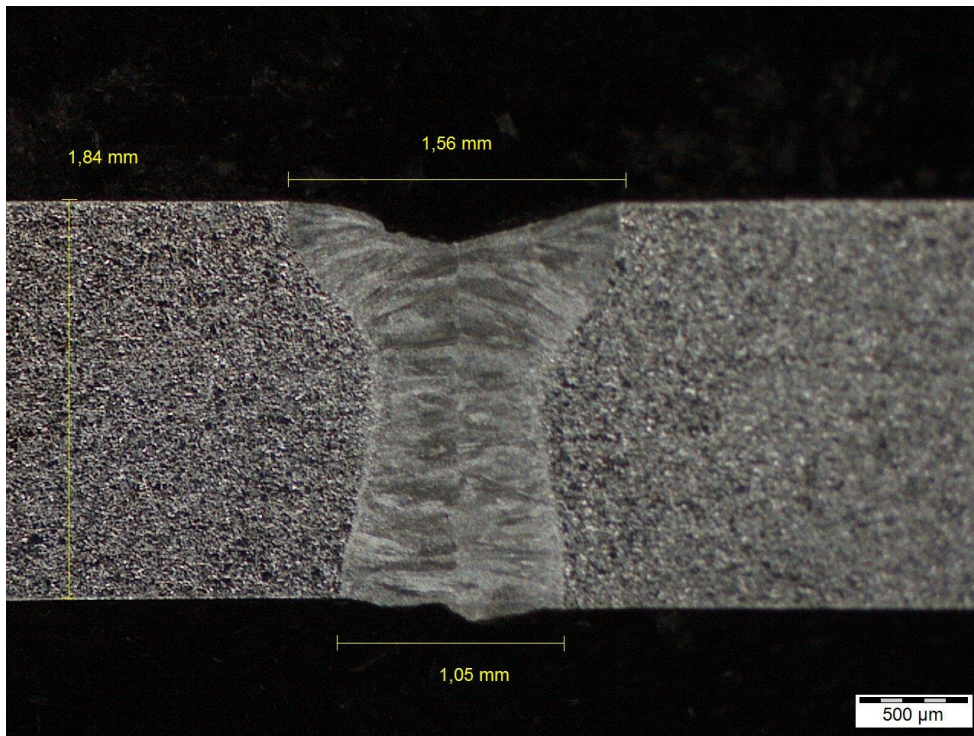
technologie:
laser
P = 1 100 W
tl. = 2,0 mm

Ve spodní části se nachází poměrně veliká póra.



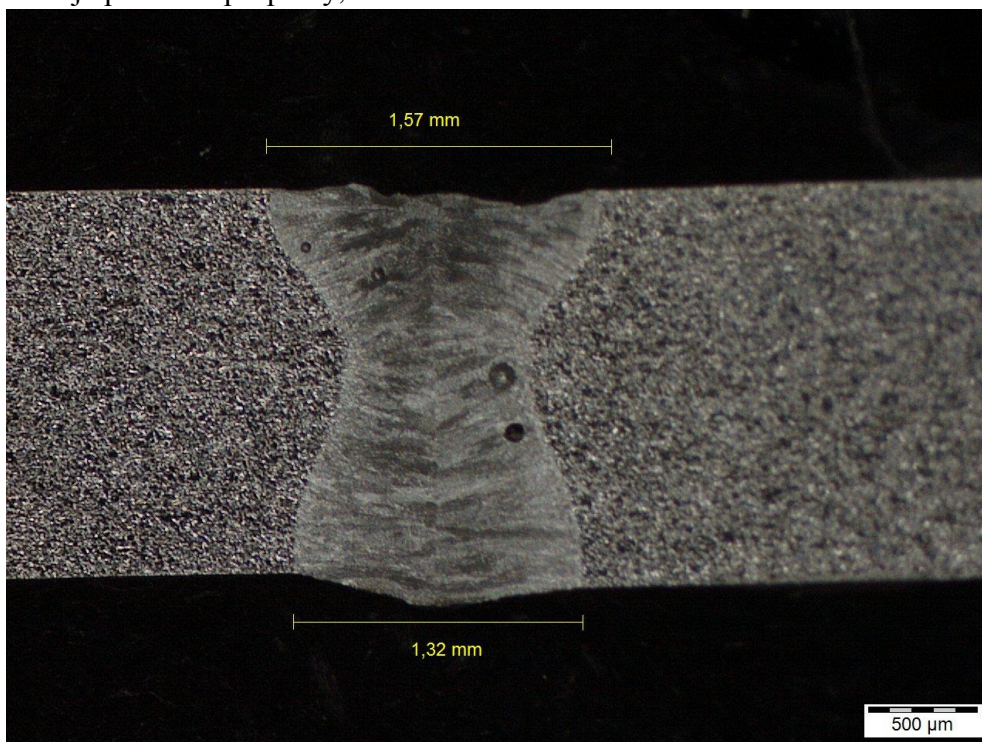
technologie:
laser
P = 1 100 W
tl. = 1,8 mm

Ve svaru se nachází tři poměrně malé kruhové póry, ovšem na mechanické vlastnosti by neměli mít kvůli své geometrii a velikosti téměř žádný vliv.



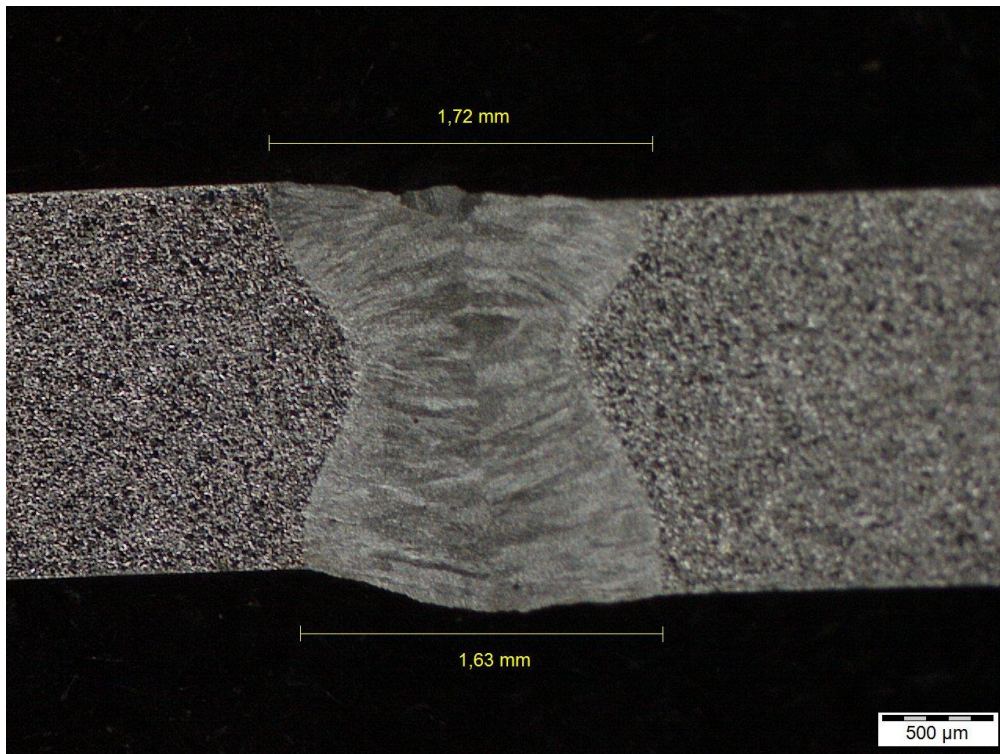
technologie:
laser
P = 1 200 W
tl. = 2,0 mm

Svar je poměrně propadlý, z ostatních hledisek kvalitní.



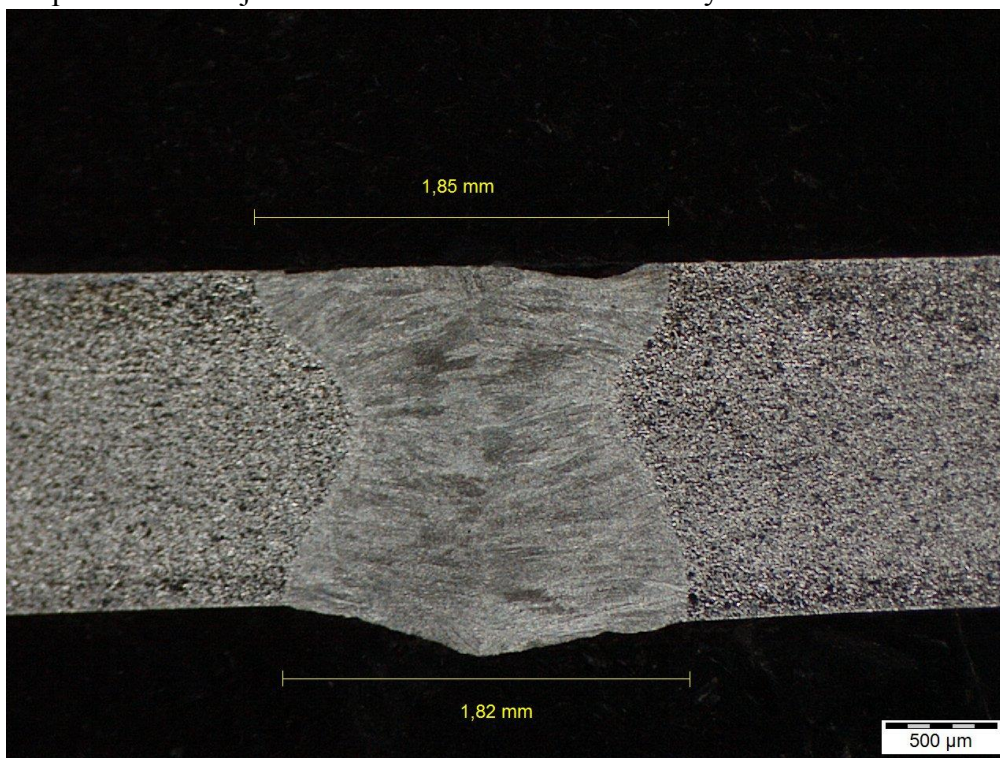
technologie:
laser
P = 1 200 W
tl. = 1,8 mm

Na pravé straně uprostřed svaru se nachází poměrně veliké póry, které by mohli mít znatelný vliv na mechanické vlastnosti spoje.



technologie:
laser
P = 1 300 W
tl. = 2,0 mm

Na povrchu svaru je vidět malé množství ztuhlé strusky.



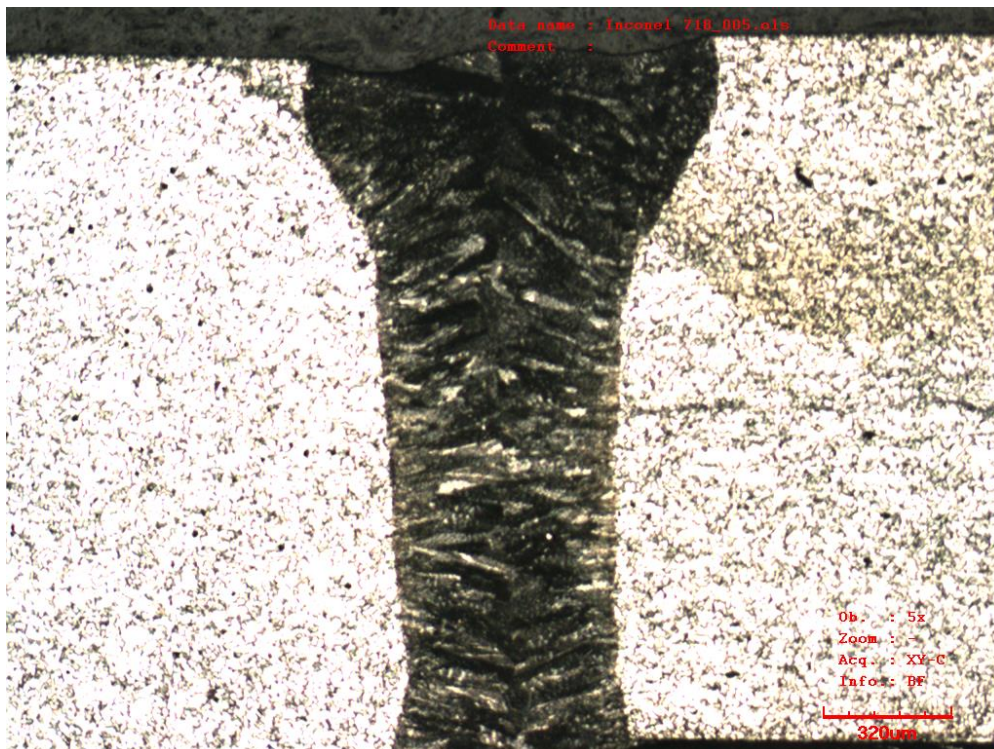
technologie:
laser
P = 1 300 W
tl. = 1,8 mm

Svar je provedený kvalitně. Je provařený v celé tloušťce. Bez propadu materiálu a přítomných pór.

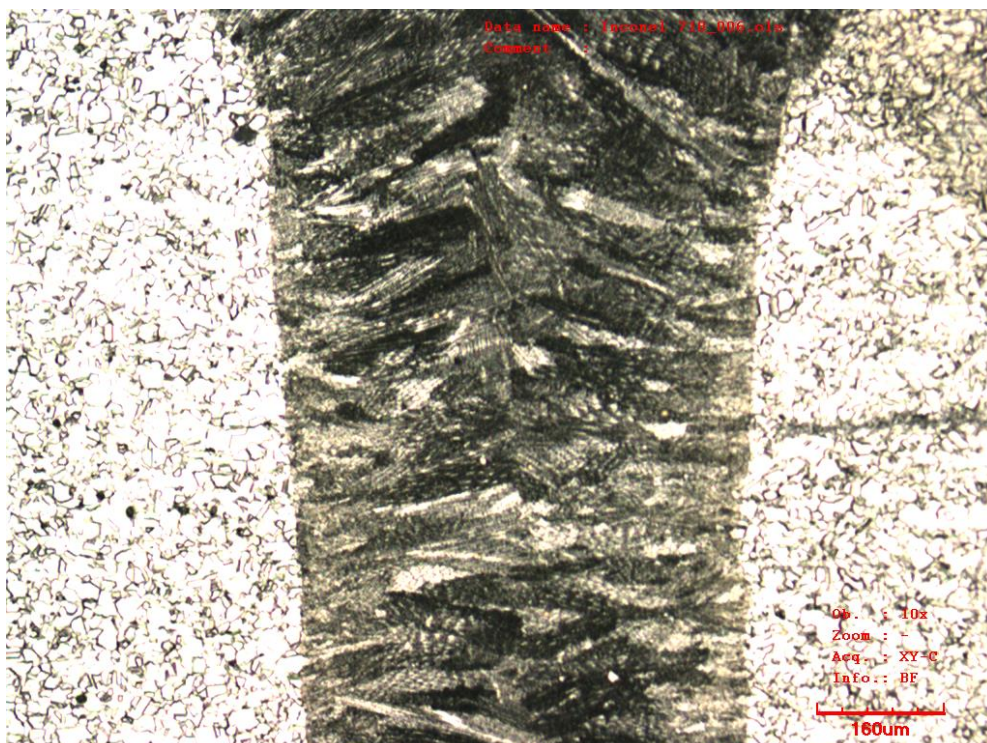
Mikro snímky

Mikrostruktura svaru obsahuje austenitickou matici s určitými mezikrystalickými a vnitrokrystalickými precipitáty, které se projevují jako stejně dlouhé a ve stejném směru orientované dendrity. Zmiňované dendrity jsou nejlépe vidět při zvětšení 20x a 50x viz snímky níže.

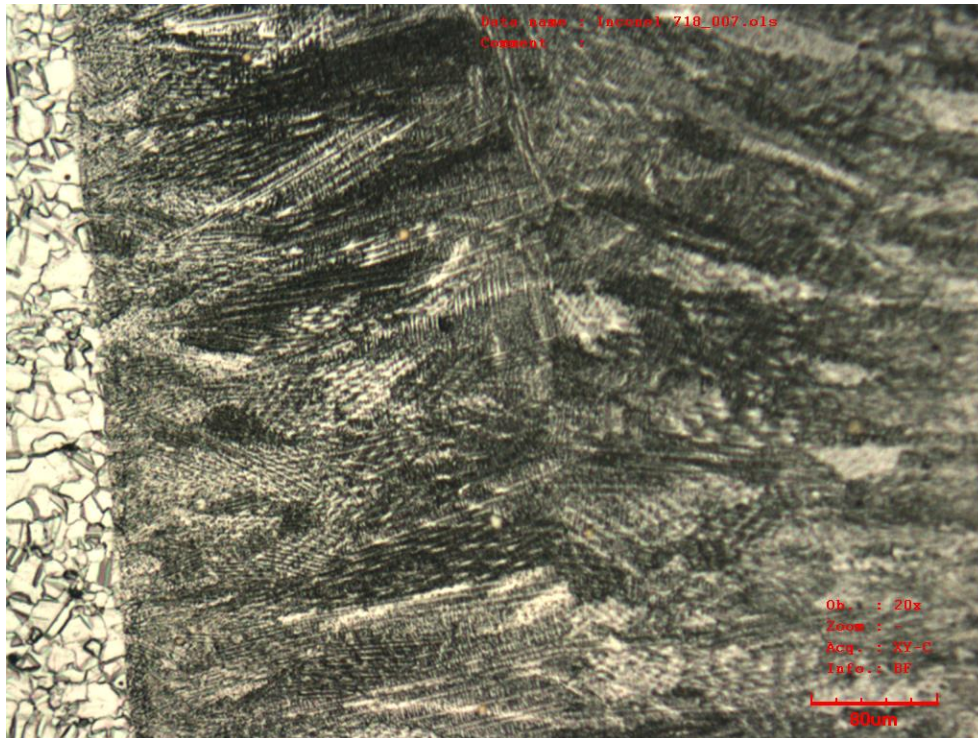
EBW(elektronový paprsek):



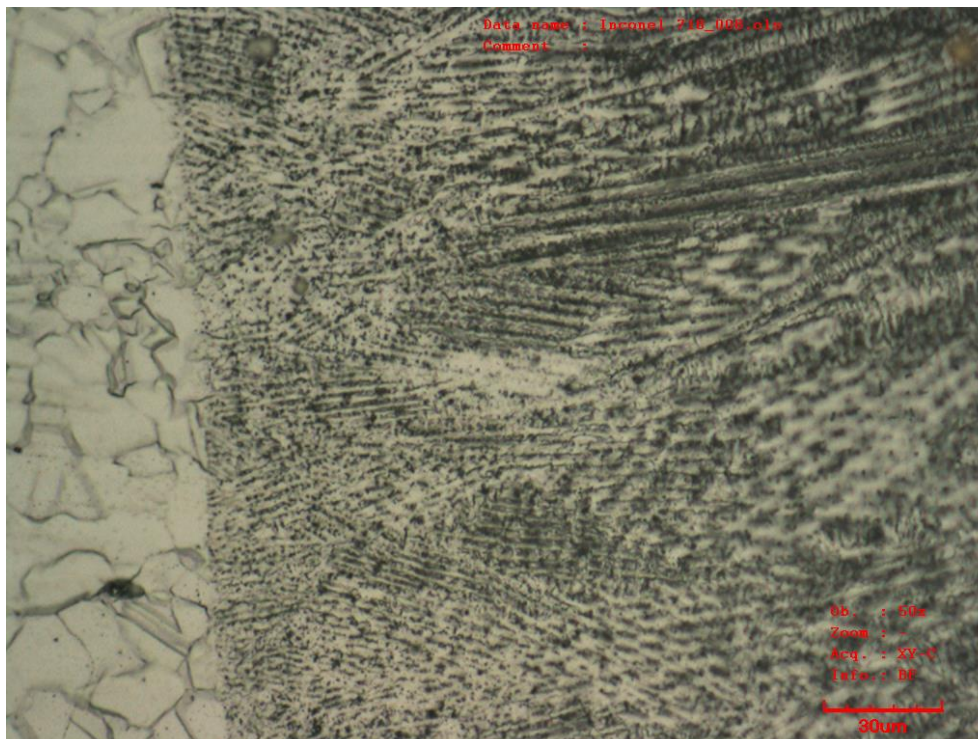
technologie:
EBW
zvětšeno: 5x



technologie:
EBW
zvětšeno: 10x

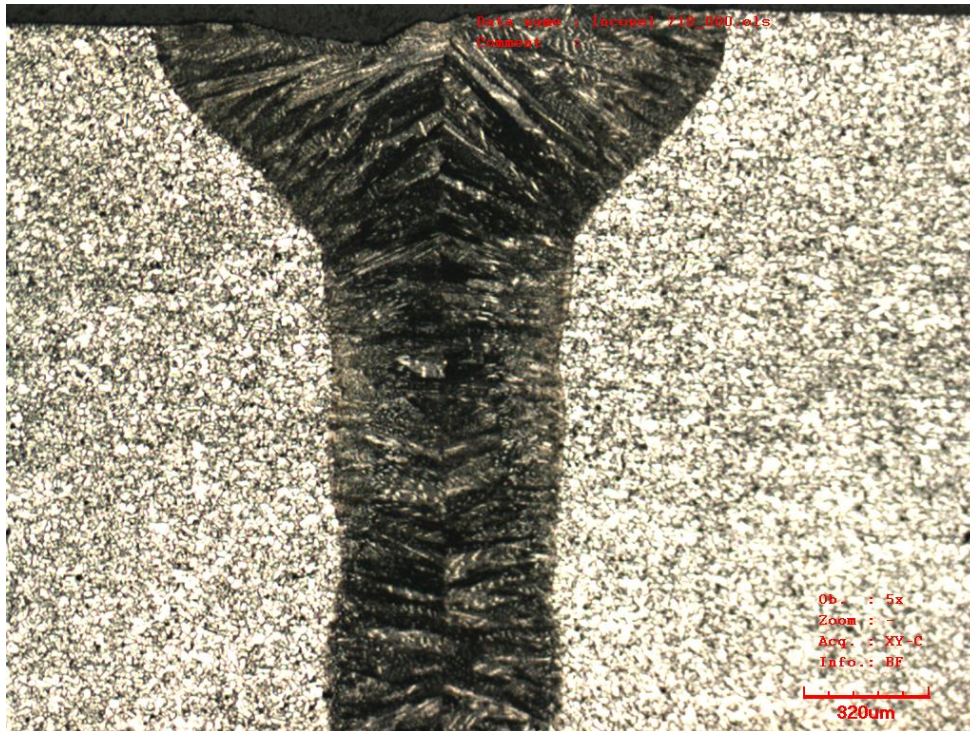


technologie:
EBW
zvětšeno: 20x

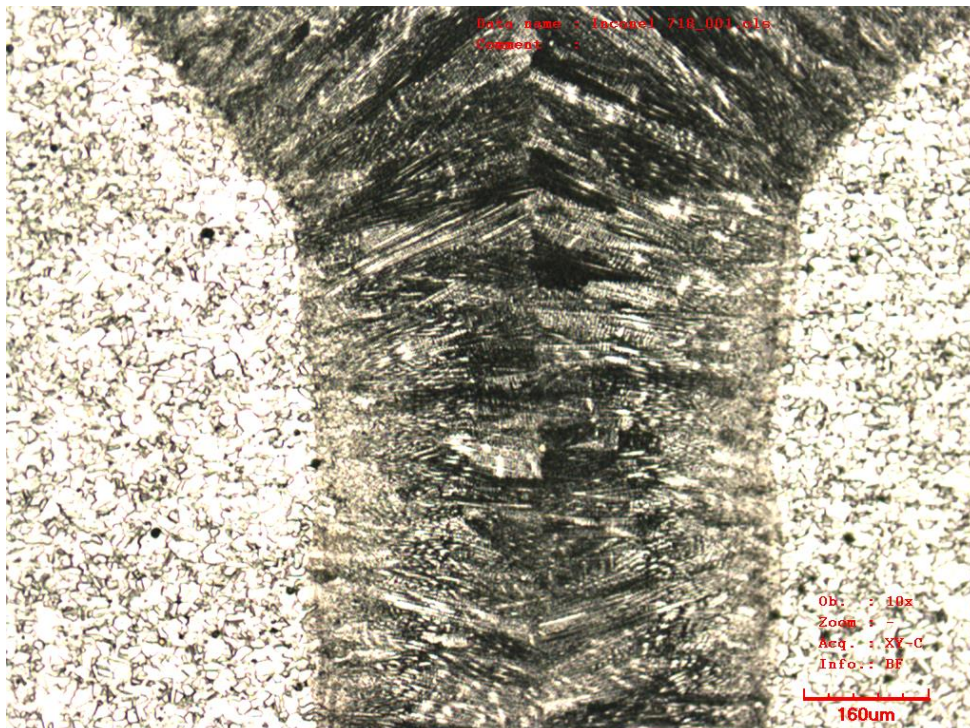


technologie:
EBW
zvětšeno: 50x

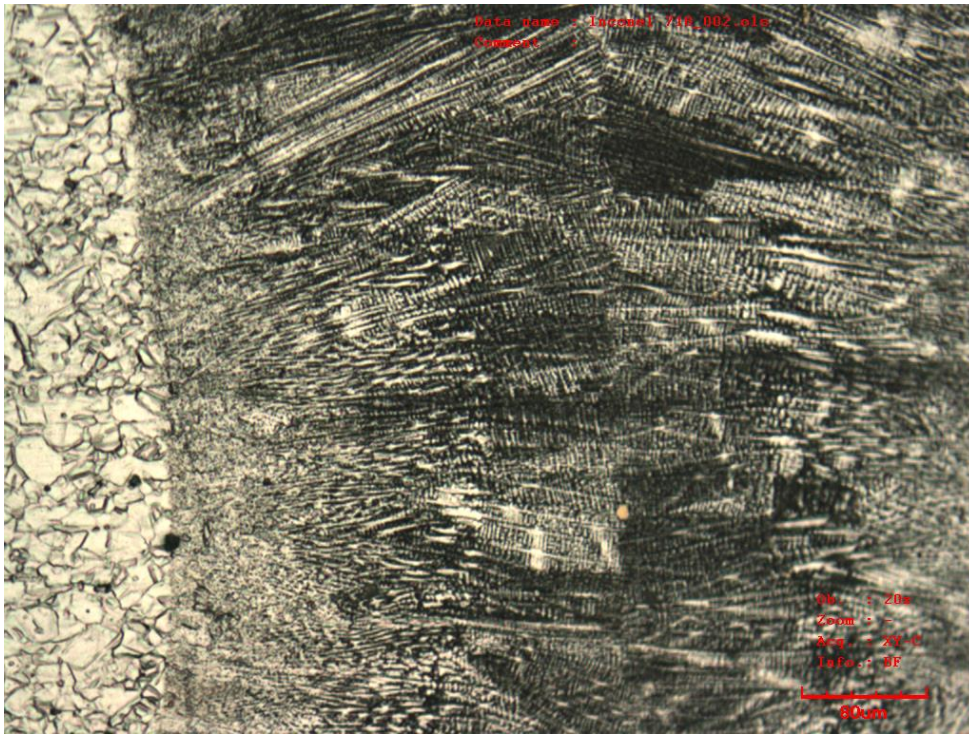
Laser:



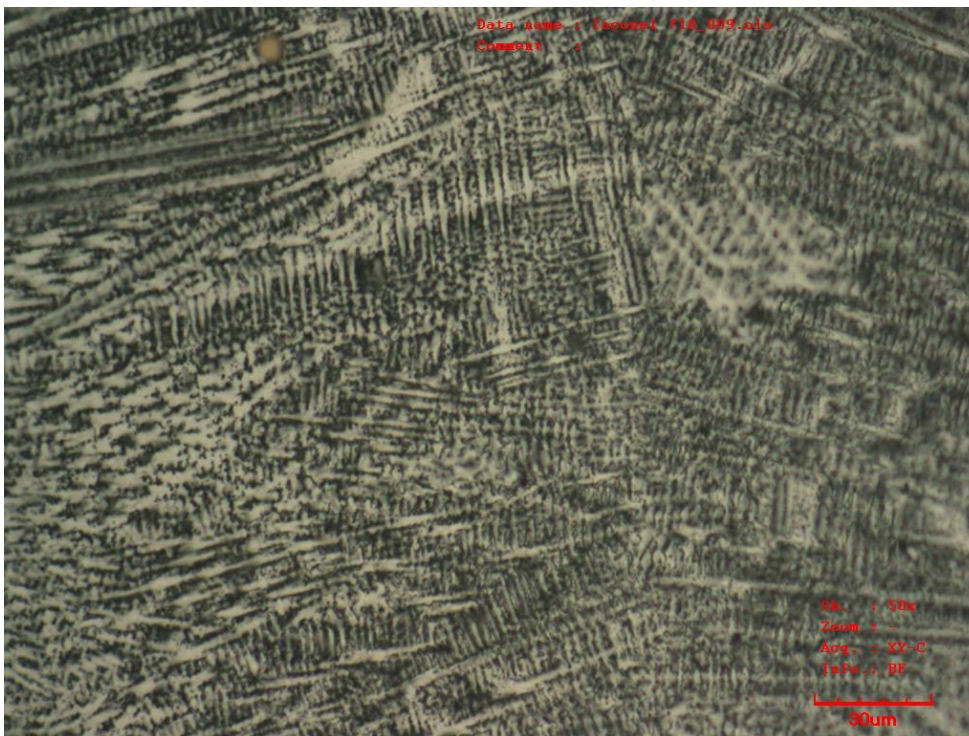
technologie:
laser
zvětšeno: 5x



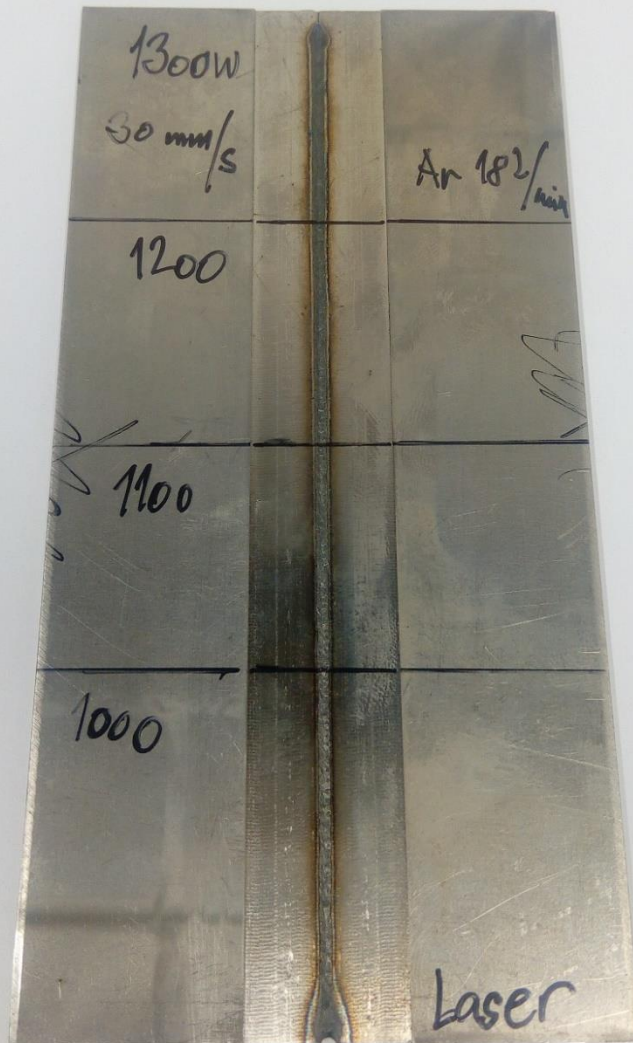
technologie:
laser
zvětšeno: 10x



technologie:
laser
zvětšeno: 20x



technologie:
laser
zvětšeno: 50x



1300W

50 mm/s

Ar 18 l/min

1200

1100

1000

Laser

Příloha 2

Měření vakua, převody jednotek:

Převody jednotek tlaku:

Pascal – je základní jednotka tlaku v soustavě SI

$$[\text{Pa}] = \text{N} / \text{m}^2$$

Bar – je vedlejší jednotkou tlaku v soustavě SI. Bar je užíván pro svou názornost zejména v průmyslu, neboť přibližně odpovídá starší jednotce tlaku jedné atmosféry

$$1 [\text{bar}] = 1 \cdot 10^5 [\text{Pa}]$$

Technická atmosféra – hydrostatický tlak 10 m vodního sloupce

$$1 [\text{at}] = 1 [\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}] = 98\,066,5 [\text{Pa}]$$

Atmosféra – odpovídá normálnímu barometrickému tlaku při hladině moře

$$1 [\text{atm}] = 101\,325 [\text{Pa}]$$

Torr – hydrostatický tlak, který vyvine 1 mm sloupce rtuti (Anglosaská jednotka)

$$1 [\text{Torr}] = 133,322 [\text{Pa}]$$

$$1 [\text{atm}] = 760 [\text{Torr}]$$

**NOTICE OF SHIPMENT/
PACKING LIST**



RA TRACER # 0440171 US

CERTIFICATE OF TEST

AL 6168-8.0

CUST. ORD. NO. & DATE: 0116615-CIN | 09/04/14 | CUST. CODE: 773550 | ACCEPTING MILL: 457485 | SHIPPER NO.: 13010103060000 | PRODUCT CODE: 32-094-036 | MILL ORDER NUMBER: 12/11/14 | DATE SHIPPED: 031864



Certification of Conformance: We certify that the above material meets all requirements of the purchase order and material specifications.
4885 Thunderbird Lane Fairfield, OH 45814

Customer: NICKEL CESKA REPUBLIKA
P.O. # M 70101312
.0950/.1050" SHEET 718
Tracer No. [0440171US]
Sales Order # 3241135-CIN-1
1 PC 36.0 x 96.0 in 103 LB
Heat No. [07L4K12-02]
Date: 3/23/2015

GRADE AND SPECIFICATIONS
"ATI 718" NICKEL ALLOY SHEET C R CUT LENGTHS ANNEALED 2D FIN 3 EDGE (ASQR-01 REV 8) (B50TF14-S22 CLASSES E) (AMS 5596K) (PWA 300 REV BL) (12/11/13 EXCEPTIONS TO B50TF14) (ASTM-B-670-07 R2013) (AMCI-1 REV A) (UN: N07718) (NACE MR0175/ISO 15156-3:10/2009) (NACE MR0103:2012) (S-1000 DATED 12/04/2013) (E50TF133-S9 CLASS (S-400 DTD 02/07/2014) (WNR 2.4668) (RR9000:SABRE) (DIN EN 10204:2005 3.1 CERTIFICATE)

CARRIER - GREAT AMERICAN LINES, INC.

ITEM	PCS	DIMENSIONS	W/G/L	HEAT #	COIL #	TEST #	GROSS	TARE	NET	THEO	TAG #/	CD SKI
001B	11	36./.	100/96.062	07L4K12-02	10174N495D	3738888	1240	110	1130		400570	
	11	36./.	100/96.062	07L4K12-02	10174N495E	3738888	1240	110	1130		400571	
	6	36./.	100/96.062	07L4K12-02	10174N495F	3738888	720	110	610		400572	
P CUST IDENTITY 0013216												
3 SKIDS												
							3200	33		22870		

GAUGE TOL: + 0.00500 - 0.00500

DIST: DO NOT SEND PAPER CPY OF ACK - WILL BE SENT ELECTRONICALLY DO NOT SEND S/N - CUSTOMER RECEIVES THROUGH EXTRANET

TYPE HEAT/TEST (WT %)	--C--	--MN--	--P--	--S--	--SI--	--CR--	--NI--	--AL--	--MO--	--CU--	--CB--	--TA
HEAT 07L4K12-02	.05	.06	.008	.0002	.10	18.22	52.23	.58	2.88	.01	5.06	.01
TEST LOCATION	TC	BN	BN	TC	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN
HEAT 07L4K12-02	1.00	.03	.002	19.79								
TEST LOCATION	BN	BN	BN	BN								

MELT METHOD: VIM + ESR

RA TRACER # 0440171 US

PAGE 01 - CONTINUED ON PAGE 02

12/11/14 14:57:37

CONSIGNEE: Please Note - This consignment was turned over to carrier in first class condition, being correctly loaded, at which time our responsibility for loss or damage in shipment ceases. For your protection please examine the shipment as it arrives. If any shortage or damage is discovered, have a full description made by transportation agent on waybill before signing.

WARNING
Safety Data Sheets for this product are available on our website, www.ATImetals.com. A thorough review of the Safety Data Sheet for the grade of material purchased shall be performed prior to working with this product and all safety & health considerations outlined must be implemented.

The above is a true copy of data on file. The material and test results conform to the sales contract and specification(s) as set forth in ATI Flat Rolled Products' Order Acknowledgement.

Stephen Wolff
Director, Corporate Quality Assurance

Heat # 07L4K12-02



Trace # TRA0000020HR



Localization error 64 (index = 380) 15)

**NOTICE OF SHIPMENT/
PACKING LIST**



Flat Rolled Products

CERTIFICATE OF TEST

AL 6168-6

CUST. ORD. NO. & DATE 0116615-CIN	CUST. CODE 09/04/14 773550	ACCEPTING MILL	SHIPPER NO. 457485	PRODUCT CODE 13010103060000	MILL ORDER NUMBER 32-094-036	DATE SHIPPED 12/11/14
FORMS DISTRIBUTION SOLD TO ROLLED ALLOYS INC PO BOX 310 TEMPERANCE MI 48182		REPEAT ORDER 03365-4	GOVT CONTRACT	MATL 2245	SHIPPING LOCATION BRACKENRIDGE #3 PA	INVOICE 031864
		DO. RATE 31	PRI. ORITY	SHIP TO ROLLED ALLOYS INC. 4085 THUNDERBIRD LANE FAIRFIELD OH 45014		

GRADE "ATI 718" NICKEL ALLOY SHEET C R CUT LENGTHS ANNEALED 2D FIN 3 EDGE CARRIER - GREAT AMERICAN LINES, INC.

ITEM TEST NO	TEST CONDITION	YIELD PSI	TENSILE PSI	% ELONG IN 2"	HARDNESS	BEND	ASTM GRAIN SIZE	STRESS CORROSION	CORROSIC SALT SPRAY
001B 3738888	AS RECEIVED	T*62000	127000	53	91.HRBW 92.HRBW	T PASS TC	8. 8.	NR	NR
TEST LOCATION	HT1 AT ROOM TEMP	*172000	199000	19	46.0HRC 47.0HRC	TC	TC		
TEST LOCATION	HT1 AT ELEV TEMP	*143000	162000	18	NR				
TEST LOCATION	HT2 AT ROOM TEMP	*171000	199000	20	47.0HRC 47.0HRC				
TEST LOCATION	HT2 AT ELEV TEMP	*143000	160000	16	NR				
TEST LOCATION		WM	WM	WM					

* Y.S. BY 0.2% OFFSET METHOD

ITEM TEST NO	MICRO	MELT SOURCE	INTER-GRAN ATTACK	A.L.A. GRAIN SIZE	MICROSTRUC AVERAGE	GRAIN SIZE	MACROETCH
001B 3738888	UNIFORM	1.	.0000	7.	PASS	7.5	PASS
TEST LOCATION	1.		.0000	7.	PASS	7.5	PASS
TEST LOCATION	TC		TC	TC	TC	TC	TC

RA TRACER # 0440171 US

PAGE 02 - CONTINUED ON PAGE 03

12/11/14 14:57:37

CONSIGNEE: Please Note - This consignment was turned over to carrier in first class condition, being correctly loaded, at which time our responsibility for loss or damage in shipment ceased. For your protection please examine shipment as it arrives. If any shortage or damage is discovered, have a full description made by transportation agent on waybill before signing.

WARNING
Safety Data Sheets for this product are available on our website, www.ATImetals.com. A thorough review of the Safety Data Sheet for the grade of material purchased shall be performed prior to working with this product and all safety & health considerations outlined must be implemented.

The above is a true copy of data on file. The material and test results conform to the sales contract and specification(s) as set forth in ATI Flat Rolled Products' Order Acknowledgment.

Stephen Wolf, Director, Corporate Quality Assurance

Heat # 07L4K12-02



Tracer # TRA0000020HR



Localization error 84 (index = 380) 15)

Localization error 84 (index = 373) 8 Localization error 84 (index = 380) 15)

**NOTICE OF SHIPMENT/
PACKING LIST**



Flat Rolled Products

CERTIFICATE OF TEST

AL 6168-B

CUST. ORD. NO. & DATE 0116615-CIN 09/04/14		CUST. CODE 773550	ACCEPTING MILL	SHIPPER NO. 457485	PRODUCT CODE 13010103060000	MILL ORDER NUMBER 32-094-036	DATE SHIPPED 12/11/14
FORMS DISTRIBUTION SOLD TO → SHIP TO → SPEC →		REPEAT ORDER 03365-4	DO. RATE 31	GOV'T CONTRACT	MATL. 2245	SHIPPING LOCATION BRACKENRIDGE #3 PA	INVOICE 031864
SOLD TO ROLLED ALLOYS INC PO BOX 310 TEMPERANCE MI 48182		PRIME DSO SEC. DSO 516			SHIP TO ROLLED ALLOYS INC. 4085 THUNDERBIRD LANE FAIRFIELD OH 45014		

GRADE "ATI 718" NICKEL ALLOY SHEET C R CUT LENGTHS ANNEALED 2D FIN 3 EDGE CARRIER - GREAT AMERICAN LINES, INC.

ITEM TEST NO	(1) STRESS RUPTURE	(2) STRESS RUPTURE	(1) S.R. ELONGATION	(2) S.R. ELONGATION
001B 3738888	150.2 HRS	88.3 HRS	9.	7.
TEST LOCATION	BROKE TC	BROKE TC	TC	TC

NR = DATA NOT REQUIRED
METALLOGRAPHIC MAGNIFICATION: 100X ETCHANT USED: HCl/CHROMIC ACID

GRADE VERIFICATION WAS CARRIED OUT SPECTROSCOPICALLY

INTERGRANULAR ATTACK MAGNIFICATION: 500X

EN 10204:2005 - 3.1 CERTIFICATE DOES NOT INDICATE PED APPROVAL FOR THIS MATERIAL.

THESE COMMODITIES OR TECHNOLOGY, WHEN EXPORTED FROM THE UNITED STATES, ARE IN ACCORDANCE WITH THE USA EXPORT ADMINISTRATION REGULATIONS. DIVERSION CONTRARY TO U.S. LAW IS PROHIBITED. U.S. LAW ALSO PROHIBITS DISPOSITION OF THESE COMMODITIES/TECHNICAL DATA TO ANY END-USER OR FOR ANY END-USE RELATED TO THE DESIGN, DEVELOPMENT, PRODUCTION, STOCKPILING, OR USE OF CHEMICAL, BIOLOGICAL, OR NUCLEAR WEAPONS, OR MISSILES, WITHOUT THE PROPER APPROVAL OF THE UNITED STATES GOVERNMENT.

HT1 - HEAT TO 1325 +/- 15F (718 +/- 8C). HOLD AT HEAT FOR 8 +/- 0.5 HOURS; FURNACE COOL TO 1150 +/- 15F (621 +/- 8C) IN 2 +0.1/-0 HOURS THEN HOLD AT 1150 +/- 15F (621C +/- 8C) FOR 8 +0.5/-0 HOURS. AIR COOL TO ROOM TEMPERATURE.

RA TRACER # 0440171 US

PAGE 03 - CONTINUED ON PAGE 04

12/11/14 14:57:37

CONSIGNEE - Please Note-This consignment was turned over to center in first class condition, being correctly loaded, at which time our responsibility for loss or damage in shipment ceased. For your protection please examine shipment as it arrives. If any shortage or damage is discovered, have a full description made by transportation agent on waybill before signing.

WARNING
Safety Data Sheets for this product are available on our website, www.ATImetals.com. A thorough review of the Safety Data Sheet for the grade of material purchased shall be performed prior to working with this product and all safety & health considerations outlined must be implemented.

The above is a true copy of data on file. The material and test results conform to the sales contract and specification(s) as set forth in ATI Flat Rolled Products' Order Acknowledgement.

Stephen Wolf
Director, Corporate Quality Assurance

Heat #
07L4K12-02
Tracer #
TRANNNNNN20HR

Localization error 104 (index = 380) 15)
Localization error 104 (index = 373) 10 Localization error 104 (index = 380) 15)

NOTICE OF SHIPMENT/
PACKING LIST



Flat-Rolled Products

CERTIFICATE OF TEST

CUST. ORD. NO. & DATE 0116615-CIN	CUST. CODE 09/04/14 773550	ACCEPTING MILL	SHIPPER NO. 457485	PRODUCT CODE 13010103060000	MILL ORDER NUMBER 32-094-036	DATE SHIPPED 12/11/14
FORMS DISTRIBUTION SOLD TO ROLLED ALLOYS INC PO BOX 310 TEMPERANCE MI 48182	REPEAT ORDER 03365-4	DO RATE 31	GOVT CONTRACT	MATL. 2245	SHIPPING LOCATION BRACKENRIDGE #3 PA	INVOICE 031864
	PRIME DSO	SEC. DSO		SHIP TO ROLLED ALLOYS INC. 4085 THUNDERBIRD LANE FAIRFIELD OH 45014		

GRADE "ATI 718" NICKEL ALLOY SHEET C R CUT LENGTHS ANNEALED 2D FIN 3 EDGE CARRIER - GREAT AMERICAN LINES, INC.

STRESS RUPTURE (1) IS HEAT TREATED PER HT1 THEN TESTED AT 1200 +/- 3F (649 +/- 2C) WITH AN INITIAL AXIAL STRESS OF 95,000 PSI (654 MPA) FOR MATERIAL 0.025" (0.635MM) AND LESS OR 100,000 PSI (689 MPA) FOR MATERIAL OVER 0.025" (0.635MM).

HT2 - HEAT TO 1750 +/- 25F (954 +/- 14C) AND HOLD FOR 60 +/- 5 MINUTES. COOL TO ROOM TEMPERATURE. HEAT TO 1325 +/- 15F (718 +/- 8C) AND HOLD FOR 8 +/- 0.5 HOURS. FURNACE COOL TO 1150 +/- 15F (621 +/- 8C) IN 2 +/- 0.1 HOURS THEN HOLD AT 1150 +/- 15F (621 +/- 8C) FOR 8 +/- 0.5 HOURS. AIR COOL TO ROOM TEMPERATURE.

STRESS RUPTURE (2) IS HEAT TREATED PER HT2 THEN TESTED AT 1200 +/- 3F (649 +/- 2C) WITH AN INITIAL AXIAL STRESS OF 100,000 PSI (689 MPA).

ELEVATED TEMPERATURE TENSILES ARE HEAT TREATED AS DESIGNATED PER HT1 OR HT2 THEN HEATED TO 1200 +/- 5F (649 +/- 3C), HELD AT HEAT 20-30 MINUTES, THEN TESTED AT 1200 +/- 5F (649 +/- 3C).

HT1 MEETS THE REQUIREMENTS FOR AMS 5596 ACCEPTANCE TESTS; HT2 MEETS THE REQUIREMENTS FOR AMS 5596 PERIODIC TESTS AND GE B50TF14 ACCEPTANCE TESTS.

NO WELD REPAIRS.

RA TRACER # 0440171 US

MATERIAL IS OF USA MELT AND MANUFACTURE.

BY CERTIFYING TO B50TF14-S22 CLASS E, WE HAVE CERTIFIED THAT THIS MATERIAL IS CAPABLE OF MEETING CLASS F, WHEN HEAT TREATED IN ACCORDANCE WITH THE CLASS F REQUIREMENTS OF PARAGRAPH 3.6.1. HEAT TREATED PROPERTIES REPORTED ON OUR CERTIFICATE OF TEST SHOW THE RESULTS AFTER SAMPLES WERE HEAT TREATED TO THE REQUIREMENT OF CLASS F. ACTUAL COIL WAS SUPPLIED IN THE MILL ANNEALED CONDITION IN ACCORDANCE WITH CLASS

CONSIGNEE: Please Note—This consignment was turned over to center in best class condition, being correctly loaded, at which time our responsibility for loss or damage in shipment ceased. For your protection please examine shipment as it arrives. If any shortage or damage is discovered, have a full description made by transportation agent on waybill before signing.

WARNING: Safety Data Sheets for this product are available on our website, www.ATImetals.com. A thorough review of the Safety Data Sheet for the grade of material purchased shall be performed prior to working with this product and all safety & health considerations outlined must be implemented.

The above is a true copy of data on file. The material and test results conform to the sales contract and specification(s) as set forth in ATI Flat Rolled Products' Order Acknowledgement.

Stephen Wolff - Director, Corporate Quality Assurance

Heat # 07L4K12-02
Tracer # TRA000020HR

Localization error 124 (index = 380) 15)
Localization error 124 (index = 373) 12 Localization error 124 (index = 380) 15)

**NOTICE OF SHIPMENT/
PACKING LIST**



Flat Rolled Products

CERTIFICATE OF TEST

AL 6168-E

CUST. ORD. NO. & DATE 0116615-CIN		CUST. CODE 09/04/14 773550	ACCEPTING MILL	SHIPPER NO. 457485	PRODUCT CODE 13010103060000	MILL ORDER NUMBER 32-094-036	DATE SHIPPED 12/11/14
SOLD TO ROLLED ALLOYS INC PO BOX 310 TEMPERANCE MI 48182	FORMS DISTRIBUTION SHP TO SPEC	REPEAT ORDER 03365-4	DO. RATE 31	GOVT CONTRACT	MATL. 2245	SHIPPING LOCATION BRACKENRIDGE #3 PA	INVOICE 031864
SOLD TO ROLLED ALLOYS INC PO BOX 310 TEMPERANCE MI 48182				SHIP TO ROLLED ALLOYS INC. 4085 THUNDERBIRD LANE FAIRFIELD OH 45014			

GRADE "ATI 718" NICKEL ALLOY SHEET C R CUT LENGTHS ANNEALED 2D FIN 3 EDGE CARRIER - GREAT AMERICAN LINES, INC.

WESTMORELAND MECHANICAL TESTING & RESEARCH, YOUNGSTOWN, PA (T7869) IS A GEAE S400 AND ISO/IEC 17025 APPROVED FACILITY.

THIS EN 10204:2005 - 3.1 CERTIFIED MATERIAL TEST REPORT SHALL NOT BE REPRODUCED EXCEPT IN FULL. FEDERAL LAW PROHIBITS THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS, OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THE CERTIFICATE AND MAY BE PUNISHABLE AS A FELONY UNDER FEDERAL LAW. ATI FRP HOLDS SEVERAL QUALITY CERTIFICATIONS THAT INCLUDE ISO-9001, AS9100, NADCAP, AND ISO/IEC 17025. MATERIAL WAS MANUFACTURED IN ACCORDANCE WITH THE ATI FRP QUALITY MANUAL REVISION 23 DATED 06/13/2014.

ATI FLAT ROLLED PRODUCTS WORKS TO THE ROLLS ROYCE SABRE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM REQUIREMENTS.

ATI FLAT ROLLED PRODUCTS PERFORMS CHEMICAL ANALYSIS BY THE FOLLOWING TECHNIQUES FOR TESTING LOCATIONS TC, BN, MI, & LG:
 C, S BY COMBUSTION/INFRARED
 N, O, H BY INERT FUSION/THERMAL CONDUCTIVITY
 MN, P, SI, CR, NI, MO, CU, CB, CO, V BY WDXRF
 B BY OES
 AL AND TI (>=0.10%) BY WDXRF, OTHERWISE BY OES
 PB, BI, AG BY GFAA

RA TRACER #0440171 US

MATERIAL TESTED AT ATI FLAT ROLLED PRODUCTS GEAE S400 APPROVED FACILITIES (T1225 & T9317):
 NATRONA HEIGHTS, PA; BRACKENRIDGE, PA AND NEW BEDFORD, MA.

ATI FLAT ROLLED PRODUCTS HOLDS SEVERAL QUALITY AND LABORATORY CERTIFICATIONS THAT INCLUDE ISO-9001, AS9100 AD 2000-MERKBLATT WO, EU PRESSURE EQUIPMENT DIRECTIVE 97/23/EC, NADCAP, ISO/EIC 17025, GEAE S400, GEAE S-1000. REFER TO WWW.ATIMETALS.COM TO ACCESS THE CURRENT ATI-FRP QUALITY CERTIFICATIONS.

PAGE 05 - CONTINUED ON PAGE 06

12/11/14 14:57:37

CONSIGNEE: Please Note - This consignment was turned over to carrier in first class condition, being correctly loaded, at which time our responsibility for loss or damage in shipment ceased. For your protection please examine shipment as it arrives. If any shortage or damage is discovered, have a full description made by transportation agent on waybill before signing.

WARNING: Safety Data Sheets for this product are available on our website, www.ATImetals.com. A thorough review of the Safety Data Sheet for the grade of material purchased shall be performed prior to working with this product and all safety & health considerations outlined must be implemented.

The above is a true copy of data on file. The material and test results conform to the sales contract and specification(s) as set forth in ATI Flat Rolled Products' Order Acknowledgement.

Stephen Wolf
 Director, Corporate Quality Assurance

4 07L4k12 -02
 TRA 00002 2014

**NOTICE OF SHIPMENT/
PACKING LIST**



Flat Rolled Products

CERTIFICATE OF TEST

AL 6168-4

CUST. ORD. NO. & DATE 0116615-CIN		CUST. QTY 09/04/14 773850		ACCEPTING MILL	SHIPPER NO. 457485	PRODUCT CODE 13010103060000	MILL ORDER NUMBER 32-094-036	DATE SHIPPED 12/11/14
FORMS DISTRIBUTION SOLD TO → SHIP TO → SPEC →		REPEAT ORDER 03365-4	DO. RATE 31	PRI. ORITY	GOV'T CONTRACT	MATL. 2245	SHIPPING LOCATION BRACKENRIDGE #3 PA	INVOICE 031864
SOLD TO ROLLED ALLOYS INC PO BOX 310 TEMPERANCE MI 48182		PRIME SEC. DSO DSO 516	SHIP TO ROLLED ALLOYS INC. 4085 THUNDERBIRD LANE FAIRFIELD OH 45014					

GRADE "ATI 718" NICKEL ALLOY SHEET C R CUT LENGTHS ANNEALED 2D FIN 3 EDGE CARRIER - GREAT AMERICAN LINES, INC.

THE NUMERIC CODES SHOWN UNDER MELT SOURCE CAN BE INTERPRETED AS FOLLOWS:

1. - MATERIAL MELTED, ROLLED AND TESTED IN THE UNITED STATES.
2. - FOREIGN MELT; ROLLED AND TESTED IN THE UNITED STATES.

ATI FLAT ROLLED PRODUCTS HAS RECEIVED NADCAP APPROVAL FOR CHEMICAL, MECHANICAL, METALLOGRAPHIC, HARDNESS, CORROSION TESTING, MECHANICAL TEST SPECIMEN PREPARATION, AND HEAT TREATMENT OF SPECIMENS. VERIFICATION OF SCOPE AND ACCREDITATION IS AVAILABLE ONLINE.

TESTING WAS PERFORMED AT THE FOLLOWING LOCATIONS:

- BN = ATI-FLAT ROLLED PRODUCTS; 100 RIVER ROAD; BRACKENRIDGE, PA 15014
- TC = ATI-FLAT ROLLED PRODUCTS; 1300 PACIFIC AVENUE; NATRONA HEIGHTS, PA 15065
- WM = WESTMORELAND MECHANICAL TESTING; 221 WESTMORELAND DRIVE; YOUNGSTOWN, PA 15696

ROLLED ALLOYS QUALITY ASSURANCE

APPROVED JAM
DATE 12/15/14

FOR ACCESS TO ONLINE CERTIFICATES OF TEST REGISTER AT MYATI.ATIMETALS.COM

PMI VERIFIED BY:
JAM 12/15/14

RA TRACER # 0440171 US

PAGE 06 - FINAL PAGE.

12/11/14 14:57:37

CONSIGNEE: Please Note - This consignment was turned over to carrier in first class condition, being correctly loaded, at which time our responsibility for loss or damage in shipment ceased. For your protection please examine shipment as it arrives. If any shortage or damage is discovered, have a full description made by transportation agent on waybill before signing.

WARNING: Safety Data Sheets for this product are available on our website, www.ATImetals.com. A thorough review of the Safety Data Sheet for the grade of material purchased shall be performed prior to working with this product and all safety & health considerations outlined must be implemented.

The above is a true copy of data on file. The material and test results conform to the sales contract and specification(s) as set forth in ATI Flat Rolled Products' Order Acknowledgement.

Stephen Wolf
Director, Corporate Quality Assurance

M 07L4k12-0
TRA 00000 2014

Localization error 154 (index = 373) 15 Localization error 154 (index = 380) 15)