



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**SVAŘITELNOST KOBALTOVÝCH SLITIN HYBRIDNÍ
METODOU LASER-TIG**

WELDABILITY OF COBALT ALLOYS BY HYBRID METHOD LASER-TIG

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Herčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marián Sigmund, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Tomáš Herčík**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Marián Sigmund, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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 diplomové práce:

Svařitelnost kobaltových slitin hybridní metodou Laser–TIG

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kobalt tudíž i jeho slitiny patří v dnešní době mezi vzácné kovy a jeho cena je takřka srovnatelná s cenou stříbra a to hlavně zdůvodu využití kobaltu při výrobě lithium–ion (Li–Ion) baterií. Je předpoklad, že do roku 2020 bude veškerá spotřeba kobaltu využívána na jejich výrobu. Proto bude v budoucnu velmi aktuální nedostatek této slitiny řešit, jak z pohledu využití jiných slitin pro výrobu baterií nebo úsporou ve využívání při stávajících aplikacích. Jelikož kobalt je slitina svařitelná bude nutné hledat i vhodnější technologie svařování bez použití přídavného materiálu. Například použitím hybridních technologií svařování.

Cíle diplomové práce:

Vypracovat literární rešerži kobaltových slitin a její svařitelnosti, včetně hybridních technologií svařování.

Navrhnout vhodné parametry svařování kobaltových slitin metodou Laser–TIG.

Svařit zkušební svarový spoj a následně jej vyhodnotit z hlediska kvality a celistvosti.

Provézt strukturní rozbor svaru, včetně analýzy rizik možného vzniku vad.

Zhodnotit vhodnost dané technologie svařování pro kobaltové slitiny.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

PILOUS, Václav. Materiály a jejich chování při svařování, 1. vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009.

FOLDYNA, Václav. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

MAJER, Lubomír. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-70-5.

BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

MOHYLA, Miroslav. Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1992. ISBN 80-7078-138-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

HERČÍK Tomáš: Svařitelnost kobaltových slitin hybridní metodou Laser-TIG.

Diplomová práce předkládá shrnutí kritické situace nedostatku kobaltu používaného v různých průmyslových odvětvích. Kvůli neustále narůstající ceně jej nebude možné ve stávajících aplikacích používat. Jednou z těchto aplikací je výroba kobaltových slitin, kde je nahrazení prvku nemožné. Tento druh materiálu neztrácí mechanické vlastnosti ani při vysokých teplotách. Vhodnou volbou technologie však lze docílit alespoň jeho úspory. V oblasti svařování se jedná o spojování slitin bez použití přídavného materiálu. Možným řešením by tak mohlo být použití hybridních technologií nebo elektronového paprsku. Ověření svařitelnosti obou metod bylo realizováno v experimentální části a vyhodnoceno pomocí destruktivních metod. Zkoumání proběhlo na ořezuvzdorné slitině Stelit 6B.

Klíčová slova: Stelit 6B, hybridní svařování, elektronové svařování, kobaltové slitiny

ABSTRACT

HERČÍK Tomáš: Weldability of cobalt alloys by hybrid method Laser-TIG.

The master thesis summarizes the critical situation of the lack of a cobalt used in different industry branches. Due to its increasing price, it will not be possible to use in existing applications. One of these applications is production of cobalt alloys where the replacement of this element is impossible. This type of material keeps mechanical properties at high temperature. However, a suitable choice of technology can achieve at least its savings. In the field of welding, the alloys are joined without any use of an additional material. The possible solution could be the use of hybrid technologies or electron beam. Verification of weldability of both methods was realised in experimental parts and evaluated by destructive methods. The investigation was performed on wear resistant alloy Stellite 6B.

Keywords: Stellite 6B, hybrid welding, electron beam, cobalt alloys

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HERČÍK, Tomáš. *Svařitelnost kobaltových slitin hybridní metodou Laser-TIG* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121509>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marián Sigmund.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V dne 26.6.2020

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Mariánu Sigmundovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, přátelům a přítelkyni za podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
1 ROZBOR ZADÁNÍ	9
1.1 Kobalt a jeho základní vlastnosti	11
2 KOBALTOVÉ SLITINY	13
2.1 Otěruvzdorné slitiny	14
2.2 Korozivzdorné slitiny	16
2.3 Žáruvzdorné slitiny	18
3 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ	20
3.1 Konvenční metody	21
3.2 Nekonvenční metody	22
3.3 Hybridní metody	24
3.3.1 Možnosti zapojení elektrického oblouku metody TIG (141)	29
3.3.1 Režimy svařování laserovým svazkem.....	30
4 SVAŘITELNOST KOBALTOVÝCH SLITIN	31
4.1 Detekce vad svarových spojů	33
4.1.1 Způsoby přípravy metalografického vzorku.....	34
4.1.2 Způsoby hodnocení makro/mikrostruktury	35
4.1.3 Způsoby zkoumání chemického složení.....	38
4.1.4 Způsoby hodnocení tvrdosti	39
4.2 Termovizní kontrola vneseného tepla	40
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	41
5.1 Materiálový rozbor	41
5.2 Zhotovení svarů hybridním svařováním	42
5.3 Zhotovení svarů elektronovým paprskem	45
5.4 Zhotovení metalografického vzorku	46
5.5 Vyhodnocení mikro a makrostruktury	48
5.6 Vyhodnocení tvrdosti dle Vickerse	54
5.7 Vyhodnocení chemického složení pomocí EDS analýzy	57
ZÁVĚRY	59

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6]

Čistý prvek byl oproti železu detekován teprve nedávno, a to v roce 1735 švédským chemikem Georgem Brandtem. Ve skutečnosti je však využíván celá staletí, kde ve formě kobaltových sloučenin dodával keramice a glazurám modrou barvu. Dokonce byl nalezen v egyptských sochách a perských perlových náhrdelnících 3000 let př. n. l. Modré zbarvení však v té době bylo připisováno rudám obsahující měď. Tyto rudy byly označovány kobolt, od kterých je převzat i název prvku. Až v roce 1742 Brandt objasnil, že modré zbarvení zmíněných rud způsobila přítomností kobaltu. Pro výrobu slitiny začal být využíván na přelomu 20. století Elwoodem Haynesem. Ten zpočátku zkoumal chování binární slitiny Co-Cr, u které objevil vysokou pevnost a korozivzdornost. Při dalších výzkumech přišel na posilující prvky W a Mo. Díky jejich hvězdnému odlesku dostaly název Stelity, který vychází z latinského *stella* (hvězda). Další výzkumy potvrdily zachování přiměřené pevnosti za vysokých teplot. Tento aspekt umožnil úspěšné použití pro řezné nástroje během první světové války. V roce 1922 došlo k vytvoření první návarové vrstvy za účelem zvýšení odolnosti povrchů proti opotřebení. Touto formou byly aplikovány např. na radlice, ventily a vrtáky ropných plošin. Na přelomu 30. a 40. let 20. století došlo k vývoji Stelitů pro korozní a vysokoteplotní potřeby. S příchodem slitiny Co-Cr-Mo s nízkým obsahem uhlíku došlo k rozšíření o dentální aplikace. Zvýšení strukturální stability stejné slitiny umožnilo odlévání lopatek turbodmychadel letadel za druhé světové války.

Dnes již nedochází k tak markantnímu vývoji kobaltových slitin, jak tomu bylo v předchozích letech. Z některých oblastí jsou dokonce vytlačovány a nahrazovány jinými. Částečně za to může globální poptávka po čistém prvku, s kterou roste i jeho cena. Nejvíce je trh ovlivňován automobilovým průmyslem, který kobalt využívá pro zvýšení kapacity lithium-iontových baterií. Přednosti jako odolnost proti opotřebení, korozi, které výrazně neztrácejí ani při vysokých teplotách, znemožňují jejich úplné nahrazení. Kvůli rentabilitě bude nutné hledat alespoň jeho úsporu, které zahrnuje i oblast svařování. Nejčastěji jsou totiž využívány méně ekonomické konvenční metody.



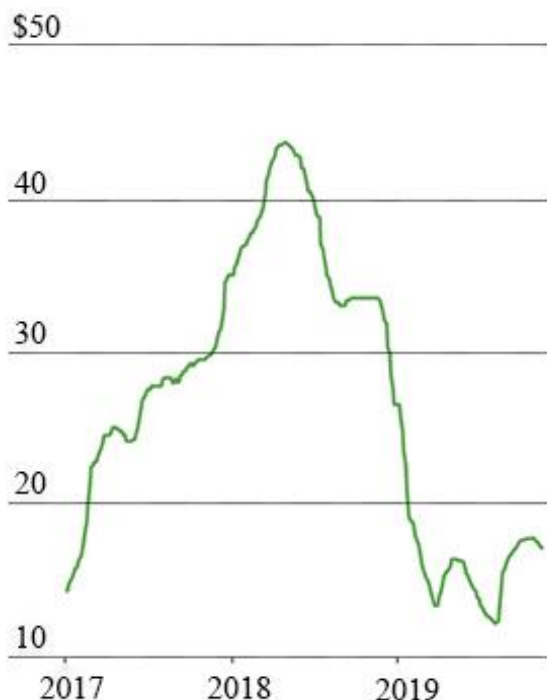
Obr. 1 Konvenční metoda svařování a aplikace automobilového průmyslu. [5], [6]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [1], [7], [8], [9], [10], [11]

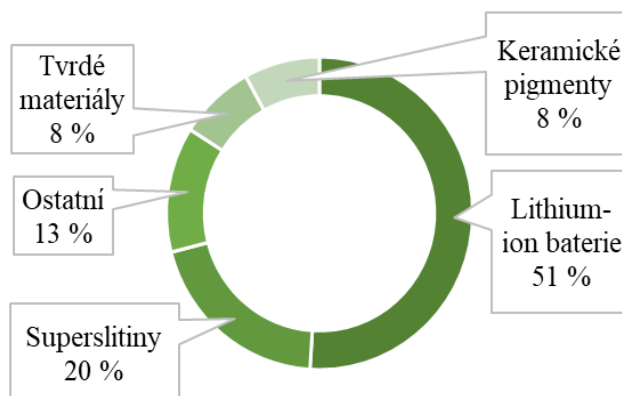
Kobalt je díky svým vlastnostem považován za strategický kov a hraje důležitou roli v průmyslovém rozvoji. V předchozích letech bylo předpokládáno, že hodnota této komodity bude nadále stoupat. Od roku 2020 bude veškerý kov vyhrazen pro primární oblast výrobu lithium-iontových baterií do elektromobilů, chytrých telefonů a z ostatních odvětví bude vytlačen.

Nyní však jeho tržní hodnota prudce klesá a je nejnižší za poslední 2 roky. Tento náhlý pokles je následkem čínské politiky. Průběžné hodnoty cen jsou znázorněny na obr. 2. Čína představuje největší světový trh s produkcí a odběrem elektromobilů. Ty měly být řešením vzrůstajícího smogu z naftových a benzinových motorů. V loňském roce trh představoval 60 % celkového globálního objemu. Velikost poptávky po tomto zboží však nebyla tak velká, jak se předpokládalo, a má klesající tendenci. V posledních měsících bylo vládou nařízeno zrušení limitů pro nákup benzinových motorů, které stanovila začátkem tohoto roku. Rovněž byla snížena dotace na nákup elektromobilů, která má být v následujícím roce zrušena úplně. Vzácného kovu je tedy na trhu přebytek a jeho hodnota klesá. Stávající aplikace tak zůstávají nepozměněny a jsou znázorněny na obr. 3.

V následujících pěti letech je však analytiky očekáván prudký nárůst ceny. Nabídka převyší poptávku již v roce 2024. V tomto období bude chybět přibližně 47 500 t. Ze sekundární metalurgické oblasti bude tedy opět vytlačován. Zde je využíván kvůli jeho mechanickým vlastnostem, které slitinám dodává v tuhé matici s dalšími prvky. Mimo přímou hutní výrobu polotovaru je používán i pro výrobu přídatného materiálu v různých formách pro svařování. Je tedy očekáván prudký nárůst ceny a hledání ekonomičtějšího spojení či navaření povrchové úpravy.



Obr. 2 Graf vývoje ceny kobaltu. [9]



Obr. 3 Aktuální rozsah aplikací kobaltu. [10]

1.1 Kobalt a jeho základní vlastnosti [1], [7], [2], [4], [11], [10], [12]

Nezbytná minerální komodita je důležitá pro hospodářský rozvoj. Dle použití jsou rozdělovány do čtyř skupin na stavební minerály, průmyslové minerály, energetické minerály a kovy. Kovy jsou vyznačovány charakteristickými chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Kobalt patří do skupiny vzácných kovů a je řazen mezi tzv. kritické kovy. To je především dáno lokací a množstvím ložisek, kde se vyskytuje pouze ve sloučenině s jinou látkou.

Zejména se nachází v přítomnosti sulfidických a niklových rud, u kterých se vyskytuje v málem množství. Celková koncentrace prvku v zemské kůře se pohybuje pod 0,01 hm. %. Primární účel těžby je nejčastěji zaměřen na produkci mědi a niklu, ojediněle se těžba zaměřuje pouze na kobalt. Nejvýhodnější rudy pro extrakci jsou carrollit, kobaltin, smaltin a linnaeit. Pro průmyslové zaměření to jsou heterogenit a erytrit, jehož zbarvení znázorňuje obr. 4.



Obr. 4 Zabarvení erythritu. [11]

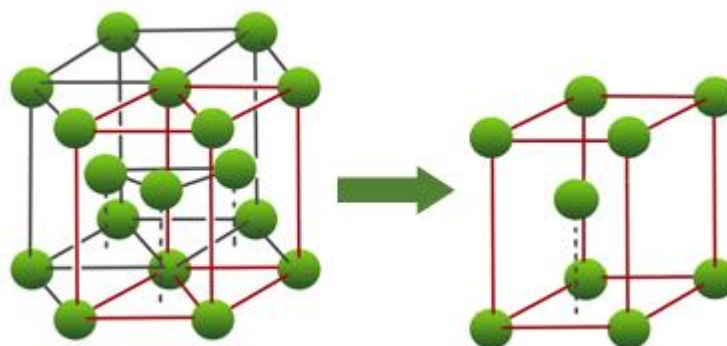
Globální dodávky jsou nejvíce závislé na geologických ložiskách nacházejících se v Demokratické republice Kongo, kde je těžba zaměřena na extrakci mědi. Celkem lze získat kov ze tří geologických ložisek:

- Hydrotermální ložiska – vznikla vlivem sedimentačních nánosů nebo reakcí hydrotermální tekutiny s různými druhy mafických a ultramafických hornin. Za ložiska tohoto původu je považována právě DRC a tvoří 65 % celkových dodávek.
- Laterit – geologické ložisko bohaté na nikl, které pokrývá 70 % světových zdrojů. Obsah kobaltu se zde pohybuje kolem 0,025–0,18 %. Vznik ložisek je následkem zvětrávání ultramafických hornin v tropických a subtropických prostředích.
- Magmatická ložiska – nejstarší naleziště tvořená sulfidy. Jedním z možných způsobů vzniku je tuhnutí tekoucího magmatu na počátku historie Země. To mělo za následek tvorbu sulfidických sraženin bohatých na měď a nikl s malým množstvím kobaltu 0,04–0,08 %. Magmata s tímto obsahem jsou dělena na mafická a ultramafická. Zmíněná magmata jsou charakteristická vysokým obsahem hořčíku nízkým obsahem křemíku.

Obecně je výskyt tohoto minerálu potvrzen v malém množství např. ve slunci, hvězdných atmosférách, rostlinách, půdách... Pro těžební záměr jsou tyto zdroje nedostatečné. Výjimkou však je dno oceánu, kde se nalézají ložiska ve formě škraloupů a uzlin. Zmíněné ložisko není doposud využíváno a je považováno za možný zdroj v budoucnosti.

Chemický prvek je charakteristický stříbrnou barvou a lesklým vzhledem. V periodické tabulce prvků je umístěn ve střední oblasti přechodových d-prvků. Přesněji se nachází v 9. skupině a 4. periodě mezi železem a niklem s atomovým číslem 27. Také se vykytuje ve dvou hlavních oxidačních stavech 2+ a 3+. V přirozené formě je označován jako stabilní izotop ^{59}Co . S rostoucí teplotou mění jak krystalovou mřížku, tak magnetické vlastnosti.

Změna magnetických vlastností nastává při teplotě 1121 °C. Při této teplotě prvek ztrácí feromagnetické vlastnosti a získává paramagnetické. Tento jev je označován jako Curierova teplota nebo Curierův bod, který oproti železu (770 °C) dosahuje výrazně vyšších hodnot. Za běžných podmínek je krystalová mřížka hexagonálně těsně uzavřená (HCP). Přeměna nastává mezi teplotou 417 °C a teplotou tání 1493 °C, kde se mřížka přetváří na plošně středěnou (FCC). Vlastností měnit krystalovou mřížku v pevném skupenství při změně teploty se řadí kobalt mezi tzv. polymorfní látky. U prvků je přeměna známá jako alotropie. Konkrétní fáze jsou v diagramech značeny jako přeměna ϵ -kobalt (HCP) $\rightarrow$ α -kobalt (FCC). Následkem pomalé rychlosti přeměny se v určitých částech mohou vyskytovat obě fáze najednou.



Obr. 5 Transformace krystalové mřížky. [12]

Zmíněná krystalografická povaha dodává slitinám nestabilní FCC krystalovou strukturu s nízkou energií vrstevných chyb. Nestabilní struktury se dosáhne pomocí extrémně pomalého ochlazení elementárního kobaltu. Vrstevné chyby jsou začleněny mezi plošné poruchy a lze je charakterizovat jako nepravidelnost v řazení krystalografických rovin. Teplota přeměny krystalové mřížky u většiny slitin je vyšší než u čistého prvku a samotná transformace je časově náročná. Z tohoto důvodu celý proces probíhá za pokojové teploty a přeměny se docílí pomocí mechanického namáhání.

Na slitině se souhrn nestabilní struktury a nízké energie vrstevnatých poruch projeví vysokou mezí kluzu, vysokou rychlostí vytvrzování, omezením únavového poškození vlivem cyklického zatěžování a schopností absorbovat napětí. Tyto vlastnosti jsou klíčovými pro určité aplikace. Například pro odolnost proti kluznému opotřebení jsou důležité první tři zmíněné vlastnosti. Zbylé vlastnosti jsou důležité pro odolnost proti kavitaci a erozní korozi. Ostatní základní vlastnosti prvku jsou shrnuty v tab. 1.

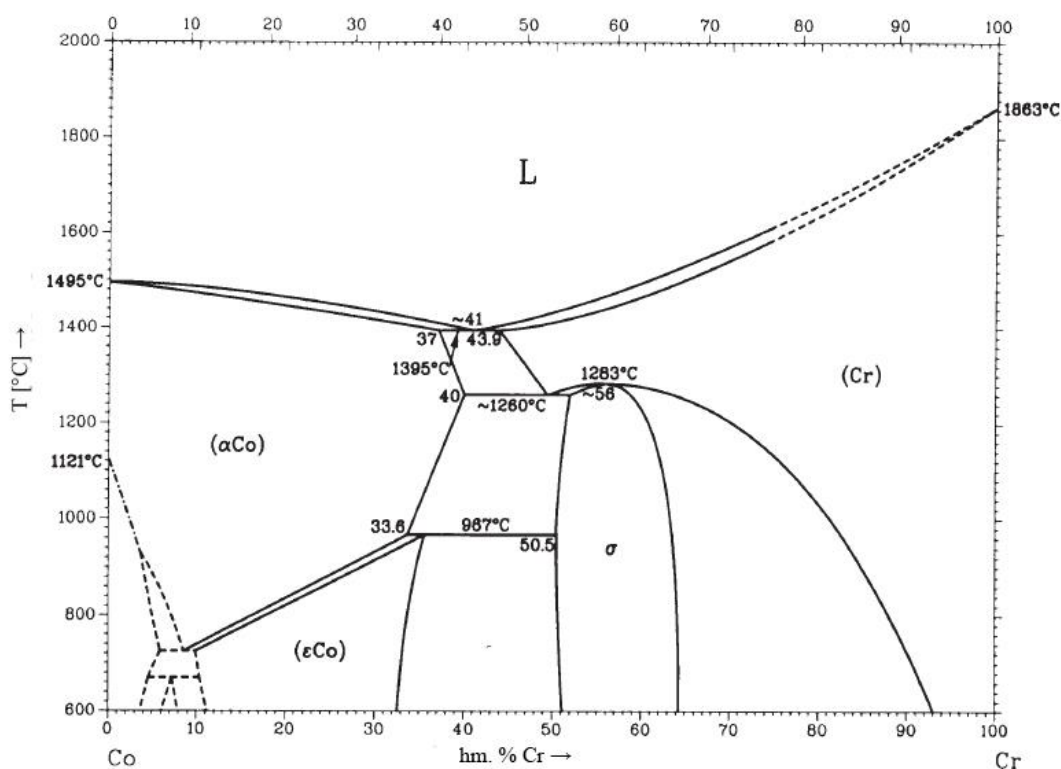
Tab. 1 Základní vlastnosti prvku. [2], [4]

Relativní atomová hmotnost [-]	59,3332
Teplota tání [°C]	1495
Teplota varu [°C]	3100
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	8,9
Tvrdost dle Vickerse [HV]	140–250
Tepelná vodivost: [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	100

2 KOBALTOVÉ SLITINY [1], [4]

Spolu se slitinami na bázi niklu a kombinací železo-nikl jsou označovány za tzv. superslitiny. Obvykle jsou uvedené slitiny používány za teploty kolem 540 °C. Oproti ostatním slitinám výrazně neztrácí vlastnosti jako korozivzdornost, oteruvzdornost a žáruvzdornost se zvyšující teplotou. Dle jednotlivých aplikací jsou dále rozdělovány do několika oblastí. Vhodnost použití pro danou aplikaci určuje především chemické složení a předchozí zpracování, které má vliv na velikost zrn. U chemického složení hraje nejvýznamnější roli procento uhlíku, který reaguje s dalšími prvky.

Při aplikacích proti opotřebení jsou doporučovány tvrdší kompozice. Tyto kompozice mají větší obsah uhlíku a jsou tedy bohatší na karbidy. Měkčí kompozice jsou uplatňovány spíše pro žáruvzdorné aplikace, frakce karbidů v celém objemu materiálu je menší. Tvorba a tvar karbidů je ovlivňována rychlostí ochlazení a přísadou legujících prvků posilujících účinky tuhého roztoku. Základní slitiny jsou odvozeny z ternárního systému Co-Cr-W a Co-Cr-Mo, které vychází z binárního systému Co-Cr uvedeného na obr. 6.



Obr. 6 Binární diagram Co-Cr. [4]

Ve slitinách jsou většinou obsaženy karbidy primárně bohaté na chrom M_7C_3 a eutektické bohaté na wolfram M_6C . Vlivy jednotlivých prvků na slitinu jsou:

- Chrom – ve vývoji slitin má největší význam. Mimo převládající karbidotvorný prvek posiluje pevnost matrice a poskytuje odolnost proti korozi a oxidaci. U většiny slitin je nejběžnějším typem karbidu M_7C_3 . Nízkouhlíkové kompozice mohou hojně obsahovat i typ $M_{23}C_6$. Snižuje celkovou hustotu, stabilizátor HCP transformace.
- Wolfram a molybden – zajišťují pevnost tuhé matrice. Jelikož mají velkou atomovou velikost brání dislokačnímu toku. Při větším obsahu se mohou podílet na tvorbě karbidů a podporovat jejich vysrážení. Zvyšují obecnou odolnost proti korozi

a hustotu slitiny. Rozhodující prvky pro výkon slitiny v provozu, stabilizátory pro HCP transformaci.

- Nikl, železo – stabilizují FCC transformaci a oproti výše zmíněným prvkům potlačují stabilizační teplotu.

Omezení použití slitiny při vysokých teplotách není dáno alotropickou modifikací, ale právě teplotou tání slitiny. Z tohoto důvodu je nutné brát ohled na prvky, které mají výrazný vliv na nárůst či pokles hustoty. Mimo výše uvedené prvky mají na nárůst hustoty vliv rhenium a tantal, kdežto titan a hliník hustotu naopak snižují.

Každá ze slitin má určitou odolnost vůči korozním, mechanickým a vysokoteplotním vlivům. Při jednotlivých aplikacích je nutné brát ohled na chemické složení a vlastnosti slitiny, jelikož existuje více činitelů způsobující např. korozi. Slitina tedy může být vhodná pro aplikace v mořské vodě, ale při použití v kyselém prostředí svůj účel ztrácí.

2.1 Otěruvzdorné slitiny [1], [4], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]

Nejvíce rozšířený typ používané kompozice. Oproti původním slitinám odvozených z binárního systému Co-Cr se liší nepatrně. Rozdíly jsou v regulaci uhlíku a křemíku, které byly v prvních slitinách nečistotami, a legujícím wolframem. Ten má spolu s uhlíkem vliv na tvorbu karbidů ve struktuře. Karbidy vyskytující se v otěruvzdorných slitinách jsou převážně M_7C_3 , pouze u slitiny Stelit 1, která je bohatá na wolfram, se hojně vyskytují i M_6C . Vychází se tedy z ternárního systému Co-Cr-W. Vhodnost použití dané kompozice je volena na základě mechanismu opotřebení, které jsou rozdělovány na:

- Abrazivní – principem je interakce částice s funkční částí povrchu, kde vzájemným silovým působením dochází k jeho degradaci. Abrazivní částice mohou tvořit přímo médium nebo jsou vneseny jako nečistoty. Na základě jejich stavu po kontaktu s funkční plochou je posuzována míra namáhání. V případě deformace je předpoklad vnesení většího napětí (tvrdá částice mezi 2 povrchy) než u částice neporušené (zemina, písek...). Obecně jsou pro tento mechanismus vhodné materiály obsahující větší množství tvrdé fáze, se kterou roste i jejich účinnost. Pro daný druh aplikace je dále posuzována jejich velikost a tvar vůči abrazivnímu médium.
- Erozivní – deformace vzniká při dopadu částice na funkční plochu stejně jak tomu bylo u předchozího typu. Dopadající částice je však obsažena v proudícím médiu (plyn, kapalina). Míra opotřebení je závislá na energii dopadající částice a úhlu dopadu. Za opotřebení tohoto druhu lze považovat i kavitaci, kde dochází ke vzniku bublin při poklesu tlaku. Tyto bubliny jsou unášeny proudem a při opětovném nárůstu tlaku dochází ke kondenzaci par obsažených v bublinách. Do bublin následně vniká voda značnou rychlostí a v případě kontaktu bublin s funkční plochou, dojde k nárazu proudu vody s materiálem. V důsledku vlivu více faktorů (chemické složení média, teplota...) je obtížnější zvolit vhodný kompozit. Obvykle zde platí stejné pravidlo, jako u abrazivního opotřebení. Toto pravidlo však nelze uplatnit u složitějších mechanismů. Například u eroze pevných částic je odolnost závislá spíše na tažnosti materiálu. U kavitace je zase důležitá absorpce rázu bez následného vzniku mikrotrhlin. Vliv objemová frakce karbidů je zde zanedbatelný a důraz je kladen na vlastnosti matrice.
- Adhezivní – nejčastější druh opotřebení v případě uložení kov-kov. K deformaci dochází např. při kluzném kontaktu dvou ploch. Následkem toho jsou narušovány povrchové vrstvy materiálu. Vzniká u součástí, u kterých není možné použití maziva nebo je místo pro mazivo špatně dostupné. Tento proces je doprovázen několika fázemi. V první fázi dochází ke vzniku obrovského množství tepla, se kterým úměrně roste i vrstva oxidu. Nerovnosti této vrstvy jsou při opakovaném styku oddělovány

a později dochází k jejich úplnému rozpadu. Kontaktní plochy jsou následně ve styku kov-kov a dochází ke vzniku mikrospojů za studena, které mohou vést až k úplnému zadření mechanismu. Výskyt opotřebení tohoto druhu lze pozorovat např. u čepu, pístu, kluzných ložisek, u kterých může dojít až k zadření. Jelikož nejsou příliš jasné příčiny vazebných sil při vzniku mikrospojů za studena, je největší důraz kladen na oxidycké chování materiálu (nejmenší nárůst s velkou odolností proti deformaci). Pro tento typ opotřebení jsou vhodné kompozice s dispergovanými karbidy v měkčí matrici.

Volba slitiny v závislosti na druhu opotřebení v jednotlivých průmyslových oblastech je uvedena v tab. 2.

Tab. 2 Volba slitiny v jednotlivých průmyslových oblastech. [4]

Automobilový průmysl		
Ventilová sedla	6	Eroze pevných částic, horká koroze
Energetický průmysl		
Sedací plochy regulačních ventilů	6, 21	Kluzné opotřebení, kavitace
Erozní štíty parních turbín	6B	Eroze pevných částic/ kapek kapaliny
Chemický průmysl		
Šnek vstřikovacího lisu	1, 6, 12	Kluzné opotřebení, abraze
Těsnící kroužky čerpadla	6, 12	Kluzné opotřebení

Všestranné vlastnosti Stelitu 6 řadí tento typ mezi nejrozšířeněji využívaný a je považován za průmyslový standard. Odolává různým druhům mechanické a chemické degradace při vysokých teplotách. Bez výrazné ztráty tvrdosti může být využívána až do teploty 500 °C. Dle způsobu výroby a chemického složení může být označována 6B a 6K. Jedná se o kované verze rozšířené o množství C. Tímto způsobem výroby je zvýšená chemická homogenita a modifikace geometrie karbidů. Následkem je nárůst odolnosti proti otěru a korozi. Převládajícím typem karbidů je M_7C_3 , který je bohatý na chrom. I přes četný výskyt karbidu neztrácí obrobiteľnost. Primární mechanismus koroze je bodový stejně jako u korozivzdorných ocelí. K narušení povrchu dochází jenom lokálně a ostatní povrch zůstává nedotčený. Přibližná roční ztráta povrchu v mořské vodě při 22 °C je menší než 0,05 mm. Kvůli vysoké cenové relaci jsou častěji využívány jako povrchová úprava. U komponentů náchylných např. na tečení je volena výroba přímo z kovaných slitin. Mimo aplikace obsažené v tabulce 2. se může dále nacházet u nožů, škrabek pro chemický, potravinářský a textilní průmysl. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Chemické složení a mechanické vlastnosti Stelitu 6. [16]

Chemické složení [%]	Co	Cr	W	C	Ostatní
	Bal.	28	4,5	1,2	Fe, Ni, Mo, Mn, Si
Mechanické vlastnosti	Tvrdost HRC		Mez pevnosti [MPa]		Teplota tání [°C]
	36–45		790		~ 1285–1410

Další četně využívanou slitinou je Stelit 12. Může být považována za přechodovou slitinu mezi Stelitem 1 a 6. Oproti výše zmíněné slitině má zvýšenou odolnost proti otěru a kluznému opotřebení bez ztráty kavitace odolnosti. Obsahuje větší množství tvrdých karbidů a legujícího wolframu. To umožňuje použití slitiny při teplotách až do 700 °C. Slitina je používána samostatně nebo proti slitinám 1, 3, 6. V této kombinaci nedochází k výraznému

adhezivnímu opotřebení. Mimo chemického průmyslu je dále využíván jako povrchová úprava průmyslových nožů pro řezání koberců, plastů a syntetických vláken. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4 Chemické složení a mechanické vlastnosti stelitu 12. [17]

Chemické složení [%]	Co	Cr	W	C	Ostatní
	Bal.	29	8,5	1,8	Fe, Ni, Mo, Mn, Si
Mechanické vlastnosti	Tvrdost HRC		Mez pevnosti [MPa]		Teplota tání [°C]
	46–51		740		~1200–1365

2.2 Korozivzdorné slitiny [1], [4], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26]

Všechny kobaltové slitiny lze považovat za korozivzdorné. Jejich míra odolnosti je však omezena pouze na určitá media a aplikační prostředí. Otěruvzdorné slitiny jsou ovlivněny srážením karbidů na hranicích zrn a legujícími prvky v matici. Dalšími aspekty mohou být chemické segregace litých a povrchově upravovaných materiálů. U kovaných žáruvzdorných slitin je odolnost vyšší kvůli větším přídavkům wolframu a homogenní mikrostruktura. Z hlediska korozního výkonu jsou oba typy nedostačující ve srovnání se slitinami Ni-Cr-Mo báze. Jelikož kobalt má nižší celkovou korozní odolnost než nikl. Studie zkoumající tvorbu pasivační vrstvy u binárních slitin Co-Cr a Ni-Cr ukázala, že pro snížení anodického proudu u kobaltových slitin stačí koncentrace 10 % Cr a to z 500 na 1 mA·cm⁻². Kdežto u niklové báze je pro dosažení stejné hustoty nutné 14 % Cr.

Pro průmyslové potřeby, které zahrnují odolnost proti vodní korozi bez ztráty odolnosti vůči různým mechanismům opotřebení při aplikacích za vysokých teplot, byly vyvinuty slitiny Co-Ni-Cr-Mo báze. V některých případech může být upřednostňován místo Mo přídavek W. Přidáním prvků do Co-Cr báze došlo k rozšíření odolnosti vůči korozi způsobené kapalinami, minerálními kyselinami a popraskání korozním napětím (SCC). U tohoto typu je nutné brát velký ohled na obsah C. V případě vysokého obsahu by mohlo docházet ke ztrátě korozní odolnosti během svařování. Jelikož by docházelo ke tvorbě karbidů bohatých na chrom.

Tento druh slitin je široce využíván pro výrobu chirurgických implantátů např. náhrady kyčlí/kolen a implantáty fixující zlomeniny (obr. 7). Velké množství těchto využívaných slitin splňuje požadavky dle amerických norem ASTM F 75, F 799, F 90 a F 562. Označení ASTM vychází z názvu American Society for testing and Materials. F 75 a F 799 určuje požadavky na lité a tepelně zpracované Co-Cr-Mo. F 90 je určeno pro kované báze Co-Cr-W-Ni a F562 kované báze Co-Ni-Cr-Mo. Požadavky na tyto materiály jsou biokompatibilita, korozivzdornost, odolnost proti opotřebení a mechanické vlastnosti (pevnost, tažnost a únavové chování při opakujících se cyklech).



Obr. 7 Implantát fixující zlomeninu. [22]

Do této oblasti spadá nízkouhlíková slitina (0,06 hm. % C) Ultimet, která neobsahuje žádné intragranulární fáze nebo srážení karbidů na hranicích zrn. Ve struktuře je patrná pouze řídká disperze nitridů, která výrazně neovlivňuje korozivzdornost ani křehkost materiálu. Byla navržena pro řešení chronických problémů souvisejících s předčasnou degradací materiálu vlivem kombinace účinků koroze a opotřebení. Mezi přednosti slitiny patří odolnost vůči lokální korozi, agresivním prostředí a různým mechanismům opotřebení (eroze kalu, kavitace, zadírání). K dostání je jak v běžných formách hutních polotovaru, tak v podobě drátu, elektrod určených pro povrchové úpravy. Při tvorbě ochranných návarů není náchylná na tvorbu prasklin. Lze nanášet více vrstev bez nutnosti přehřevu, což je výhodou oproti běžným slitinám kobaltové báze. Odolnost proti různým mechanismům opotřebení odolává srovnatelně jako STELIT, kdežto u korozní odolnosti jako HASTELLOY. Hodnota pevnosti v tahu se příliš neliší od duplexních korozivzdorných ocelí. Konkrétní použití zahrnuje šrouby, lopatky ventilátorů, extrudéry a ventilové komponenty vyžadující kombinaci odolnosti proti opotřebení/korozi a vysoké pevnosti v tahu. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5 Chemické složení a mechanické vlastnosti Ultimet. [24]

Chemické složení [%]	Co	Cr	Mo	Ni	Fe/W	Ostatní
	Bal.	26	5	9	3/2	Mn, N, Si
Mechanické vlastnosti	Tvrdost HRC		Mez pevnosti [MPa]		Teplota tání [°C]	
	~30		1020		~1400	

Vícefázové slitiny jsou označovány zkratkou MP, vycházející z anglického „multiphase“. Označení vzešlo z tuhé fázové transformace části matrice z krystalové struktury fcc na hcp při zpracování za studena vlivem vysokého obsahu kobaltu. Odlišné krystalové struktury zamezují pohybu dislokací a dochází k posílení tuhého roztoku. Pro stabilizaci obou struktur poté nastává proces vytvrzení stárnutím. Určité druhy jako MP35N a MP159 jsou vyráběny vakuovými indukčním tavením následovaným přetavením vakuovým obloukem, pro zajištění optimální kontroly chemického složení a vhodného tuhnutí ingotu. Proces stárnutí je umělý a probíhá 4 h za zvýšené teploty v rozsahu 430–650 °C. Slitiny kombinují extrémně vysokou pevnost, tažnost a odolnost proti korozi. MP35N se vyznačuje vynikající odolností např. proti minerálním kyselinám (dusičné, chlorovodíková, sírová) a mořské vodě. Vzdoruje různým mechanismům koroze jako korozní praskání (SCC) a lokální korozi (štěrbinová, důlková). Může být vystavena maximální provozní teplotě pouze do 400 °C. Vysoká mez pevnosti materiálu, která je uvedena v tab. 6 spolu s chemickým složením, umožnila povolení použití pro konstrukční komponenty v agresivním kyselém prostředí obsahující H₂S. Povolení vydala Národní asociace korozních inženýrů pod označením NACE MR0175 pro ropný a plynárenský průmysl. Používají se při výrobě spojovacích prostředků aplikovaných např. v leteckém, lékařském a ropném průmyslu.

Tab. 6 Chemické složení a mechanické vlastnosti MP35N. [4], [26]

Chemické složení [%]	Co	Cr	Mo	Ni	Fe, Ti	Ostatní
	35	20	9,75	35	<1	C, Mn, Si
Mechanické vlastnosti	Tvrdost HRC		Mez pevnosti [MPa]		Teplota tání [°C]	
	40–51		2070		~1320–1440	

2.3 Žárovzdorné slitiny [1], [4], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34]

Ve srovnání s výše uvedenými aplikacemi jsou tyto kompozice používané velmi zřídka. V žárovzdorných aplikacích jsou nahrazovány niklovými slitinami, kde je kobalt používán pouze jako legující prvek. Množství legury se pohybuje v rozmezí 10–15 %. Důvodem použití je posílení tuhého roztoku a snížení rozpustnosti některých prvků (Al, Ti). Následkem je zvýšena tvorba primární fáze γ' (Ni_3Al), která má vliv na pevnost slitiny za vysokých teplot a odolnost proti tečení.

Určité průmyslové oblasti však jejich použití stále vyžadují a je nemožné jejich aplikace nahradit niklovými slitinami. To je dáno především jejich odolností proti sulfidaci a zachování pevnosti při vysokých teplotách, při kterých u niklových slitin dochází k rozpuštění γ' . S neustálým vývojem slitin docházelo k přesunu již používaných slitin do otěruvzdorných slitin, jelikož pro žárovzdorné aplikace byly již nedostačující např. Stelit 21. Dnes chemický obsah slitin odpovídá častějšímu obsahu wolframu než molybdenu, mírnému obsahu chromu a niklu, nízkého obsahu uhlíku a přidavkem vzácných kovů (hliník, titan, nikl...).

Dříve byl hlavním odběratelem slitin průmysl pro výrobu plynových turbín jak pro motory letadel (obr. 8), tak pro turbíny určených do elektráren. Materiálové požadavky leteckého průmyslu byly zachování pevnosti při zvýšené teplotě, odolnosti proti tepelné únavě a oxidaci. U energetického průmyslu spalujícího paliva nižší třídy byla velkým problémem sulfidace.



Obr. 8 Proudový motor. [27]

Stelit 25 je konkrétním využívaným typem slitiny dodnes. Dle výrobce nebo dodávaného polotovaru může nést různé druhy obchodních názvu jako L605 nebo Hayness 25. Je vhodná pro aplikace, které vyžadují střední pevnost a dobrou odolnost proti oxidaci a spalinám za vysokých teplot. V nepřetržitých provozech může být slitina používána do teploty 980 °C. Při určitých podmínkách odolává kyselině dusičné a chlorovodíkové. Při zahřívání kovu dochází k tvorbě oxidového filmu, zamezuje opotřebení při styku kov-kov. Pro kované slitiny se teplotní rozsah použití liší. To je rozdělováno na přetržitý a nepřetržitý provoz. Pevnost v obou případech zůstává neměnná a vytrvává až do teploty 816 °C. Oxidační odolnost je však rozdílná. U přetržitého provozu výrobci garantují odolnost do teploty 871 °C, kdežto u nepřetržitého až 1090 °C. Chemickým složením jsou specifické nízkým obsahem uhlíku, který zaručuje potřebnou frakci karbidů bez ztráty tvárnosti. Převážně se zde vyskytují

karbidy M_6C , které jsou důležité pro udržení vysokoteplotních vlastností. Dále se zde vyskytuje velké množství niklu pro snížení teploty transformace. Poměrně vysoký obsah chromu zajišťuje široký rozsah korozní odolnosti. To umožňuje použití v leteckém průmyslu pro výrobu komerčních/vojenských tryskových motorů, kde je vyžadována odolnost proti žíravým atmosférám. V moderních motorech se nahrazuje typem Hayness 188. Chemické složení

a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Chemické složení a mechanické vlastnosti Stelitu 25. [30]

Chemické složení [%]	Co	Cr	W	Ni	C	Ostatní
	Bal.	20	15	10	0,1	Fe, Mo, Mn, Si
Mechanické vlastnosti	Tvrdost HRC		Mez pevnosti [MPa]		Teplota tání [°C]	
	20–45		925		~ 1330–1410	

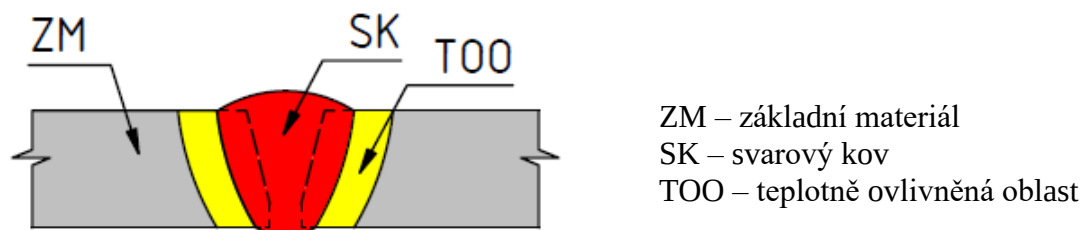
Hayness 188 má oproti výše uvedené slitině vyšší rozsah použití. Byla speciálně navržena pro aplikace z polotovaru plechu a je tedy dobře tvářitelná i za studena. Vykazuje vynikající odolnost proti oxidaci bez výrazné ztráty pevnosti až do teploty 1150 °C. Navýšení teplotní škály umožnil zejména přídavek lanthanu (0,02–0,12 hm. %). Ten modifikoval ochrannou vrstvu oxidu, u které došlo ke zpevnění a zamezení difuze. Ve struktuře materiálu se nacházejí karbidy typu M_6C_3 a $M_{23}C_6$. Také odolává horké korozi, což je urychlená forma oxidace při styku se spaliny za vysoké teploty. Oproti slitinám zpevněných tuhým roztokem na bázi Ni, Ni-Cr, Fe-Ni-Cr má mnohem vyšší pevnost a odolnost proti tečení. Může být tedy použita menší tloušťka materiálu bez ztráty mechanických vlastností, a tím docílit menší hmotnosti. V nepřetržitých provozech dosahuje vysoké účinnosti od teploty 650 °C a více. Díky souhrnu těchto vlastností splňuje materiálové požadavky pro použití v leteckém, chemickém a jaderném průmyslu. Mezi typické aplikace v leteckém průmyslu patří komponenty proudových motorů (spalovací komory, potrubí...). Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 Chemické složení a mechanické vlastnosti Hayness 188. [4], [34]

Chemické složení [%]	Co	Cr	W	Ni	C	Ostatní
	Bal.	22	14	22	0,1	Fe, Mn, Si, La, B
Mechanické vlastnosti	Tvrdost HRC		Mez pevnosti [MPa]		Teplota tání °C	
	~30		1045		~ 1320–1410	

3 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ [1], [35]

Může být používána za účelem nerozebíratelného spojení nebo povrchové úpravy. V obou případech dochází k lokálnímu soustředění množství energie a následným ohřevem materiálu až na teplotu tavení. Tím jsou vytvořeny meziatomové vazby jak mezi spojovanými díly, tak základním a přídavným materiálem. Celý proces lze charakterizovat souhrnem metalurgických pochodů v malém objemu materiálu. Dle druhu dodávané energie se technologie rozděluje na tavné a třecí svařování. Veškeré kobaltové slitiny jsou zhotovovány metodami tavného svařování. Spojení je tedy docíleno soustředěním přímo tepelné energie. Z použitého tepelného zdroje (plyn, záření, výboj) vychází typ metody. Jelikož má každý materiál různé chemické složení a fyzikální vlastnosti, nelze jednou technologií docílit dokonalého vytvoření vazeb u všech kompozic. Největším aspektem při posuzování vhodné metody je právě množství a rozsah vneseného tepla do základního materiálu s ohledem na prostředí vzniku svarového spoje, jehož schéma znázorňuje obr. 9.



Obr. 9 Schéma svarového spoje. [35]

S lokálním soustředěním tepelné energie prudce narůstá teplota, s kterou souvisí tzv. tepelná deformace. Vnesené teplo musí být větší než teplota tavení materiálu z důvodu dostatečného promísení kovů a vzniku spoje. Slitiny jsou legovány rozdílnými prvky, které mají různou teplotu tavení. Určité množství legur se tedy může odpařit a tím snížit odolnost vůči některým vlivům. Při chladnutí teplota exponenciálně klesá od osy svaru a mění se po celé délce. Základní materiál tak je nerovnoměrně teplotně namáhán a dochází ke vzniku vnitřních pnutí a deformací. Proces je tak doprovázen změnou mechanických a chemických vlastností. Degradaci nelze zcela zamezit ale její přípustná míra je posuzována na základě svařitelnosti materiálu, která je definována jako souhrnná charakteristika vyjadřující vhodnost kovu pro zhotovení všestranného spolehlivého spojení s požadovanými mechanickými a chemickými vlastnostmi. Z hlediska několika aspektů na základě se dělí na:

- Metalurgická svařitelnost – posuzuje chemické složení, způsob výroby a tepelné zpracování základního materiálu. V případě použití přídavného materiálu za účelem vytvoření spojení je volen co nejblíže podobný chemickému složení základnímu materiálu.
- Konstrukční svařitelnost – jednoduchým konstrukčním návrhem může být docíleno snadné zhotovení konstrukce bez vnitřních pnutí a deformací. S větší tloušťkou zvoleného materiálu je snižován odvod tepla a ochlazení není tak kritické. Důležité je umístění svarových spojů z hlediska způsobu namáhání. Obvykle se zamezuje spojení v rozích s ostrými uhly a vrubech, kde bývá namáhání největší. Na základě typu zvoleného svaru jsou jednotlivé díly upravovány.
- Technologická svařitelnost – nejvíce ovlivnitelný druh, který spojuje výše uvedené. Má vliv na výsledný vizuální vzhled a spolehlivost spojení. Zde je zahrnuta volba svařovací metody, technologického postupu a druh přídavného materiálu. Svařovacím postupem lze regulovat vnesené teplo např. přerušovaným svařováním, kterým zamezíme vznik vnitřního pnutí a deformací. Tento postup je např. aplikován u tenkých plechu, kde dochází k rychlému odvodu tepla. U větších konstrukcí

obsahující zpevňující žebra je důležitý i sled a umístění svařovacích housenek. Při spojování součástí je přídatný materiál volen co nejbližše chemickému složení základního materiálu.

3.1 Konvenční metody [1], [36], [37], [38]

Obecně se jedná o jedny z prvních používaných metod, které jsou založené na základních fyzikálních a chemických principech. Tyto metody byly vyvinuty přibližně koncem 19. století s příchodem nových technologií pro generování dostatečného množství tepla. Nové technologie umožňovaly jak bezpečné skladování a kombinaci plynů pro podporu hoření, tak dostatečný zdroj elektrického proudu pro odporové a obloukové svařování. Nárůst intenzity zdroje umožnil soustředění tepla do jednoho místa a nedocházelo tak k většímu odvodu do okolního kovu. V soustředěném místě vznikla roztavená směs a došlo ke spojení dvou součástí.

Z hlediska kobaltových slitin se za účelem spojení a úpravy povrchové vrstvy využívá generace tepla pomocí elektrického oblouku. Funguje na základě elektrického výboje hořícího v prostředí ionizovaného plynu. Celý proces začíná zapálením elektrického oblouku a je možné jej provést několika způsoby. Klíčovým u všech je katodová skvrna, která termickou emisí uvolňuje elektrony. Uvolněné elektrony s velkou kinetickou energií, kterou získaly díky úbytku katodového napětí, narážejí do neutrálních atomů okolního plynu. Ty se rozpadají na kladné ionty a sekundární elektrony (proces ionizace). Sekundární ionty jsou neutralizovány a odváděny anodovou skvrnou. Vytvořeným ionizovaným prostředím je umožněno vedení proudu. Využívanými metodami jsou (názvy uváděny evropskými zkratkami dle EN ISO 4063, v závorce uvedeno jejich číselné značení):

- TIG (141) – označení vychází z anglického *Tungsten Inert Gas*. Jedná se o svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu a je zařazena mezi technologie obloukového svařování v ochranných atmosférách. Využívá principu hořícího oblouku mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Přičemž elektroda nepřichází vůbec do kontaktu se svarovou lázní ani při zapálení oblouku. V případném styku elektrody se svarovou lázní dojde k zalepení elektrody a je nutné její broušení. Při svařování lze použít přídatný materiál pro lepší výplň svarové spáry nebo navaření povrchové vrstvy. Může být dodáván ručně nebo automaticky. Mezi využívané inertní plyny jako ochranné atmosféry patří helium, argon nebo jejich směsi, které musí dosahovat vysoké čistoty (min. 99,995 %). Z ekonomického hlediska se pro běžné aplikace častěji využívá argon. Helium se uplatňuje pro náročnější aplikace (letecký, jaderný průmysl). Svařovací parametry jako velikost přiváděného proudu, tloušťka elektrody/přídatného materiálu, průtok plynu jsou voleny na základě druhu materiálu a jeho tloušťky. Typ přiváděného proudu je posuzován dle náchylnosti na tvorbu vrstvy oxidu. Jelikož kobaltové slitiny tuto vrstvu netvoří je volen spíše stejnosměrný proud.
- MIG (131) - označení vychází z anglického *Metal Inert Gas* a stejně jako předchozí metoda spadá do obloukového svařování v ochranných atmosférách. Při této metodě je tavící se elektroda ve formě drátu kontinuálně dodává do místa svaru v ochranné atmosféře inertního plynu. Z důvodu co nejmenší elektrické zatíženosti délky drátu se elektrický proud přivádí třecím kontaktem v ústí hořáku. Kontinuální dodávání drátu zajišťují podávací kladky, které jsou umístěny v podavači nebo kombinaci systému hořák – kladka. Drát je do podavače umístěn ve formě navinutí na drátěné či plastové cívce, jejíž celková hmotnost se pohybuje okolo 15 kg. Svařovací parametry jsou voleny na základě tloušťky použitého drátu, od kterého se odvíjí proud, napětí, průtok plynu a rychlost podávání drátu. Při změně průměru drátu je nutné upravit i mechanismus podávání, jelikož např. kladky, vodítko (bowden), kontaktní průvlak

(špička) jsou navrhovány na daný typ. Modernější stroje jsou vybaveny automatickým režimem svařovacích parametrů, stačí zadat pouze druh a tloušťku základního materiálu. Používanými inertními plyny jsou opět Ar, He a Ar + He₂. Přibližná vzdálenost mezi kontaktním průvlakem a základním materiálem je desetinásobek průměru drátu.

- MMA (111) – ruční obloukové svařování obalovanou elektrodou, anglicky označována jako *Manual Metal Arc* patří mezi průlomové metody svařování. Jednoduchost metody, a s tím související ochrana svarového kovu, spočívá právě v typu elektrody. Skládá se z jádra (drátu) a tavného obalu, který má největší vliv na kvalitu spoje. Obal obsahuje plynotvorné látky pro ochranu SK před účinky atmosféry (celulóza), prvky pro usnadnění zapalování a stabilizaci hoření oblouku (sodík, draslík...), struskotvorné přísady ovlivňující metalurgické pochody při tavení a chladnutí (magnezit, křemičitany), legující a rafinační prvky (feromangan, ferochrom...). Dle chemického složení a vlastností je rozlišováno více druhů obalu elektrod např. kyselý, bazický, rutilový atd. V přímém procesu svařování se odtavuje souměrně jádro i s obalem a přechází pomocí elektrického oblouku do roztavené lázně základního materiálu. Ve svarové lázni dojde ke smíšení kovového jádra elektrody se základním materiálem a vytvoření spoje, který je přikryt struskou. Během celého procesu je SK a odtavované jádro chráněno ochranou atmosférou plynotvorných látek obsažené v obalu.

Na obr. 10 jsou zobrazeny formy vyráběného svářecího sortimentu využívaných výše zmíněnými metodami spolu s práškem určeným pouze pro povrchovou úpravu žárovými nástríky.



Obr. 10 Formy vyráběného svářecího sortimentu pro kobaltové slitiny. [37]

3.2 Nekonvenční metody [1], [36], [37], [38], [39], [40]

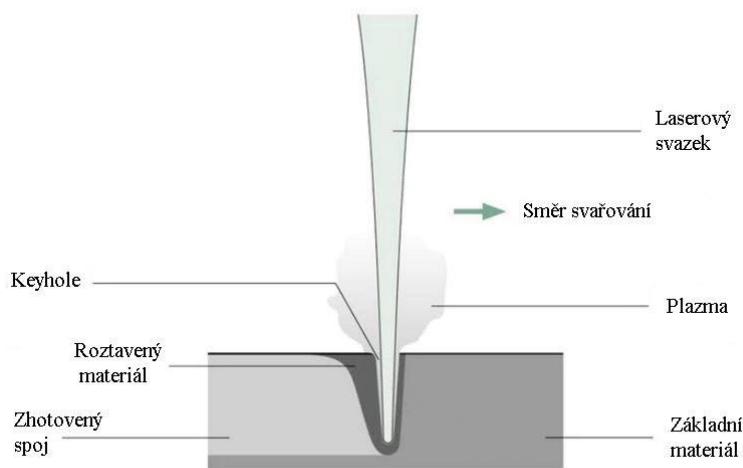
V důsledku rozvoje materiálů a náročnosti konstrukcí rostou nároky na co nejmenší ovlivnění materiálu použitou technologií. Tyto aplikace zahrnují např. jadernou techniku a letecký průmysl. Příchod nových technologií umožňuje vyšší rychlosti ohřevu a svařování. Množství vnesené tepelné energie na jednotkovou délku svaru již není tak rozsáhlé a celkové změny vlastností materiálu nižší. Díky kvalitnímu vizuálnímu vzhledu a minimální tepelné deformaci povrch pro některé aplikace nemusí být dále upravován.

Všechny nekonvenční metody jsou charakteristické tvorbou úzké dutiny ve tvaru kapiláry, která je anglicky označována *key hole*. Ta vzniká soustředěním energie vyšší než $10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,

při které dosahuje materiál teploty varu. Vzniklé výpary kovů vyvolávají tlak na taveninu a dochází ke tvorbě dutiny, která je vyplněná právě unikajícími plyny. Natavený materiál vlivem povrchového napětí obklopuje kapiláru a nedochází k jeho úniku. Při pohybu energetického svazku se tavenina přemísť za soustředěný svazek, kde dochází k následnému tuhnutí. Na základě těchto vlastností tak nemusí být použit přídavný materiál a spojení je docíleno pouze natavením dvou spojovaných součástí. Princip procesu znázorňuje obr. 11. Jednotlivé svařovací technologie jsou rozdělovány na základě použitého energetického zdroje na (v závorce jsou uvedeny číselná značení dle EN ISO 4063):

- Svařování laserem (52) – tepelné energie vzniká zvýšením vibrační frekvence mřížky základního materiálu laserovým svazkem. Samotný vznik svazku vychází z anglického označení pro zesílení světla stimulovanou emisí záření *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Principem je nekonečný proces absorpce fotonu elektronem, čímž získáme požadovaný směr letícího fotonu o stejné vlnové délce. Při pohlcení fotonu elektronem, dochází k přechodu elektronu na vyšší energetickou hladinu. Tento jev se označuje jako excitovaný stav, po kterém nastává samovolný přechod na základní hladinu (spontánní emisní záření) a následné opětovné uvolnění fotonu. Foton se však stále šíří nežádoucím neusměrněným směrem. V případě nárazu fotonu do elektronu nacházejícího v excitovaném stavu, dojde k přechodu na základní energetickou hladinu a k vyzaření obou fotonů o stejné vlnové délce stejným směrem (stimulovaná emise záření). Tím je zesíleno záření laserového svazku na požadovanou úroveň. V samotném procesu svařování při uniku par z kapiláry dochází k jejich ionizaci a vzniku plazmy. Ta omezuje hloubku průvaru, jelikož brání kontaktu fotonů se základním materiálem. Z toho důvodu je používán ofukový plyn (Ar, Ar + CO₂, N₂, He), který vychyluje plazmu a zároveň chrání svarovou lázeň. Částečně může být omezena i svařovacími parametry. Hloubka průvaru závisí výkonu zdroje, vodivosti materiálu a frekvenci zdroje. Část fotonu při dopadu na povrch základního materiálu je odražena. U reflexních materiálů dochází k většímu odrazu.
- Svařování svazkem elektronů (51) – je založené na přeměně kinetické energie rychle letících elektronů na tepelnou při kontaktu se základním materiálem. Celý proces z důvodu volného pohybu elektronů probíhá ve vakuu. To zamezuje střet elektronů s molekulami vzduchu, po kterém by došlo k jejich zpomalení a vychýlení z dráhy. Zdroj elektronů se označuje jako elektronové dělo, které se zjednodušeně skládá z žhavené katody, wehneltovi clony a anody. Žhavená katoda uvolňuje termoemisi elektrony, které jsou odtaženy wehneltovou clonou. Odtažené elektrony jsou urychlovány napětím mezi katodou a anodou. Z důvodu působení odpuzivých sil mezi záporně nabitými elektrony svazek prochází přes magnetické pole, kterým je fokusován do místa dopadu. Pro přesné zaměření místa svaru je používán vychylovací systém. Část dopadajících elektronů je odražena od základního materiálu a využito je pouze cca 30 %. Elektrony pronikají pod povrch materiálu a dochází k rozkmitání atomové mřížky kovu vibračním přenosem. Postupným předáváním kinetické energie atomům mřížky dochází k přeměně na tepelnou. Jelikož při kontaktu dopadajících elektronů s povrchem základního materiálu vzniká RTG záření, musí být svařovací komora dostatečně chráněna.
- Svařování plazmou (15) – základem metody je ionizace plynu při průchodu elektrickým obloukem. Při použití dvouatomových plynů je nutné molekuly rozložit na jednotlivé atomy, tento proces se označuje jako disociace plynu. Od použitého plynu se odráží i samotná teplota ionizace a disociace. Z důvodu zamezení kontaktu plazmy s hořákem probíhá ionizace pouze částečně. Plyn, který neprošel přeměnou, dosahuje nižší teploty a plazmový paprsek tak může usměrnit. Používané plyny (N,

Ar, H₂, He) jsou dle účelu rozdělovány na plazmový, fokusační a ochranný plyn svarové lázně. I přes pouhou částečnou ionizaci je proces doprovázen vysokými teplotami a tryska musí být chlazená (vodou, plynem). V případě použití argonu přeměna probíhá za teploty 16 000 K. Samotný princip technologie je odvozený z konvenční metody TIG (141) a elektrický proud prochází přes netavící se wolframovou elektrodu. Dle účelu aplikace se elektrické zapojení rozděluje na závislé a nezávislé. Pro svařování a navařování používáme zapojení závislé. Záporný pól je připojen na wolframovou elektrodu a kladný na základní materiál. Zapálení oblouku probíhá pomocí VF ionizátoru připojeného ke kovové trysce, od kterého je zapálen pomocný a následně hlavní elektrický oblouk.



Obr. 11 Schéma tvorby key hole u svařování laserem. [40]

3.3 Hybridní metody [41], [36], [38], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49]

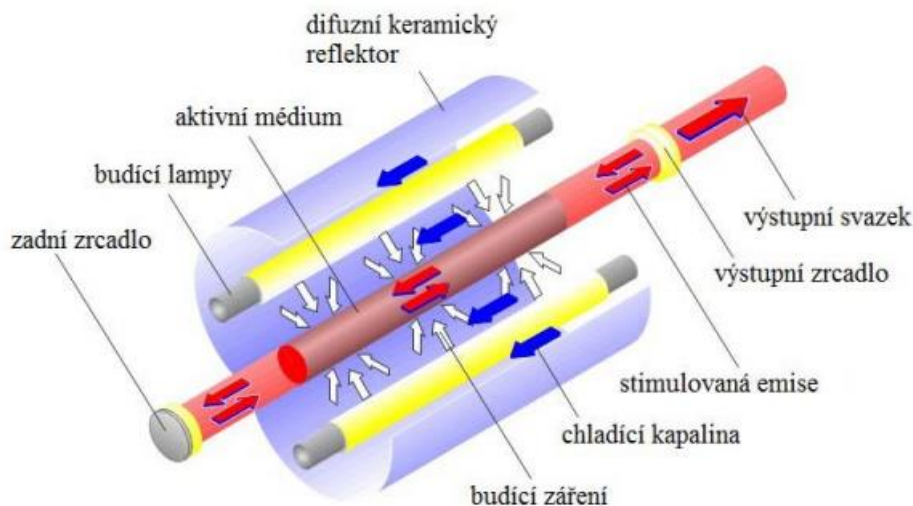
První návrh hybridního svařování byl představen v 70. letech. Jedná se o kombinaci konvenčních a nekonvenčních metod. Přesněji jde o kombinaci laserové metody s obloukovým svařováním metodami TIG, MIG/MAG. Již první výzkumy ukázaly možnosti kompenzace nevýhod použitím obou metod zároveň. Přednosti laserového svazku jako vysoká kvalita spojení, přesnost, rychlost, výkon atd., zůstávají vždy zachovány a nevýhody této technologie kompenzujeme volbou druhé.

Příkladem může být samostatné svařování laserovým svazkem, kde je pro hluboký průvar a vysoké svařovací rychlosti nutnost zaostření svazku do malého průměru. Tím však spojované díly musí dosahovat malé tolerance šířky mezery. Použitím elektrického oblouku jako další zdroj tepelné energie je možné tuto toleranci zvětšit. Další nevýhodou je obtížné natavování materiálu s vysokou tepelnou vodivostí, reflexním povrchem a porézností ve svarovém kovu. Touto modifikací tak lze docílit svařitelnosti materiálů nebo vytvoření spojů, které tímto způsobem za běžných podmínek nejsou proveditelné.

Používané lasery je možné dělit do více druhů dle skupenství aktivního prostředí, vlnové délky, buzení, režimu práce, použití v průmyslu, výkonu atd. Mezi nejčastěji používané lasery v průmyslu za účelem svaření materiálu jsou používány:

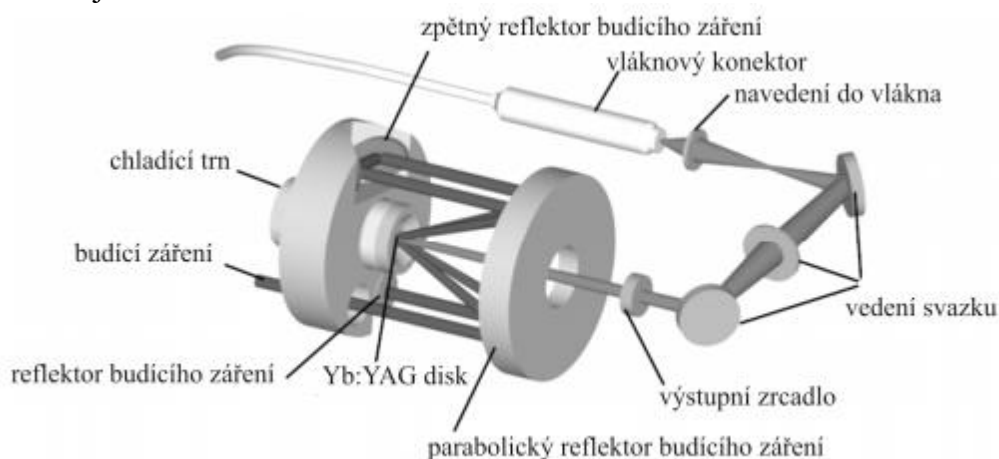
- Nd:YAG – patří do oblasti pevnolátkových laserů. Zařazení se odvíjí od typu aktivního prostředí, které je v tomto případě Y₃Al₅O₁₂. Ten je nejběžněji dopován ionty Nd³⁺, ale může být použito i Er³⁺, Yb³⁺ atd. Konstrukce tohoto typu laserů je tvořeno výbrusem aktivního materiálu a buzení je zajištěno vyzařováním pomocí kryptonových výbojek (LPSS) nebo polovodičových laserových diod (DPSS). Kvalita výstupního paprsku je nepřímo úměrná výkonu a ve srovnání s plynovými CO₂ lasery je podstatně nižší. Dosažená účinnost tohoto typu je udávána 6 kW.

V důsledku kratší vlnové délky, lze však dosáhnout stejného zaostření. S tím souvisí možnost přenosu laserového svazku optickými vlákny a zaostření běžnými čočkami. Dále zvýšení vstřebatelnosti fotonů při kontaktu s materiálem. Díky tomu již nedochází k výraznému zamezení průchodu fotonů přes vznikající plazmu z výparu kovů a není třeba využívat nákladné He. Pro ochranu svarového kovu je nejčastěji využíván Ar. Podrobnější princip laseru znázorňuje obr. 12.



Obr. 12 Schéma principu Nd: YAG laseru. [44]

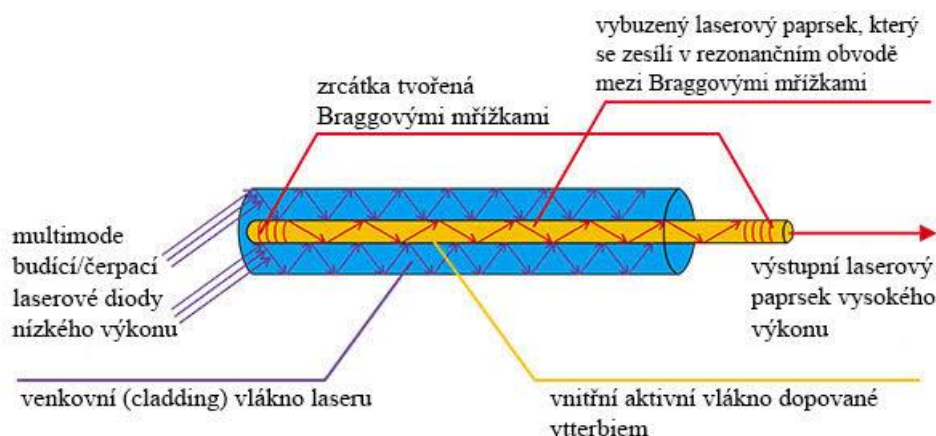
- Diskový – jsou modifikací výše uvedeného Nd: YAG laseru, které pro buzení využívají polovodičových laserových diod. Mezi využívaná aktivní prostředí pro tento typ jsou například Nd: YVO₄ a Yb:YAG. Geometrie tvaru aktivního prostředí je upravena do diskového tvaru. Díky této geometrické úpravě je možné efektivnější chlazení. Tím lze dosáhnout stabilního a kvalitního svazku i při dlouhodobém zatěžování vysokými výkony. Nejvýkonnější lasery dosahují až 32 kW a účinnost se pohybuje v rozmezí 15–20 %. Podrobnější princip laseru znázorňuje obr. 13.



Obr. 13 Schéma principu diskového laseru. [46]

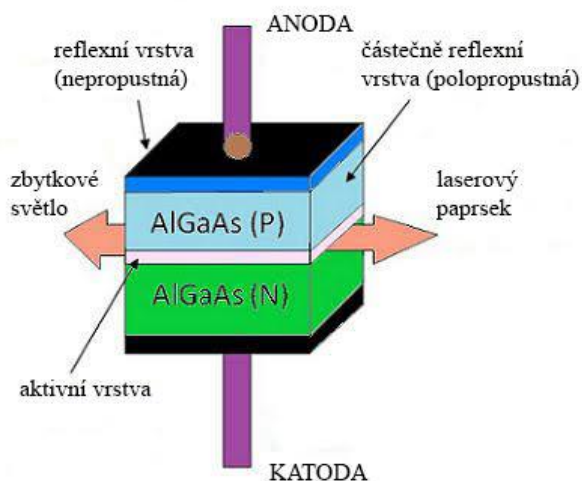
- Vláknový – nejmodernější a zároveň nejvíce odlišný typ pevnolátkového laseru, který je často označován z anglického výrazu pro vlákno *fiber*. Optické vlákno je u tohoto typu využíváno jak pro přenos laserového svazku, tak i pro jeho tvorbu a tvoří tedy aktivní prostředí. Vlákno se skládá z ochranného obalu, budicího vlákna a zesilovacího vlákna. K buzení jsou používány polovodičové diody, které

svítí na zesilovací vlákno umístěné uprostřed. To obsahuje aktivní látky např. Yb a Er. Kvalita výchozího paprsku je přímo úměrná množství budících diod. V laserovém obvodu se dále nachází optický zesilovač, který transformuje světelný signál do účinného paprsku. Vzniklé teplo při excitaci je plošně odváděno a není nutné použití aktivního chlazení. Optické vlákno může dosahovat poměrně dlouhých délek až několika metrů, bez ztráty výkonu. Ten může dosahovat až 50 kW a jejich účinnost až 25 %. Což je výhodou v automatizačních procesech. Životnost laseru je odhadována kolem 150 000 h, což je oproti jiným pevnolátkovým, které se pohybují v rozmezí 10 000–20 000 h značný posun. Podrobnější princip laseru znázorňuje obr. 14.



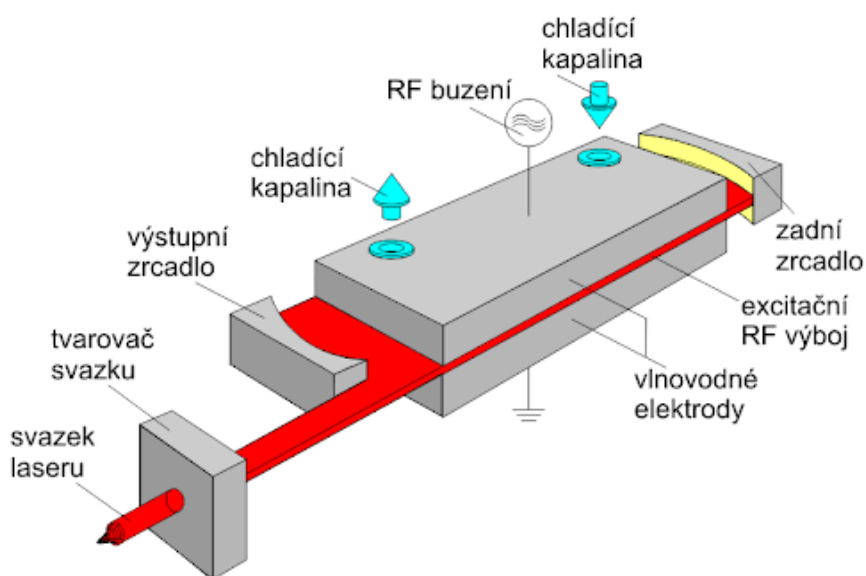
Obr. 14 Schéma principu vláknového laseru. [47]

- Diodový – poslední široce využívaný laser pevnolátkového typu, který jako aktivní prostředí využívá elektricky čerpanou polovodičovou diodu (obr. 15). Konstrukce diody je tvořená dvěma vrstvami polovodičů typu N a P, které jsou tvořeny GaAs dopovaným Se, Al, Si. Mezi těmito vrstvami je vložena aktivní vrstva GaAs. Ta je obklopená reflexními vrstvami sloužícími jako optické reflektory. Základ stimulované emise spočívá v absorpci elektronů aktivní vrstvou pomocí PN přechodu, při kterém jsou uvolňovány fotony. Výkon laserového zdroje je odvíjen od množství obsažených diod, které jsou rovnány do bloků a může dosahovat až 15 kW. Přednostmi tohoto typu jsou účinnost až 60 %, finanční nenáročnost a nastavitelnost vlnové délky. Kvůli špatné kvalitě a rozbíhavosti svazku nelze laser zahrnout do všech aplikací.



Obr. 15 Schéma principu polovodičové diody. [48]

- Plynový CO₂ – nejrozšířenější typ z plynových laserů. Aktivní prostředí je tvořeno skleněnou trubicí, která je naplněná směsí plynů He, N₂, CO₂. Jejich poměr se odvíjí od konstrukce rezonátoru, provozního tlaku a režimu (kontinuální, pulzní). Přechod molekul do excitovaného stavu je prováděn pomocí elektrického výboje v plynné směsi pomocí elektrod, nebo radiofrekvenční. V celém procesu je využíván složitý proces přechodů molekul plynů na různé energetické hladiny. Celá fáze začíná excitací molekuly dusíku, která přechází na vibrační hladinu. Při střetu molekuly N₂ s molekulou CO₂, dochází pomocí rezonančního přenosu energie přechod molekuly CO₂ na vyšší energetickou hladinu. Pro návrat do původní hladiny jsou využívány molekuly He, které odeberou excitační energii a díky vysoké tepelné vodivosti ochlazují aktivní prostředí. Výkon laseru se pohybuje v rozmezí 0,5–20 kW (max. hodnoty až 200 kW) a jeho účinnost je 12–20 %. Dle typu směru proudění aktivního plynu jsou rozdělovány na lasery s podélným a příčným chlazením. Chlazení u starých laserů probíhalo chlazení provozního plynu průchodem přes chladič v nuceném oběhu. S postupným vývojem se zaměřením na úsporu plynu, jsou lasery chlazeny pomocí difuze tepla do měděných deskových elektrod. Tím je zajištěna vysoká tepelná stabilita, nízká spotřeba plynu (dříve složité plynové rozvody), provozní hospodárnost atd. Podrobnější princip laseru znázorňuje obr. 16.



Obr. 16 Schéma CO₂ laseru chlazeného difuzí. [44]

Shrnutí parametrů výše uvedených laserů určených pro svařování je uvedeno v tab. 9. Výběr vhodného typu je odvíjen především od primárního svařovaného materiálu s ohledem na možnosti automatizace. Hlavními aspekty při posuzování vhodnosti jsou výkon, kvalita svazku (hloubka průvaru) a vlnová délka, která omezuje volbu plynu pro potlačení plazmových účinků. To může mít značný vliv na ovlivňování metalurgických pochodů ve svarové lázni u laserů typu CO₂. Ty pro eliminaci plazmy obvykle používají inertní He. Kdežto u ostatních laserů lze použít směsi Ar s aktivními plyny.

S ohledem na aplikaci kobaltových slitin je možné využít pouze kombinaci metod TIG, MIG. U těchto metod se využívají pouze plyny inertní. Volba tak závisí spíše na výkonu a kvalitě laserového svazku.

Tab. 9 Shrnutí průměrných parametrů průmyslově dostupných laserů. [44]

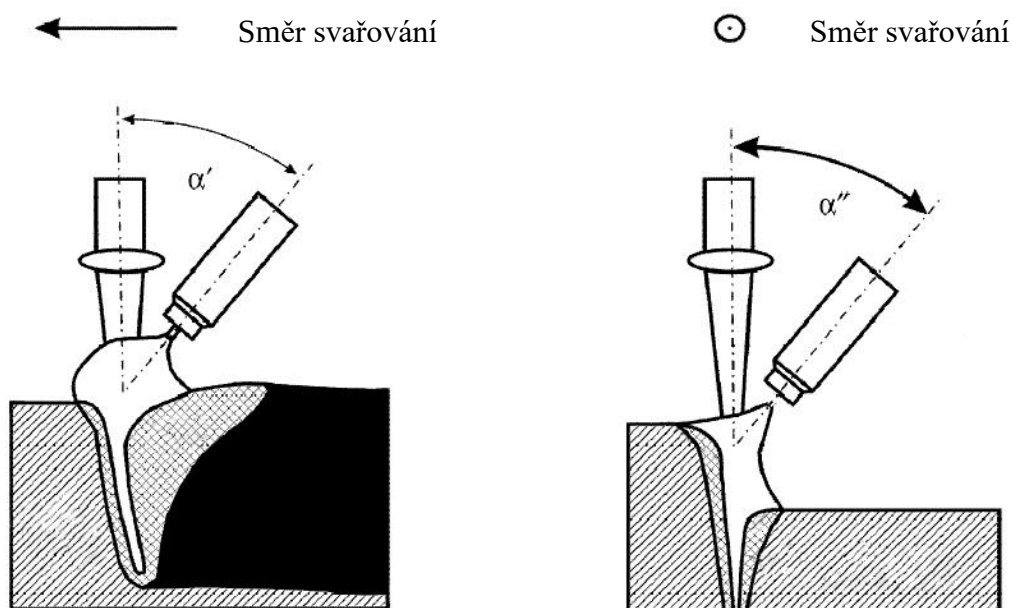
Laser [-]	Nd: YAG	CO ₂	Diskový	Vláknový	Diodový
Vlnová délka[nm]	1064	10 600	1070	1070	808-980
Buzení [-]	LD	RF/El.	LD	LD	El.
Efektivita přeměny energie [%]	~7	~10/~25	~15	~30	~60
Výkon/Energie [kW]	~6	~5/~20	~16	~80	~10
Životnost [h]	10 000	20 000	10 000	100 000	15 000
Údržba [-]	ANO	ANO	ANO	NE	ANO

Název jednotlivých hybridních modifikací je odvíjen od polohy hořáku elektrického oblouku vůči soustředěnému laserovému svazku. V případě umístění hořáku před laserový svazek, je metoda označována jako TIG-Laser a naopak. Na základě vertikální nebo horizontální polohy od svařované osy je zapojení děleno na paralelní a sériové.

Paralelní zapojení je vhodnou variantou při svařování materiálu různých tloušťek, kde je přídavný zdroj nasměrován na materiál s větší tloušťkou. Tím lze docílit hladší přechod a lepší vizuální vzhled. Tepelná energie je šířena nerovnoměrně.

Sériové zapojení je vhodnější z hlediska optimalizaci procesu a regulace rozměrů svaru. V případě metody TIG-Laser je možné docílit předežhřátí a při aplikaci Laser-TIG dohřátí bez nutnosti použití časově náročnějších způsobů svarového kovu. Šíření tepelné energie je u tohoto způsobu rovnoměrné.

Rozdíl mezi sériovým a paralelním zapojením zobrazuje obr. 17.



Obr. 17 Schéma sériového (pravý) a paralelního zapojení (levý). [41]

Intenzita vneseného tepla kromě přímé změny svařovacích parametrů je regulována na základě sklonu a vzdálenosti přídavného hořáku vůči laserovému svazku. Lze tak docílit prodlevy mezi jednotlivými operacemi a rovnoměrného odvodu tepla. Tím je sníženo vnitřní pnutí materiálu a celková teplotní deformace. Na kvalitu finálního spoje má pro paralelní zapojení největší vliv poloha ohniska laserového svazku (regulace sklonem) a u sériového vzdálenost.

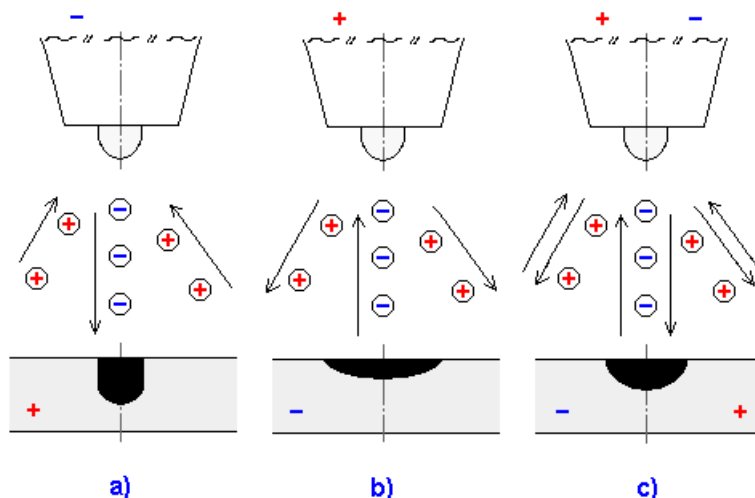
3.3.1 Možnosti zapojení elektrického oblouku metody TIG (141) [48], [50], [51]

Svařování obloukovou metodou je dále rozdělováno na základě připojení proudu. Tím lze regulovat chování svaru a jeho výsledný vzhled. Zdroje připojeného proudu musí splňovat tzv. strmou V-A charakteristiku, které vyjadřuje závislost mezi napětím a proudem. Použitím strmé charakteristiky dochází k minimálním změnám svařovacího proudu při větších změnách napětí, které je úměrné délce oblouku.

V případě použití základního stejnosměrného proudu je metoda označována jako TIG DC a může být zapojena přímo (DC -) obr. 18a nebo nepřímo (DC+) obr. 18b. V praxi je častěji užíváno přímého zapojení, kde je elektroda záporným pólem a materiál kladným. Což je výhodou z hlediska tavení materiálu (velká hloubka závaru) a menšího namáhání elektrody. Jelikož na elektrodu připadá pouze 1/3 celkového tepla vytvořeného elektrickým obloukem a 2/3 na materiál. Je aplikován u všech druhů materiálu, které nejsou náchylné na tvorbu vrstvy oxidů. Mezi tyto materiály patří ocel, nikl, titan a jejich slitiny. V případě směsi ochranného plynu Ar + He (<75 %) lze tento způsob uplatnit i u hliníku. Oxidová vrstva odstraněná díky vysoké vodivosti He, které do svarového spoje dodává značné množství tepelné energie a dochází k roztavení povrchové vrstvy.

U nepřímého zapojení pólu je zapojení pólu opačné a větší množství energie působí na elektrodu. Ta musí být při svařování ochlazována, aby nedošlo k jejímu odtavení. Výhodou však je tzv. čistící efekt, který odstraňuje vrstvu oxidů bez nutnosti úprav směsného plynu. Odstranění této vrstvy probíhá pomocí 2 mechanismů. Prvním z nich je teplota vytvořené katodové skvrny na základním materiálu, která způsobí odpaření vrstvy oxidů. Druhým mechanismem je dynamická energie kladných ionů argonu. Ty jsou směrem k místu soustředěné energie urychlovány a při kontaktu s materiálem vrstvu oxidů rozbíjí.

Za účelem svaření materiálu pokrytou vrstvy oxidů se častěji využívá zapojení střídavého proudu TIG AC obr. 18c. Střídavým zapojením elektrody na kladný a záporný pól slučuje metoda výhody přímého i nepřímého zapojení. V první fázi tak dochází k čistícímu efektu a většímu zatěžování elektrody. Druhá fáze je doprovázena lepším tavením materiálu a chlazením elektrody. U starších svařovacích zdrojů nebylo možné nastavit poměr mezi jednotlivými přechody polarit. Obě polarity tak byly zapojeny 50/50 a elektroda byla zbytečně namáhána. Střídavý proud měl sinusový průběh o frekvenci odpovídající síťovému napětí 50 Hz. S dalším vývojem zdrojů došlo k možnosti nastavení polarity. Nyní svářečky využívají obdélníkový průběh, kde je možné nastavení frekvence střídání a poměr fází. Výstupní proud se pohybuje v rozmezí 20–200 Hz a poměr fází čištění/tavení je nastavován v závislosti na stavu povrchu. Pro materiály s velkou tloušťkou oxidu se volí 50–60 % a pro běžné 20–40% čištění. Velkou nevýhodou svářecích zdrojů je nutnost stabilizace oblouku při změně polarit.



Obr. 18 Podrobné schéma při svařování TIG (141). [51]

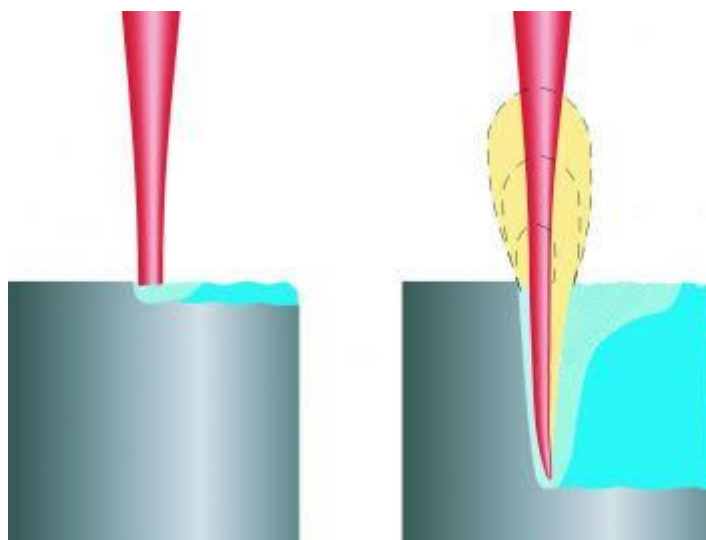
Předchozí metody byly postaveny na konstantním průběhu obou proudů. Nejmodernější způsob svařování umožňuje změny proudu mezi dvěma hladinami. Jedná se o tzv. pulsní svařování. Jednou z vymezujících hladin je základní proud, který je nastavován manuálně. Tento typ proudu je důležitý pro průvar základního materiálu. V závislosti na základním proudu je volena hodnota impulsního proudu, které vymezuje druhou hladinu. Ta je u modernějších zdrojů volena automaticky. Pro každý materiál je vhodná určitá frekvence pulsů, které jsou posuzovány dle tloušťky materiálu. Hlavními výhodami jsou lepší mechanické vlastnosti svarového spoje, snížení teplotně ovlivněné oblasti, vizuální vzhled atd.

3.3.1 Režimy svařování laserovým svazkem [52], [53], [54], [55], [56]

Podle hustoty dopadajícího svazku na plochu materiál jsou rozlišovány dva základní typy režimů svařování. Plošná hustota energie je závislá především na výkonu laseru a průměru svazku. Prvním režimem je tzv. mód vedení tepla (kondukční režim). Ten je charakteristický malou plošnou hustotou výkonu laseru $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. K tavení základního materiálu dochází při absorpci fotonů a následného přenosu tepelné energie vedením (kondukce). Energie je tak předávána fyzickými srážkami molekul, kde částice s vyšší kinetickou energií narážejí do částic s nižší. Vlivem toho dosahuje hloubka svaru malých hodnot a tavení je pouze povrchové (max. 1 mm pod povrchem). Ta je ovlivňována nejen plošnou hustotou svazku ale reflexí povrchu, vodivosti materiálu a posuvovou rychlostí. Tento režim je používán např. u rohových spojů tenkostěnných součástí, které díky kvalitnímu vizuálnímu vzhledu není třeba dále opracovávat.

Druhým režimem je mód hlubokého svařování (penetrační režim). Oproti předchozímu režimu plošná hustota výkonu laseru dosahuje vyšších hodnot a teplo se nestíhá odvádět. Charakteristickým znakem je tvorba kapiláry nazývané key hole, která je vysvětlená v předchozí kapitole.

Rozdíl mezi svařovacími režimy je znázorněn na obr. 19.



Obr. 19 Rozdíl mezi svařovacími režimy. [53]

4 SVAŘITELNOST KOBALTOVÝCH SLITIN [1], [4], [57], [58], [59]

Z pohledu posuzování vhodnosti dané slitiny pro zhotovení kvalitního spojení nejsou slitiny rozdělovány dle aplikace, ale dle způsobu výroby hutního polotovaru. Konkrétně se jedná o rozdíl mezi litym a tvářeným (vytvrzeným) stavem, kde jsou rozdílná chemická složení. Čistý prvek se vyznačuje vynikající svařitelností. Přidané legury za účelem zvýšení aplikačních vlastností slitin nebo výskyt vměstků tuto svařitelnost výrazně ovlivňují. Nejvíce rizikovým prvkem je měď i přes to, že do slitin není přidávána jako legující prvek. Svařované díly mohou být kontaminovány z různých podložek nebo kontaktů svorek svařecích zdrojů. V případě výskytu roste riziko praskání jak v teplotně ovlivněné oblasti, tak svarovém kovu.

Pro zamezení vzniku defektů je u některých metod nutné striktní dodržování předepsaných postupů. Mezi tyto metodiky patří např. průtok plynu inertního plynu u metody TIG ($12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$), použití předehřevu a držení na teplotě cca 540°C , minimální kontakt plochy přípravků s materiálem, které způsobují rychlé chladnutí. Při spojování materiálu kobaltové báze s běžně dostupnými oceli (nerezové, uhlíkové) jsou doporučovány měkčí přídavné materiály. Kdežto v případě přímého spojování kobaltových slitin, kde je nutné udržet odolnosti proti opotřebení, jsou doporučovány tvrdší. U materiálů náchylných na vnitřních pnutí lze např. kořen svaru zhotovit z měkčího materiálu (vyrovnání pnutí) a následného převaření vrstvou tvrdšího bez ztráty odolnosti.

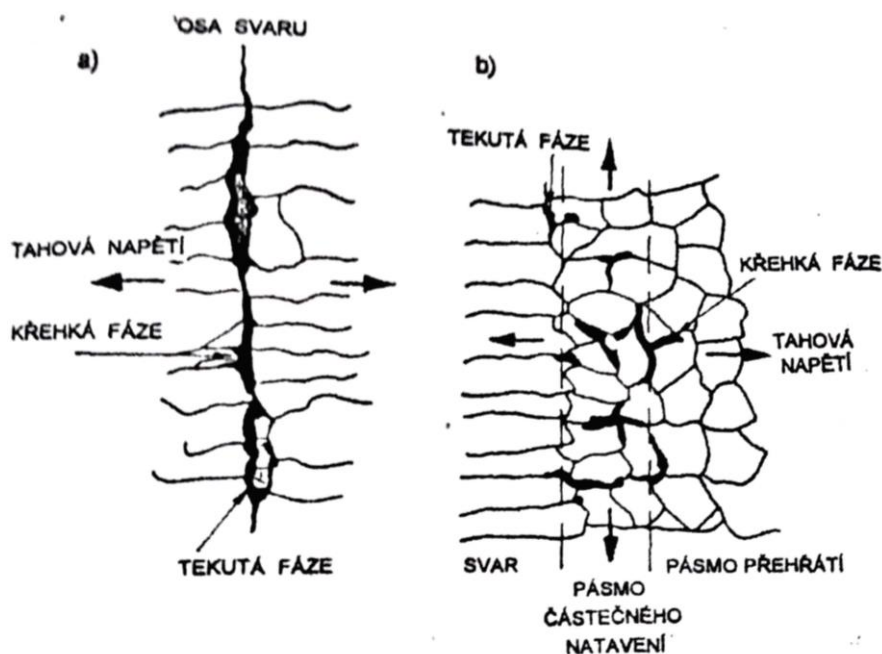
Eliminace vzniku vad je důležitá např. kvůli zamezení koncentrace napětí nebo šíření mikrotrhlin, které mohou vést až ke křehkému lomu. Na základě míry odlišnosti od požadovaných podmínek jsou vady dále tříděny na přípustné a nepřípustné. U nepřípustných vad jsou posuzovány možnosti opravy. Při posuzování vhodné nápravné technologie je nutná důkladná analýza pro zjištění příčiny jejich vzniku a typu vady. Ty mohou být specifikovány jak z hlediska tvaru, tak místa výskytu. Vady na základě tvaru jsou posuzovány dle rozsahu a řazeny do skupin jako bodové, plošné, prostorové. Mezi vady bodového typu patří např. sférické vměstky, mikropóry. Charakter plošného typu mají trhliny a neprůvary. Do poslední skupiny spadají různé plynové dutiny, vruby, staženiny. Znázornění typu zmíněných vad je uvedeno na obr. 20.



Obr. 20 Schéma výskytu vad. [53]

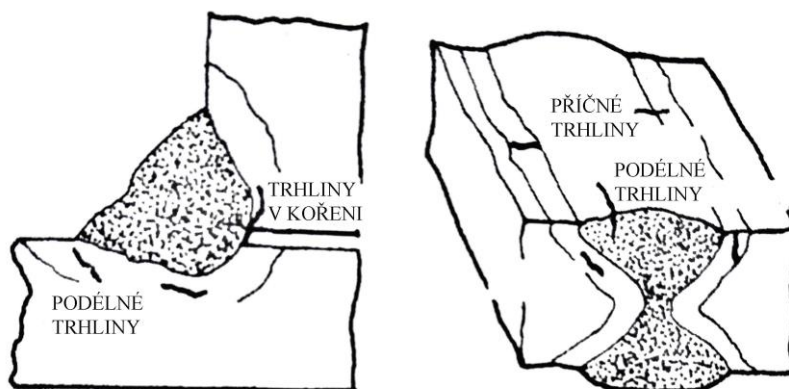
Kobaltové slitiny jsou náchylné zejména na tvorbu trhlin za horka. Tento druh se dále dělí na krystalizační, likvační a polygonizační trhliny. První uvedený a zároveň nejčastější typ vzniká ve svarovém kovu v průběhu tuhnutí. Následkem je rychlý odvod tepla ze svarového kovu, při kterém dochází ke snížení tažnosti a vznik vnitřních pnutí. Druhý typ trhlin vzniká na základě vysoké teploty podhousenkového pásma v teplem ovlivněné oblasti nebo ve svarovém kovu při navařování více housenek na sebe. Mechanismus posledního typu souvisí s poruchami na hranicích zrn. Hlavním důvodem jejich vzniku je chemické složení slitin. Náchylnost na jejich tvorbu roste zejména s prvky Fe, S, P, B, Zr, Nb, Ti a Si. Železo tvoří s ostatními prvky nízkotavitelná eutektika (FeS , Fe_3P), která jsou křehká a při tuhnutí praskají. Nejběžnějším výskytem je tak střed svarového kovu, kde materiál tuhne jako poslední (místo styku rostoucích dendritů). Dalším možným výskytem jsou hranice zrn.

Schéma výskytu obou případů zobrazuje obr. 21. Zabránit tvorbě dendritů lze přidáním prvků jako Mn, Si (malé množství), ke kterým má oproti ostatním zmíněným prvkům síra větší afinitu a utvoří sulfidy (MnS , SiS_2). Ty mají větší teplotu tání a při tuhnutí vyplavou v podobě strusky na povrch svaru. Z technologického hlediska obecně roste riziko jejich vzniku při hlubokém svařování s úzkým svarem, vysoké koncentraci teplené energie a velkou svařovací rychlostí.



Obr. 21 Možnosti výskytu krystalizačních trhlin. [58]

Ojediněle se mohou vyskytovat také trhliny za studena (obr.22). Hlavní příčinou jejich vzniku je především přítomnost vodíku. Ten se do svarového kovu může dostat např. z obalu elektrod, které nebyly před svařováním dostatečně vysušeny. Oproti předchozímu typu jsou charakteristické lesklým a neoxidovanými povrchem. Jelikož nejsou limitovány osou svaru nebo hranicemi zrn mohou být různě orientovány a rozloženy přes všechny svarové oblasti. Obvykle vznikají po svaření při teplotách pod $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejběžnější výskyt je v podhousenkové oblasti svarových spojů. Mezi aspekty ovlivňující rozklad vodíku patří teplota, koncentrace a rychlost ochlazování. Náchylnost na vznik trhlin za studena tak lze snížit např. použitím vysušených přídatných materiálů a vyšším množstvím vneseného tepla (předehřev, dohřev, vyšší příkon).



Obr. 22 Příklad výskytu studených trhlin. [58]

4.1 Detekce vad svarových spojů [60], [58], [61], [62], [63], [64], [65]

Pro ověření funkčnosti a bezpečnosti zhotoveného svarového spojení je důležité stanovení určité metody s danou četností. Ta je stanovována s ohledem na aplikační prostředí a styl namáhání. Náročnost parametrů zkoušení by měla být předimenzována tzn. např. větší zkušební zatížení než provozní. Zkoušky svarových spojů mohou být prováděny za účelem ověření spolehlivosti série nebo při zkoumání svařitelnosti nových materiálů a optimalizaci výroby. Metodiky zkoušek a jejich míra přípustnosti je definovaná normami pro daný typ materiálu.

Detekce svarových vad je rozdělována do dvou skupin. První skupinou jsou zkoušky nedestruktivní (ND). Při jejich aplikacích nedochází k porušení materiálu a znehodnocení výrobku. V případě bezpečnostních kontrol svarových spojů, tak nedochází k dlouhodobému zastavení výroby. Lze jimi detekovat povrchové a vnitřní vady. Hlavní a nejjednodušší metodou je vizuální kontrola (VT), kterou jsou stanovovány další způsoby měření a je prováděna v celém rozsahu zkoumané délky svaru. Shrnutí ND metod a jejich princip je uveden v tabulce 10.

Tab. 10 Shrnutí ND zkoušek a jejich princip. [61], [62], [63]

Druh metody:	Zkratka:	Způsob kontroly:
Visuální	VT	Kontrola může být prováděna pouhým okem/lupou (přímá metoda) nebo pomocí přístrojů jako endoskopy, periskopy atd. (nepřímá metoda).
Kapilární	PT	Detekce je realizována nanesením tekutého penetračního prostředku. Ten v případě výskytu vnitřních vad vniká do materiálu. Následně je povrch očištěn a proveden nános práškovité kontrastní bílé látky, která napomáhá vzlínání penetračního prostředku. Konečné vyhodnocení probíhá v bílém nebo ultrafialovém světle.
Radiografická	RT	Zkoumaný svar je prozařován rentgenovým zářením. Stav svarového spoje je poté zaznamenáván na fluorescenční stínítko (radioskopie) nebo rentgenový film (radiografie).
Ultrazvuková	UT	Pomocí vysílače jsou do svarového spoje vysílány ultrazvukové vlny. Při výskytu nějakého defektu dojde k jejich částečnému odrazení a zachycení přijímačem. Následně lze ze stínítka obrazovky detekovat jejich polohu a velikost.
Vířivých proudů	ET	Základem je vnější působení elektromagnetického pole, při kterém jsou v materiálu indukovány vířivé proudy. Parametry vířivých jsou závislé na stavu materiálu a tím i výskytu vad.
Magnetická prášková	MT	Principem je zmagnetizování materiálu a následný nános detekční feromagnetický prášek. Ten je hromaděn v místech výskytu vady vlivem vystupujících magnetických siločar nad povrch (rozptylový magnetický tok). Výsledné hodnocení je prováděno v bílém nebo ultrafialovém světle.

Pro hlubší zkoumání jsou používány destruktivní metody (DT). Tímto způsobem je možné získat rozsáhlejší výsledky jako chemické složení, strukturu materiálu, mechanické a technologické vlastnosti. Nevýhodou však je poškození materiálu při zhotovování vzorku,

kteře jsou pro kařskou metodu přesně definovány. Vzorek může být seřmut z již používané součásti (při určeni důvodu poškození) nebo vytvořen přímo za účelem zkoumání. Základní metody používané za účelem zjištění mechanických vlastností svarových spojů a jejich principy jsou uvedeny v tab. 11, ostatní jsou popsány v následujících kapitolách.

Tab. 11 Shrnutí základních DT metod pro určeni mechanických vlastností. [58], [64], [65]

Druh metody:	Způsob kontroly:
Zkouška tahem	U vzorků definovaných rozměrů je uprostřed zhotoven svarový spoj. Ty jsou vloženy do zkušebního trhačního zařízení (většinou je osa svaru kolmá na směr zatěžování) a za určitých podmínek natahovány až k úplnému přetržení. Na základě toho jsou určeny hodnoty maximální síly, meze pevnosti a vlastnosti lomu.
Zkouška rázem v ohybu	Podobný průběh jak u předchozí metody. Na zhotovený svar vzorku je vyhotoven vrub (typu U/V), který je v opačném směru vyhotovení zatěžován rázovou silou Charpyho kladiva. Absorbováním nárazové energie dojde k přetržení vzorku. Tím zjistíme absorbovanou energii, vrubovou houževnatost, vlastnosti lomu.
Zkouška ohybem	Základem metody je plastická deformace zkušebního vzorku způsobená ohybem. Ten je ohýbán okolo trnu do definovaného úhlu. Vyhovující zkouška je považována při dosažení požadovaného úhlu bez vzniku trhlin.

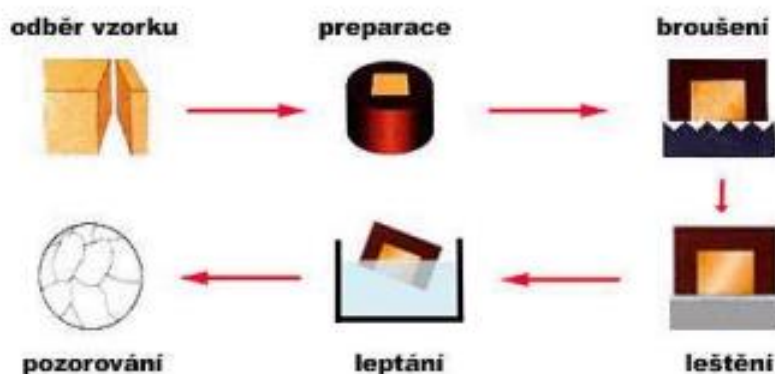
4.1.1 Způsoby přípravy metalografického vzorku [12], [58], [63]

Při odběru vzorku za účelem zkoumání struktury materiálu je nutné dodržení striktních pravidel kvůli zabránění případnému poškození a přesných výsledků. V první fázi musí být vzorek vhodně seřmut z určeného místa. Odběrem by nemělo dojít k tepelnému zatížení ani plastické deformaci. Jelikož zmíněné aspekty by způsobily změny fázových struktur a tím nepřesné výsledky. Rozsah plochy vzorku se volí s ohledem na možnosti přípravy a dostupných výzkumných zařízení. Obvykle dosahuje rozměrů 1–2 cm². Pro zpřesnění výsledku nebo výskytu nehomogenní struktury je preparace vzorku realizována na více místech. Vzorek by měl obsahovat celý strukturní rozsah všech oblastí jako svarový kov, teplotně ovlivněnou oblast a základní materiál. Řez je tedy prováděn kolmo na svarovou osu. Nejrozšířenější způsob odběru je řezání pomocí rozbrušovacích kotoučů, které jsou vyráběny v různých variantách dle tvrdosti řezaného materiálu. Mezi používané řezné prostředky patří např. Al₂O₃, SiC a diamant. Ty jsou uloženy v bakelitovém nebo kovovém pojivu.

Odřezané vzorky jsou dále označeny a upraveny do potřebných rozměrů. Následně nastává zalisování/zalítí do samovolně vytvrditelných pryskyřic. Ty jsou dostupné na trhu v mnoha variantách a způsobech aplikací. Pro zalévání za studena jsou nejčastěji využívány metylmetakrylátová a epoxidové pryskyřice, které jsou v podobě sypkého prášku. Jejich smícháním s tvrdidlem dojde ke vzniku husté kapaliny, kterou je pozorovaný vzorek zalit. Zalévání za tepla je rozšířené u vzorků, kde nehrozí změna struktury působením tepla a tlaku lisu. Vzorek je vložen do lisu a zasypáním pryskyřicí, působením zmíněných faktorů poté dojde k vytvrzení. Doba procesu je tak výrazně zkrácena oproti předchozímu způsobu zalévání. Mezi další výhodu patří průhlednost, vodivost a volitelná tvrdost používaných pryskyřic (epoxidové, akrylátové, bakelitové).

Nejnáročnějším procesem přípravy je leštění a broušení, při kterém jsou ze zkoumaného povrchu odstraněny nerovnosti. Nežádoucím jevem je vznik vrstvy plasticky deformovaného materiálu, která vyrovnává drsnost povrchu. Ta je závislá na parametrech broušení a vlastnostech materiálu. Jedním z nejčastějších způsobů je automatické broušení za mokra. Jelikož stroj zajišťuje kontinuální chlazení a nedochází ke změně struktury. Broušení je realizováno brousícími kotouči, které jsou v průběhu měněny od nejhrubší zrnitosti po nejjemnější. Místo brusného kotouče lze použít brusné pasty a suspenze. Používanými brusivy jsou SiC (měkké materiály), B₄C (keramika) a Al₂O₃ (střední a vysoká tvrdost materiálu). Úkolem dokončovacího procesu leštění je vyhlazení reliéfu povrchu, poškozeného brusnými zrny o velké zrnitosti. Z technologického hlediska může být realizováno mechanicky, chemicky, elektrolyticky nebo jejich kombinací. V případě mechanického leštění je brusivo nanášeno ve formě pasty nebo suspenze na rotující kotouč (litinový, potažený tkaninou). Chemické a elektrolytické čištění funguje na stejném principu anodického rozpouštění s rozdílem přívodu proudu.

Poslední fází přípravy vzorku je leptání, pomocí kterého dochází k odstranění plastické vrstvy a zviditelnění jednotlivých fází materiálu. Pro každý materiál je určen rozdílný leptací prostředek a doba leptání. Princip je založen na různé náchylnosti rozpouštění jednotlivých složek a tím odlišného zvýraznění struktur. Dle charakteru požadované struktury je leptání rozdělováno na plošné, barevné a na hranicích zrn. U barevného leptání dochází ke vzniku reakčních zplodin. Ty mají v různých fázích odlišnou barvu. Shrnutí postupu celé metody je zobrazeno na obr. 23.



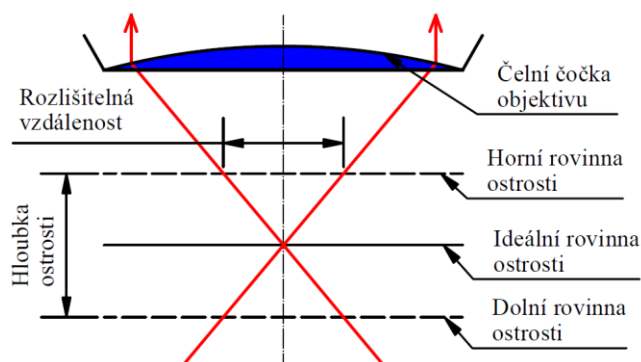
Obr. 23 Schéma procesu přípravy zkoumaného vzorku. [63]

4.1.2 Způsoby hodnocení makro/mikrostruktury [58], [12], [67], [68], [69], [70]

Základním rozdílem mezi hodnocením makrostruktury a mikrostruktury je v použitém zvětšení. Obecnou charakteristikou hodnocení makrostruktury je malé optické zvětšení 30x nebo pozorování pouhým okem. Kdežto pro mikrostrukturní hodnocení jsou používány mikroskopy se zvětšením 30–2000x. Hranice měření mezi oběma typy však není žádnou normou přesně definována a je odvíjena od parametrů pozorovaného objektu. Toto tvrzení neplatí např. u mikrosvarů, kde je nutností provést poměrně velké zvětšení už jen kvůli zjištění jejich přibližných rozměrů. Z tohoto důvodu je přesnější dělení dle účelu pozorování. Zkoumání makrostruktury je prováděno za účelem pozorování stavu jednotlivých oblastí svarového spojení, rozměrů a tvaru svaru, promíšení, detekci vnitřních vad atd. U mikrostruktury je zkoumání zaměřeno na jednotlivé strukturní fáze jako karbidy, vměstky atd.

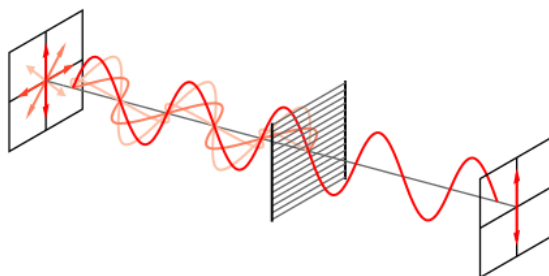
Jelikož kovy nepropouští světlo bez ohledu na jejich tloušťku, nejjednodušším zařízením pro zkoumání je světelný mikroskop. Ten k analýze využívá odraženého světla, které prochází

soustavou čoček. Čočky jsou dle jejich funkce děleny na objektiv a okulár. Odražené paprsky procházející objektivem vytvářejí skutečný, zvětšený, převrácený obraz zkoumaného povrchu. Paprsky jsou dále zachyceny okulárem, kterým je vytvořen přímý, zvětšený, neskutečný obraz zkoumaného povrchu. Z toho vyplývá, že pro zkoumání je výhodnější většího zvětšení objektivu, kterým jsou zvýrazňovány přímo detaily povrchu. Kdežto okulár zvětšuje pouze obraz vyhodnocený objektivem. Zvětšení mikroskopu roste se zmenšujícími ohniskovými vzdálenostmi. Mezi další důležité aspekty u objektivu patří rozlišitelná vzdálenost (hranice rozeznatelnosti 2 bodů zkoumaného vzorku) a hloubka ostrosti (vzdálenost ve které jsou body ostře viditelné), které podrobněji vysvětluje obr. 24.



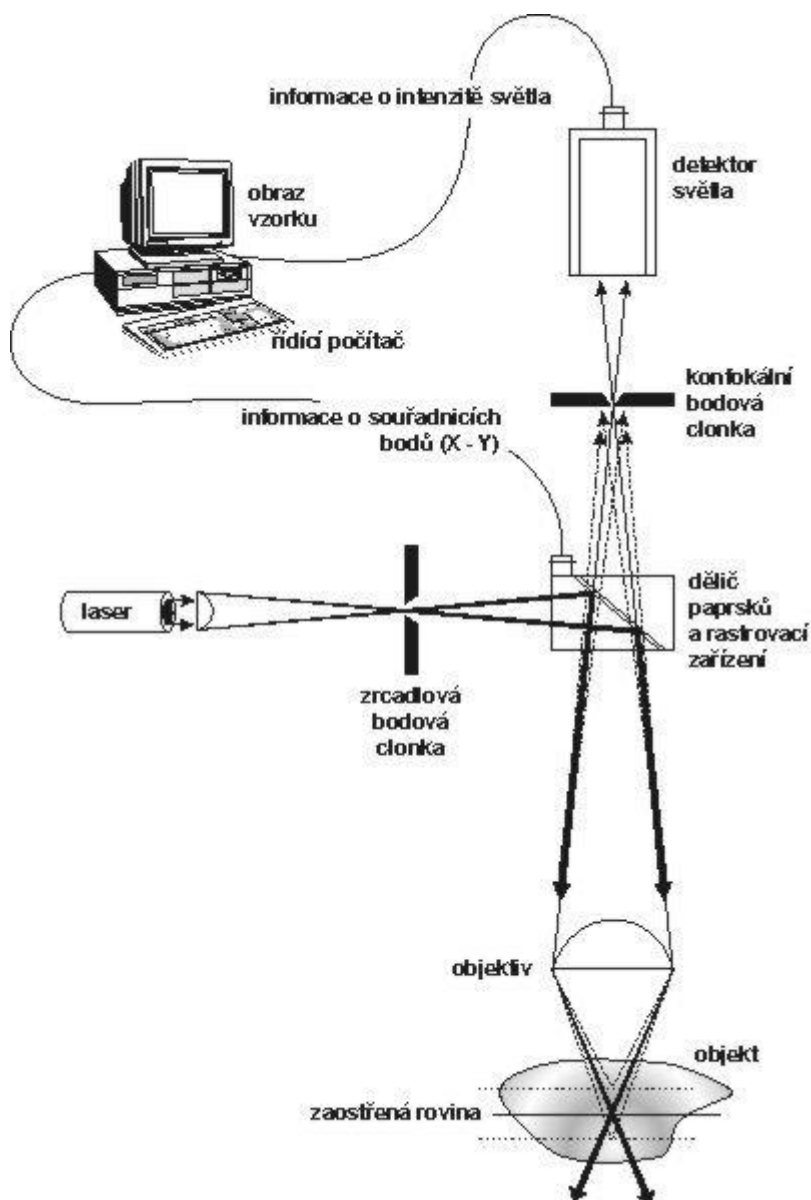
Obr. 24 Vysvětlení hloubky ostrosti a rozlišitelné vzdálenosti. [12]

Kvalita výsledného vzorku je závislá na přípravě metalografického vzorku a volbě mikroskopické techniky. Tyto techniky slouží k upravení kontrastu, se kterým roste rozlišitelnost jednotlivých strukturních fází vzorku. Mezi nejčastěji používanými technikami jsou pozorování ve světlém/tmavém poli, fázový a interferenční kontrast, polarizační a fluorescenční mikroskopie. První zmíněné techniky patří mezi základní nejjednodušší způsob zkoumání vzorku. Pro úpravu kontrastu mohou být realizovány v několika konfiguracích, které ovlivňují směr přívodu paprsku ke zkoumanému vzorku, a tím jeho následovný odraz. Jednou z nich je využití přímého osvětlení, kde paprsky dopadají kolmo k povrchu vzorku. Světelné paprsky jsou přiváděny z externího zdroje a k povrchu jsou soustředěny průchodem objektivu pomocí polopropustné desky. Povrch je tvořen zrny s různou geometrií, od kterých je světelný paprsek odražen. To způsobuje jejich rozdílný kontrast. Při kontaktu paprsku s rovnými plochami nedojde k velké ztrátě světelné intenzity => zrna se jeví jako světlá. Kdežto u šikmých zrn je větší část paprsku odražena mimo objektiv a zpět se vrací jenom část. Tyto zrna se jeví jako tmavá. Základ všech metod je založen na stejném principu, rozdílné jsou způsoby přivádění světla a druh, se kterým pracují. Pro výraznější rozlišení jednotlivých struktur je vhodnější použití např. polarizační mikroskopie, která pracuje na základě interakce polarizovaného světla s krystalografickým charakterem jednotlivých struktur. Rozdíl mezi nepolarizovaným a polarizovaným světlem je v usměrnění kmitání vektorů elektrické intenzity a magnetické indukce do jedné roviny. Polarizaci znázorňuje obr. 25, kde je realizována pomocí polarizačního filtru.



Obr. 25 Schéma polarizovaného světla. [68]

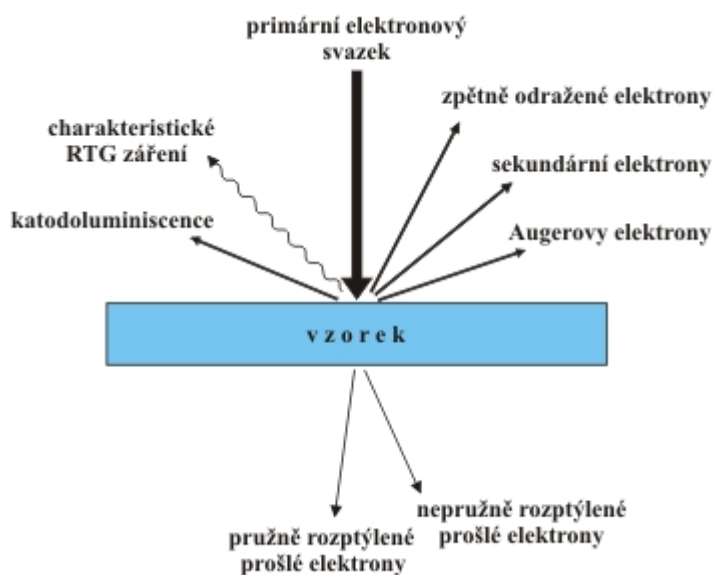
Všechny výše zmíněné metody zobrazují celý zkoumaný objekt najednou. Odlišnou metodou zkoumání struktury materiálu používá laserový rastrovací konfokální mikroskop (*LSCM – Laser Scanning Confocal Microscope*), u kterého je skenovaný objekt postupně rastrován (skenován). To může být realizováno 3 způsoby, a to rozmítáním laserového paprsku a posuvem vzorku nebo objektivu. Principem metody je měření intenzity odraženého světla, při kterém je zaznamenávána zároveň jeho poloha. Tím je získáván trojrozměrný obraz, na základě kterého lze provést např. nedestruktivní vyhodnocení tvrdosti a získat informace v jednotlivých řezech reliéfu. Zdrojem světla je laserový paprsek, který je fokusován na clonku, a pomocí děliče paprsků je přenášen objektivem ke zkoumanému materiálu. Paprsky jsou fokusovány do úzkého bodu (průměr je dán rozlišovací schopností objektivu) a odrazeny zpět. Ty jsou poté opět zachyceny objektivem a pomocí děliče paprsků přivedeny na konfokální clonku, která odfiltruje záření vycházející z nezaostřených míst. Pomocí detektoru, který je tvořen citlivým fotonásobičem, jsou paprsky přeneseny do systému, kde je provedeno jejich vyhodnocení. Schéma celého procesu je znázorněno na obr. 26.



Obr. 26 Schéma principu konfokálního rastrovacího mikroskopu. [70]

4.1.3 Způsoby zkoumání chemického složení [12], [71], [72], [73], [74], [75], [76]

Chemická analýza je realizovaná pomocí elektronové mikroskopie. Pro zkoumání materiálu tak nejsou používány fotony ale elektrony, kterými lze získat více informací o struktuře materiálu. Systém tvorby elektronů a jeho fokusování je stejný jako u svařování elektronovým paprskem. Z důvodu možného vychýlení letících elektronů nebo jejich zpomalení celý proces probíhá ve vakuu. Základními částmi pro tvorbu a fokusování elektronů jsou tedy elektronové dělo a soustava elektromagnetických čoček. Při interakci elektronu s materiálem dochází k rozptýlení elektronů a vzniku záření. Část elektronů je dokonce absorbována krystalickou mřížkou a v případě tenkého vzorku řádově 10–500 μm prochází i skrz. Reakce dopadu elektronu s materiálem je zobrazena na obr. 27.



Obr. 27 Schéma interakce elektronu se zkoumaným vzorkem. [71]

Dle druhu použitého paprsku a účelu provádění výzkumu jsou elektronové mikroskopy rozdělovány na transmisní TEM (*Transmission electron microscope*) a rastrovací SEM (*Scanning electron microscope*). Transmisní elektronový mikroskop využívá prošlých elektronů skrz vzorek, na základě kterých lze vyhodnotit lokální stavbu atomů a chemické složení. Principem je rozdílná změna intenzity záření při průchodu jednotlivými fázemi. Nevýhodou je náročnější příprava vzorku. Kdežto rastrovací elektronové mikroskopy pro vyhodnocení využívají odražené paprsky. Tento typ je charakteristický vysokou rozlišovací schopností a velkou hloubkou ostrosti. Stejně jako laserový konfokální mikroskop může vytvářet trojrozměrné objekty, pro které využívá sekundárních a primárních zpětně odražených elektronů. Při zkoumání chemického složení je k elektronovému mikroskopu připojen energiově disperzní analyzátor EDS/EDX (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*). Ten slouží k detekci rentgenového záření uvolněného při interakci primárního svazku se zkoumaným materiálem. Energie fotonů rentgenového záření je specifická pro daný prvek, a tím dochází k vyhodnocení. Chemickou analýzu prvků lze provádět bodově, plošně, lineárně.

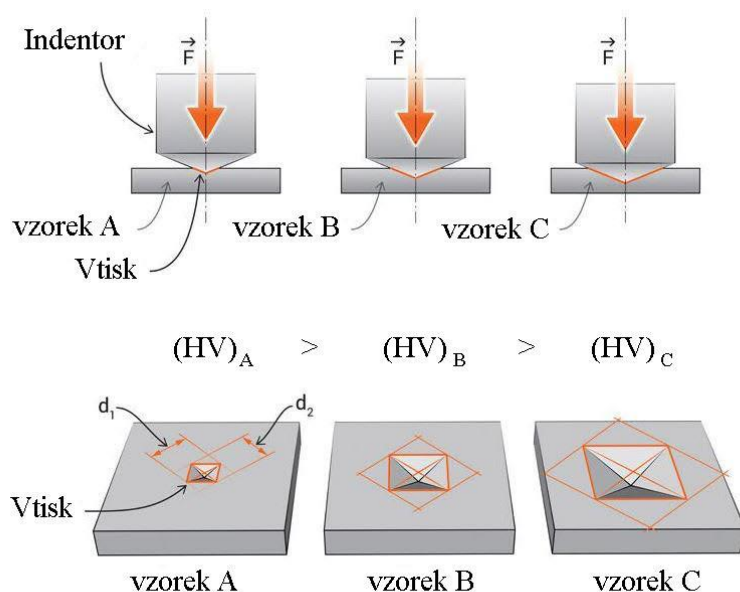
4.1.4 Způsoby hodnocení tvrdosti [58], [12], [77], [78], [79], [80], [81], [82]

Zkouška patří mezi základní metody pro zkoumání mechanických vlastností materiálu. Tvrdost je definována jako mechanická vlastnost materiálu, která vyjadřuje odpor proti vnikání cizího tělesa. Na základě toho je realizována pomocí vnikajícího tělesa, označovaného jako indetor. Ten má přesně definované geometrické parametry a do zkoumaného materiálu je vtlačován určitou silou za daných podmínek. Geometrie těles a ostatní parametry jsou definovány normou.

Nejrozšířenější používanou metodou je zkouška tvrdosti dle Vickerse, která je definována normou 6507-1. Používaným indentorem je pravidelný čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Ten je vtlačován určitou silou kolmo k ploše zkoumaného vzorku po určitou dobu. Poté je na základě velikosti zátěžné síly a střední délky úhlopříčky provedeno vyhodnocení. Standartní doba zatěžování je stanovena od 10–15 s. Metoda je dle normy označována zkratkou HV (Vickers Hardeness number), ke které jsou připisovány další hodnoty. První hodnotou je velikost zatížení udávané v kp (kp=kg). Na základě toho je zkouška rozdělena na tři části:

- Zkoušku tvrdosti dle Vickerse pro HV5–HV100
- Zkoušku tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení pro HV0,2–HV5
- Zkoušku mikrotvrdosti dle Vickerse pro HV0,01–HV0,2

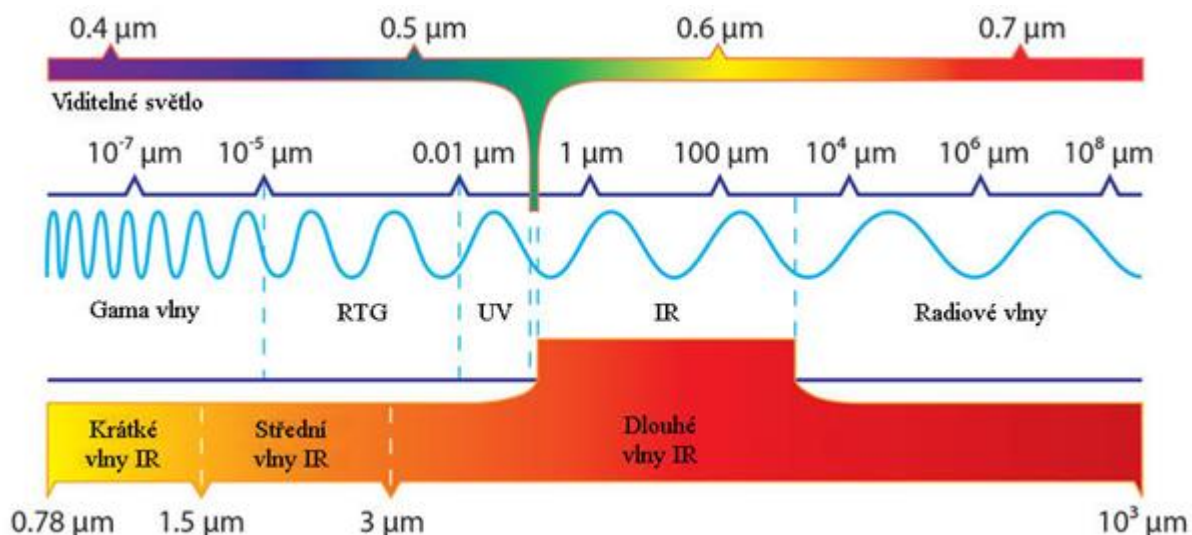
Další hodnota je udávána při nedodržení standartní doby zatěžování, např. při zatěžování 10 kg po dobu 30 s je tvrdost udávána ve tvaru HV10/30. Zhotovený vtisk musí odpovídat několika pravidlům, mezi které patří např. rozdíl mezi délkami měřených úhlopříček nesmí být větší jak 5 % a jejich rozsah v rozmezí 0,020–2,400 mm. Od délky úhlopříčky je odvíjena i minimální tloušťka vzorku, která musí dosahovat alespoň 1,5x její délky. Teplota okolí při zkoušení se pohybuje v rozsahu 10–35°C. V případě řízených podmínek je stanoveno $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Díky volbě zkušebního zatížení je možné zkoumání jednotlivých fázových struktur. Nevýhodou je nutnost úpravy povrchu, který musí být vyleštěný, rovný a bez nečistot z důvodu přesného změření úhlopříček. Zkouška je nejčastěji prováděna na moderních tvrdoměrech, které jsou řízeny systémem. Tvrdoměry obsahují několik druhů objektivu pro měření obrazu. Jejich vyhodnocení provádí automaticky systém. Závislost hloubky vtisku na velikosti tvrdosti znázorňuje obr. 28.



Obr. 28 Schéma závislosti hloubky vtisku na velikosti tvrdosti. [82]

4.2 Termovizní kontrola vneseného tepla [83], [84], [85], [86], [87]

Kontrolování vneseného tepla pomocí termografie patří k nejmodernějším metodám. Jedná se o bezkontaktní měření teploty, při kterém je zachytávána energie vyzařovaná povrchem tělesa v oblasti infračerveného spektra elektromagnetického záření. To je realizováno pomocí termokamery, která zachycené záření převádí na viditelný obraz nazývaný termogram. Obraz je vyhodnocován v určitém časovém úseku, kde v daný moment dochází k rozdílné intenzitě vyzařované energie. Tím vzniká barevný rozdíl jednotlivých oblastí (teplotní pole). Rozsah měřených teplot se pohybuje v rozmezí od -40 do $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozsah infračerveného záření je znázorněn na obr. 29.



Obr. 29 Elektromagnetické spektrum. [86]

Bezkontaktní měření je ovlivňováno několika aspekty, které mohou způsobit nepřesnost změřené teploty. Mezi nejvýznamnější patří reflexivita povrchu měřeného objektu. Lesklé předměty odrážejí světlo z jiných okolních tepelných zdrojů. To způsobí větší intenzitu zachycené energie termokamerou a tím nárůst teploty. Při měření dvou totožných předmětů (teplota, materiál) s rozdílnou reflexivitou povrchu, bude materiál s lesklým povrchem vykazovat vyšší hodnotu. Tento jev je eliminován nastavením emisivity materiálu, kterou je kompenzováno množství odražené energie. Hodnota emisivity je přirovnávána k ideálnímu černému tělesu, u kterého se tato hodnota rovná 1. Toto těleso nevyzařuje žádnou odraženou energii tepelných zdrojů z okolí, ale pouze vlastní tepelnou energii. Toho však nelze v praxi dosáhnout, a tak jsou u měřených materiálu nastavovány nižší hodnoty. Termokamera při nastavení větší hodnoty neodpovídající skutečnému tělesu, bude očekávat větší přísun vyzářené energie než odražené. Tím pádem bude docházet k nižší kompenzaci a vyhodnocená teplota bude dosahovat vyšších hodnot než reálná teplota. V opačném případě bude zase vyhodnocená teplota nižší než reálná teplota. Z tohoto důvodu je přesně zadaná hodnota klíčová. Dalším vlivem je chyba způsobená nepřesností přístroje, která je u levnějších přístrojů v rozsahu $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 2\text{ }\%$ a u dražších $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 1\text{ }\%$. Vždy je uvažována horší odchylka z hodnoty. Působení okolní atmosféry a vzdálenost měření je kompenzována přístrojem nebo uvažována při následném zpracování.

Oproti ostatním metodám zkoumání hraje ve svařování důležitou roli, jelikož díky termogramu je možné přesné mapování svarových oblastí. To umožňuje použití např. v automatizovaných procesech svařování. Automatizovaná linka na základě vyhodnocených údajů ze svarové oblasti provádí optimalizaci svařovacích parametrů.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Hlavním cílem experimentální části je ověření svařitelnosti kobaltových slitin různými svařovacími technologiemi. Jako svařovaný materiál byla vybrána slitina Stelit 6B. Kvůli kritické situaci vzácného kovu byly zvoleny technologie, které pro svařování nevyžadují použití přídavného materiálu. První metodou je hybridní svařování laserovým paprskem s použitím obloukového svařování metody TIG (141). Přídavný tepelný zdroj elektrického oblouku byl použit za účelem přehřevu. Kontrola vneseného tepla byla kontrolována pomocí termovize. Toto rozšíření navazuje na bakalářskou práci, kde byl pro svaření použit pouze laserový paprsek. Druhou použitou metodou je svařování elektronovým paprskem (51). Kvalita zhotovených svarových spojů je hodnocena destruktivními metodami, které zahrnují analýzu mikrostruktury a makrostruktury, hodnocení tvrdosti dle Vickerse a EDS analýzu chemického složení.

5.1 Materiálový rozbor [1], [4], [88]

Materiál pro experiment byl dodán výrobcem KENMETAL ve formě tyčového hutního polotovaru o $\varnothing$ 34,9 mm. Z tyče byly následně naděleny 3 kusy polotovaru určených pro svařování. Slitina splňuje požadavky specifikace AMS 5894 pro letectví a kosmonautiku. Stelit 6B byl vytvrzen pomocí rozsáhlého procesu kování z důvodu zvýšení odolnosti proti opotřebení a spadá tedy do skupiny otěruvzdorných slitin. Poté bylo provedeno žíhání za teploty 1230 °C a následovalo ochlazení na vzduchu. Maximální garantovaná provozní teplota udávána výrobcem je 980 °C. Do této teploty Stelit 6B zachovává odolnost proti opotřebení a tvrdost i při červeném žáru. Při zpětném ochlazení na pokojovou teplotu získává původní mechanické vlastnosti. Díky nízkému statickému koeficientu tření 0,119 má slitina dobrou odolnost proti zadírání. To umožňuje aplikace v nepřístupných oblastech, kde není možné efektivní mazání nebo se maziva rozkládají vlivem vysoké teploty. Dokonce může být aplikována i při posuvném uložení kov-kov, jelikož koeficient zajišťuje dobrý kluzný kontakt. Mezi další vlastnosti patří vysoká odolnost proti oxidaci, žíravým korozním médiím, tepelným šokům a kavitaci. Toho využívá například chemický a potravinářský průmysl, kde je kladen důraz na kombinaci otěruvzdornosti a korozivzdornosti. Energetický průmysl používá tento typ pro výrobu erozních štítů parních turbín, kde jsou schopny odolávat mechanismům opotřebení až 30 let. Chemické složení je uvedeno v tab. 12, k těmto hodnotám je doložen materiálový list v příloze 1. Mechanické vlastnosti shrnuje tab. 13.

Tab. 12 Chemické složení Stelitu 6B.

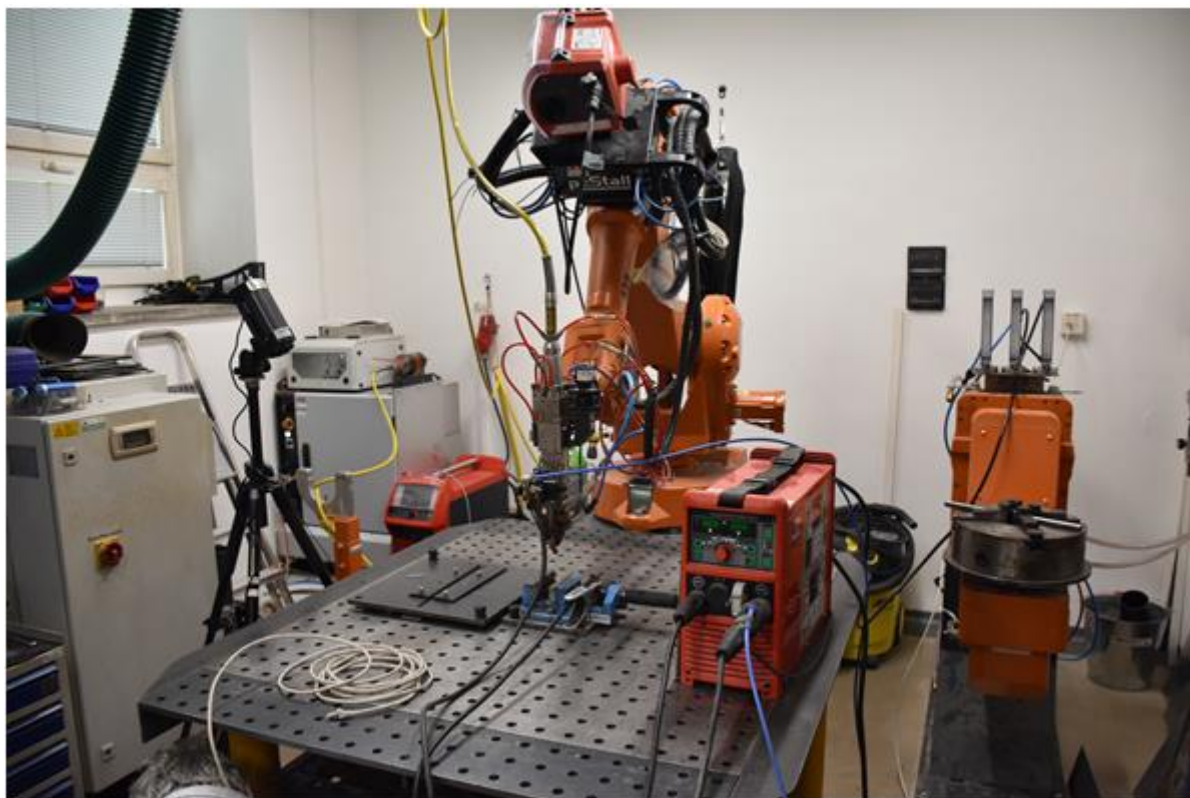
Chemické složení [%]	C	Cr	Si	W	Fe	Co	Ni	Mn	Mo	P	S
	0,99	29,47	0,59	3,55	1,27	Bal.	2,76	1,21	1,35	<0,01	<0,002

Tab. 13 Mechanické vlastnosti Stelitu 6B. [88]

Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	9,39
Teplota tání [°C]	1265-1354
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	14,85
Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	1063
Tvrdost HRC	36

5.2 Zhotovení svarů hybridním svařováním [89], [90], [91]

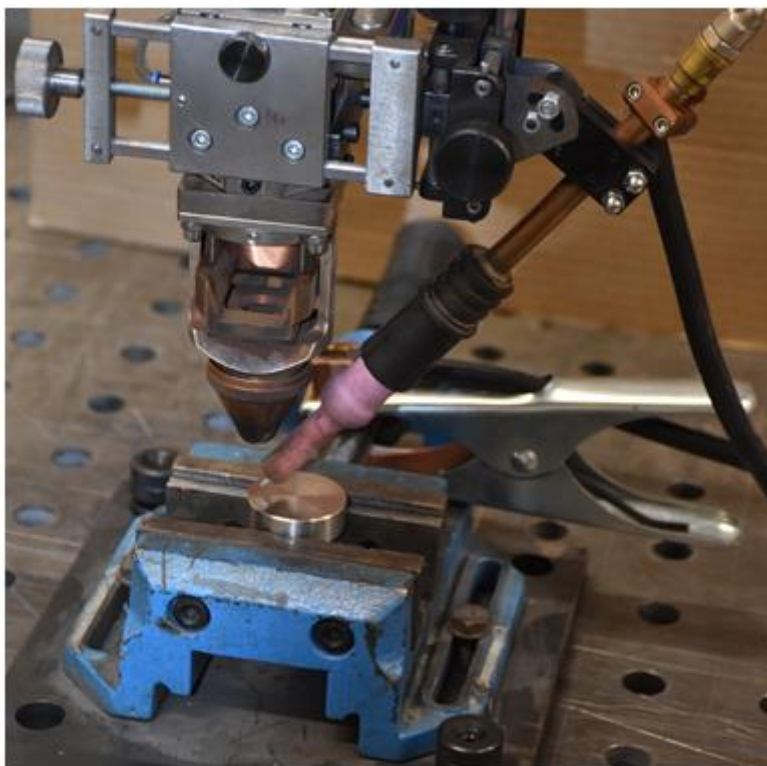
Svařování bylo realizováno na laserovém pracovišti Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Pracoviště disponuje 2 kW pevnolátkovým vláknovým laserem IPG YSL 2000 s vlnovou délkou 1070 nm. Laserový zdroj je opatřen optickým přepínačem, který umožňuje dodávání energie dvou pracovištím. Ústav tuto možnost využil pro připojení svařovací hlavy Precites YW30 a řezací hlavy Precitec YRC100. Jedna hlava tak může být v provozu a druhá připravena na okamžitou změnu technologie. Hlavy jsou mechanicky osazovány na šestiosé robotické rameno ABB IRB 2400 s nosností 20 kg a rozsahem 1600 mm. V případě potřeby mohou být pracovní osy doplněny dvouosým polohovadlem IRBP 250. Kontrolu procesních parametrů jako teplota předehřevu, vedení tepla atd. zajišťuje infračervená kamera FLIR A310 a rozšířený software FLIR Tools +. Pro aplikace hybridního svařování, kde je jako přídavný zdroj tepla použit elektrický oblouk metody TIG, je využíván inventar Fronius Magic Wave 1700 Job s proudovým rozsahem 3-170 A a pracovním napětím 10,1 – 16,8 V. Na obr. 30 je znázorněno rozložení pracoviště.



Obr. 30 Rozložení svařovacího pracoviště.

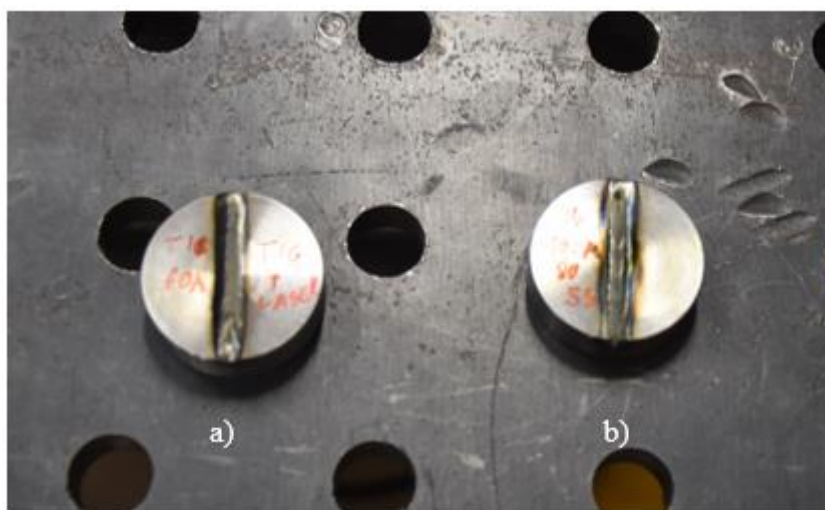
Technologií hybridním svařováním byly zhotoveny celkem dva vzorky. Jelikož byla tato technologie volena kvůli regulaci odvodu tepla bylo použito sériové zapojení (obr. 31). Hořák elektrického oblouku metody TIG (141) byl připevněn pod určitým úhlem a vzdáleností vůči svařovací hlavě. Fixaci vzorků zajišťoval příruční svěrák, ke kterému byla připojena svorka inventaru. Přibližné středové umístění svaru na plochu připraveného polotovaru ověřovalo zapnuté laserové osvětlení při průjezdu na prázdko. Množství vneseného tepla a jeho šíření od místa svaru vyhodnocovala termokamera. Výsledky však ovlivňoval odraz hořáku a špatně nastavená emisivita. Z tohoto důvodu nebyly pro vyhodnocení použity. Svařovací parametry laseru byly voleny s ohledem na bakalářskou práci a u obou vzorků byly konstantní. Nastavení inventaru jako provozní režim a typ zapalování byl odvíjen od způsobu

systémového řízení. Nejvýhodnější tak je použití dvoutaktu a bezdotykové zapálení oblouku pomocí elektrického výboje označované HF. U svařovaných vzorků tak byly proměnné pouze svařovací parametry metody TIG (141) (konkrétně proudové hodnoty) a různé konfigurace z důvodu regulace vneseného tepla. Pro přehlednější zobrazení jsou použité parametry uvedeny v tab. 14.



Obr. 31 Způsob zapojení hybridního svařování.

První vzorek byl svařován modifikací Laser-TIG (obr. 32a). Proces probíhal kontinuálně bez prodlevy a oba tepelné zdroje působily současně. Cílem tedy bylo dohřátí materiálu na teplotu 250 °C. U druhého vzorku byla použita modifikace TIG-Laser (obr. 32b) a svařování probíhalo s prodlevou. Nejprve byl proveden průjezd metodou TIG (141) a po 5 s následoval laser. Prodlevou se docílilo rovnoměrného tepelného zatížení v okolí svaru. Cílem bylo předehřátí materiálu na teplotu 300 °C.



Obr. 32 Visuální vzhled zhotovených svarů hybridním svařováním.

Tab. 14 Parametry hybridního svařování.

Parametry LASERU	
Svařovací rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	10
Výkon laseru [W]	1500
Ochranný plyn [-]	Argon 4.6
Poloha ohniska [mm]	1
Parametry metody TIG (141)	
Polarita elektrody [-]	DC-
Typ elektrody [-]	červená
Napětí [V]	12,1
Proud u vzorku č. 1 [A]	60
Proud u vzorku č. 2 [A]	100
Odklon od laserové svařovací hlavy [$^{\circ}$]	45
Vzdálenost elektrody vůči laseru [mm]	2
Vzdálenost elektrody vůči povrchu [mm]	2

5.3 Zhotovení svarů elektronovým paprskem (51) [91]

Svařování bylo realizováno na elektronové svářečce MEBW-60/2, která je zobrazena na obr. 34. Přístroj disponuje válcovou vakuovou komorou o pracovním prostoru 235x155 mm. Tato komora je z jedné strany opatřena uzavíratelným víkem s ochranným olověným sklem, kde je možná vizuální kontrola svařovacího procesu. Z druhé strany je připojen mechanismus pro čerpání vakua, který tvoří rotační a dvě turbomolekulární vývěvy. Díky tomu je komora připravená k provozu do 2 minut. Na válcovou komoru jsou navařeny celkem čtyři příruby rovnoměrně rozmístěny po 90°. Elektronové dělo je připevněno ve vodorovné poloze na levé straně vakuové komory. Spodní příruba je využívána pro manipulaci se vzorkem, který zajišťují dva stejnosměrné motory. Zbytek přírub je možné využít pro různá nastavení při připojení přípravků, které vyrovnávají nevýhodu pracovního prostoru. To je výhodou např. u svařování dlouhých trubek, kde se uvnitř nachází pouze místo svaru. Maximální výkon stroje dosahuje 2 kW. Celý proces je řízen pomocí přenosného ovládacího pultu, kde je možný jak manuální, tak poloautomatický režim svařování.

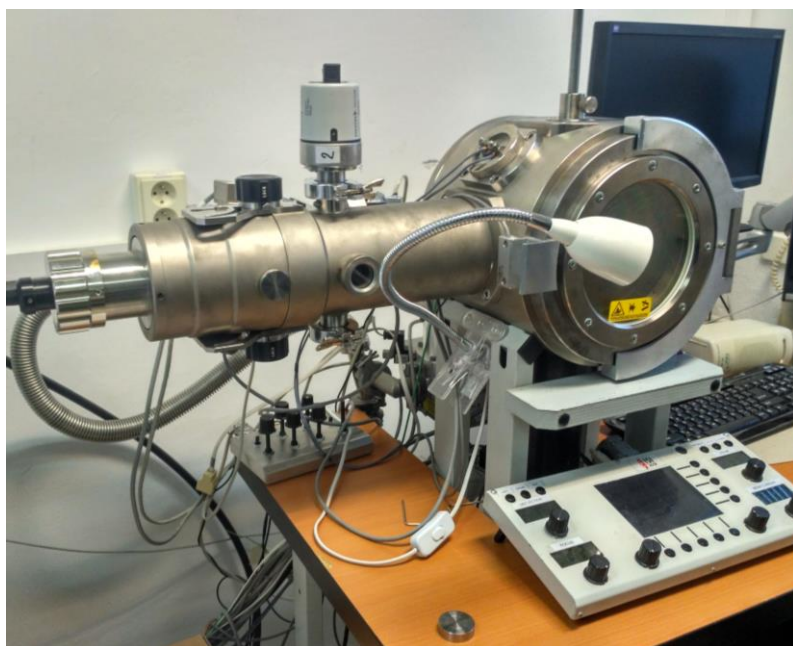
Celkem byly na jednom vzorku zhotovovány dva svary s různými svařovacími rychlostmi, které jsou uvedeny v tab. 15. Vzorek byl vložen do svařovací komory a proveden návar vedený středem. Po zavzdušnění komory došlo k jeho otočení a nanesení další housenky. U obou vzorků docházelo při svařování k nezvyklému „prskání“. Tomu odpovídá i nerovnoměrný vizuální vzhled vytvořených housenek na obr 33.

Tab. 15 Parametry elektronového svařování.

Svařovací rychlost 1. svaru [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	10
Svařovací rychlost 2. svaru [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	20
Výkon elektronového svazku [W]	1500



Obr. 33 Vizuální vzhled zhotovených svarů elektronovým paprskem.



Obr. 34 Elektronová svářečka MEBW-60/2.

5.4 Zhotovení metalografického vzorku [1], [93], [94], [12], [95]

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, příprava metalografického vzorku se skládá z několika kroků. U jednotlivých operací je nutné volit vhodnou metodiku, jelikož špatným přístupem může dojít k znehodnocení a nepřesnosti výsledků. První krok zahrnuje odebrání vzorku ze svařovaného místa. Zhotovené polotovary pro svařování mají konstantní tloušťku a průměr. Jelikož se při svařování teplotní pole šíří exponenciálně od místa soustředěného tepelného zdroje, nebude odvod tepla u kruhového profilu konstantní. Vzorky by tak měly být odebrány ze stejného místa pro zamezení nepřesností. Samotné dělení probíhalo na laboratorní rozbrušovací pile Struers Secotom – 60. Jelikož je cílem zkoumání struktury materiálu v jednotlivých svarových oblastech, vzorky byly děleny kolmo na délkovou osu svaru. Aby nedošlo k ovlivnění materiálu teplem vznikajícím při dělení vzorku, celý proces byl kontinuálně chlazen emulzí.

Po nařezání vzorků na vhodné rozměry následoval proces zalisování za tepla přístrojem Struers CitoPress-1. Na obr. 35 je zobrazen ilustrační obrázek lisovacího stroje CitoPress-15, který má stejný vizuální vzhled jako použitý typ. Vzorek byl vložen do lisovacího přístroje a zasypán pryskyřicí v podobě granulátu. Parametry procesu a množství granulátu jsou odvíjeny jak od typu zalévací pryskyřice, tak požadovaného průměru nosiče. Obchodní název zvolené pryskyřice od firmy Struers je ClaroFast, jedná se o akrylátový průhledný typ. Průměr nosiče byl stanoven na 30 mm. Na základě této konfigurace byly stanoveny lisovací parametry z tabulky doporučených lisovacích hodnot výrobcem Struers. Tyto hodnoty jsou zaneseny do tab. 16.



Tab. 16 Použité lisovací parametry.

Množství granulátu [ml]	20
Doba ohřevu [min]	4
Teplota ohřevu [°C]	180
Lisovací tlak [bar]	350
Doba ochlazování [min]	6,5
Rychlost ochlazování [-]	nízká

Obr. 35 Lisovací stroj Struers CitoPress-15. [94]

Broušení a leštění metalografického vzorku bylo realizováno za mokra na stroji Struers Tegramin – 20. V tomto procesu byly použity různé varianty brusných kotoučů, suspenzí a past s různou hodnotou zrnitosti. Pro každý kotouč byla specifická přitlačná síla, otáčky a doba broušení. Na přístroji byla zároveň nastavována i rychlost otáček pro pohyb vzorků. Rotační pohyb byl v obou případech vykonáván stejným směrem. Jednotlivé kotouče byly upevňovány k magnetickému otočnému stolu přístroje. Broušení probíhalo celkem třemi diamantovými kotouči s klesající zrnitostí brusných částic. Obchodní označení kotoučů je MD-Piano 220, 600 a 1200. Jako chladicí medium byla ve všech případech použita voda.

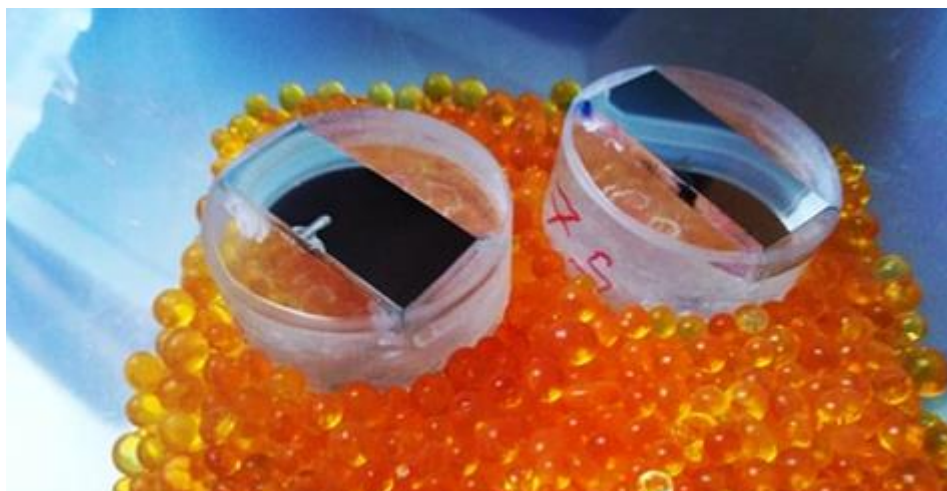
Proces leštění byl kombinován s ultrazvukovým čištěním. V první fázi byla použita diamantová suspenze o zrnitosti 9 μm s kotoučem MD-Allegro. Poté byly vzorky vyjmuty a očištěny ultrazvukovou čističkou. To je nezbytné pro důkladné odstranění zbytků odbroušeného materiálu a suspenze. Poslední fáze zahrnovala postupné leštění diamantovými

pastami o zrnitostech 3, 1 a 0,25 μm , které jsou používány s textilním kotoučem MD-Nap. Poslední uvedené kotouče mají pouze nosný význam pro diamantovou suspenzi a pasty. Shrnutí parametrů pro brousící a leštící proces je uvedeno v tab. 17. Jakost zhotoveného povrchu byla při přípravě kontrolována mikroskopem a některé operace mohly být aplikovány vícekrát. Jedná se tedy o informativní hodnoty na jejichž základě nelze stanovit přesný čas přípravy.

Tab. 17 Shrnutí použitých brusných a leštících parametrů.

Typ [-]	Přítlačná síla [N]	Otáčky kotouče [ot/min]	Otáčky vzorků [ot/min]	Čas [min]
MD – Piano 220	35	300	150	3
MD – Piano 600	30	300	150	3
MD – Piano 1200	25	300	150	5
Diam. suspenze 9 μm	25	140	140	5
Diam. pasta 3 μm	20	130	130	3
Diam. Pasta 1 μm	15	120	120	3
Diam. Pasta 0,25 μm	15	120	120	3

Poslední operací zahrnující přípravu metalografického vzorku je proces leptání. Před samotným nanesením leptadla byly vzorky namočený v destilované vodě. Tím došlo k odstranění nečistot po brousícím/leštícím procesu a lepšímu přístupu leptadla k povrchu materiálu. Pro zvýraznění kontrastu jednotlivých fází byla využita barevná metalografie. Při působení leptací látky na jednotlivé fáze dochází k tvorbě filmů, které po osvětlení vytvářejí různobarevné spektrum. Tím dochází ke zvýraznění více detailů než u běžného černobílého kontrastu. Leptadlo je označované jako Beraha a na základě koncentrací chemických látek se dělí do více podskupin. Pro vzorky byla použita v koncentraci 25 ml vody (H_2O), 25 ml kyseliny chlorovodíkové (HCl), 0,5g disiřičitanu draselného ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) a 0,7–0,8 g chloridu železitého (FeCl_3). Doba leptání vzorku byla 13 s. Hotové vzorky jsou znázorněny na obr. 36.



Obr. 36 Vyhotovené metalografické vzorky.

5.5 Vyhodnocení mikro a makrostruktury [96], [97], [4]

Struktura vzorků byla v obou případech zkoumána pomocí 3D laserového konfokálního mikroskopu od firmy KEYENCE řady VK-X (obr. 37). Mikroskop kombinuje bílé a laserové světlo. Díky tomu lze získat nejen vizuální stav struktury, ale také jeho povrchový reliéf. Vzorky jsou pokládány na stůl mikroskopu a skenování je prováděno automaticky pomocí softwaru. Ten poté provede převod naměřených hodnot povrchového reliéfu do 3D modelu. Jelikož vzorky byly zkoumány za účelem vizuálního stavu struktury, hodnocení povrchového reliéfu nebylo provedeno.



Obr. 37 3D laserový konfokální mikroskop KEYENCE. [96]

Jako první byla zkoumána makrostruktura vzorků svařených hybridní technologií, na kterou je kladen největší důraz. Na základě makrostruktury lze provést prvotní vyhodnocení kvality spoje a mechanických vlastností. Ty jsou závislé především na hrubosti a stejnorodosti struktury.

U vzorku č. 1 (obr. 38), který byl svařován konfigurací Laser-TIG, byl předpoklad dohřevu 250 °C. Na první pohled je patrné, že parametry přídatného tepelného zdroje metody TIG (141) byly předimenzovány. Následkem toho při procesu docházelo k přetavení již zhotoveného svaru laserem. Dále je viditelné vyosení hořáku a nerovnoměrné teplotní zatížení materiálu. Struktura svarového kovu je obecně závislá na teplotním gradientu a rychlosti tuhnutí. Tyto parametry ovlivňují sklon a velikost růstu dendritických zrn. Čím vyšší je teplotní gradient, tím jemnější je struktura svarového kovu a naopak. Teplotní gradient je nepřímo úměrný tepelnému příkonu. V oblasti hlavy svarového spoje (působení obou metod) byl vyšší tepelný příkon než u kořene (působení pouze laseru). Na základě toho došlo pravděpodobně k tvorbě hrubší struktury v horní části spoje. Rozdílné budou i mechanické vlastnosti materiálu (tažnost, houževnatost), které jsou lepší u jemnozrnné struktury. Plyny uvolněné tavením materiálu v kořenové oblasti nestačily uniknout na povrch a vytvořily makropór o přibližném průměru 460 μm . Teplotně ovlivněná oblast je v levé části svarového spoje téměř zanedbatelná. Kdežto v pravé části, kde došlo k vychýlení hořáku, je tato oblast znatelně širší.

Stejně jako u vzorku č. 1 tak u vzorku č. 2 (obr. 39) došlo k předimenzování parametrů metody TIG (141) a vychýlení hořáku. Zde byla použita konfigurace TIG-Laser s prodlevou a

účelem tedy bylo předejít materiálu na 300 °C. Na základě tohoto nastavení došlo k rovnoměrnému tepelnému zatížení a vytvoření více homogenní struktury. Sled operací dále nezpůsobil rozmíchání svarové lázně laseru a na struktuře je viditelná charakteristická středová osa. Rozdíly míry hrubosti struktury v jednotlivých oblastech nejsou tedy tak markantní. Struktura nevykazuje žádné póry ani jiné defekty. Teplotně ovlivněná oblast je ve všech částech téměř konstantní. Dále byly sníženy rozměry svarového spoje a zvýšen průvar. Hodnoty rozměrů obou vzorků jsou zobrazeny v tab. 18. Podrobnější zakótování je uvedeno v příloze. 2.



Obr. 38 Snímek makrostruktury vzorku č. 1.



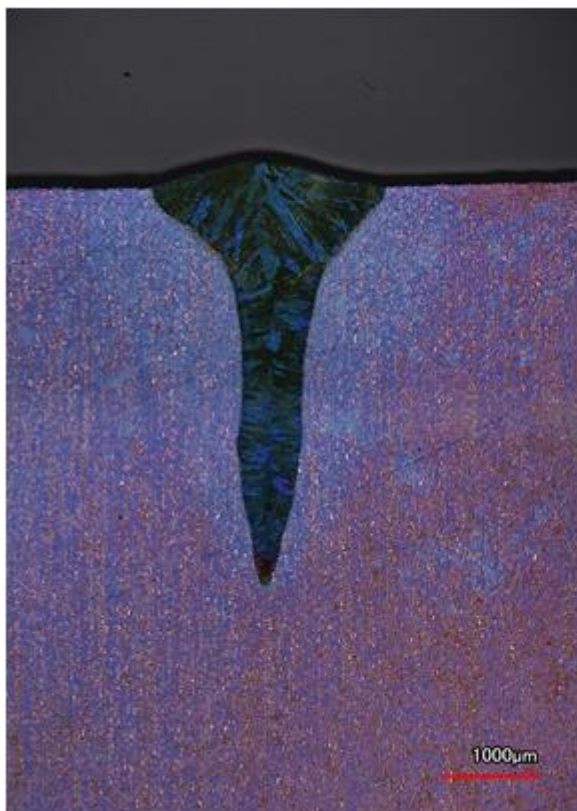
Obr. 39 Snímek makrostruktury vzorku č. 2.

Tab. 18 Hodnoty rozměrů svarů zhotovených hybridním svařováním.

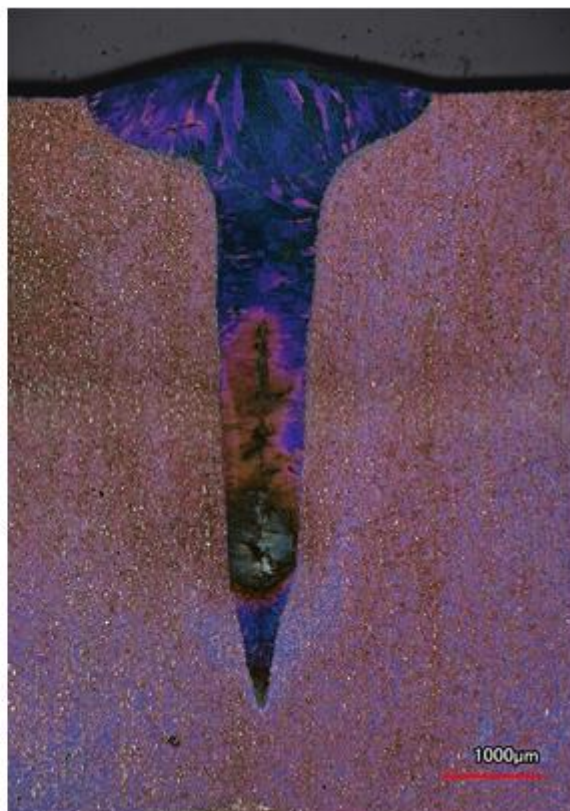
Vzorek [-]	Hloubka svaru [μm]	Šírka hlavy [μm]	Šírka kořene [μm]
č. 1	3483,288	4731,124	1522,287
č. 2	3499,022	4606,866	1036,947

Pro vzorek zhotovený různými svařovacími rychlostmi elektronovým paprskem bude pro lepší odlišení jednotlivých svarů použito označení Ev20 a Ev10. První písmeno označuje použitou metodu a druhé svařovací rychlost. Na snímku struktury svaru zhotovovaného vyšší rychlostí (obr. 40) lze opět pozorovat proměnou hodnotu růstu zrn. Hlava svaru je tvořena hrubou strukturou s dlouhými a silnými zrny. Poměr teplotního gradientu a rychlosti tuhnutí byl pro tuto metodu mnohem větší. S největší pravděpodobností to bylo způsobené vakuem při svařovacím procesu. Na základě toho nedocházelo k rychlému odvodu tepla, jako při svařování v ochranných atmosférách. S rostoucí hloubkou průvaru byl tento poměr vyrovnáván. Velká zrna jsou náchylnější na tvorbu trhlin při tuhnutí materiálu. V kořenové části svarového spoje se opět nachází pór. Teplotně ovlivněná oblast dosahuje největších rozměrů v části hlavy svarového spoje.

Struktura svaru zhotoveného nižší svařovací rychlostí (obr. 41) obsahuje značné množství trhlin. Jak podélných v části hlavy, tak příčných ve svarové ose. Pravděpodobně se jedná o trhliny vzniklé za tepla. Ty byly způsobeny delším soustředěním elektronového svazku do svařovaného místa. Tepelný příkon tak byl v tomto případě vyšší. To dokazuje i strmý růst zrn v části hlavy svaru. Při chladnutí materiálu tak docházelo k tvorbě kritického pnutí. Delší fokusace měla dále vliv na hloubku průvaru a celkový vzhled svaru. Hodnoty rozměrů svarů zhotovených elektronovým paprskem jsou uvedeny v tab. 19.



Obr. 40 Snímek makrostruktury vzorku Ev20.

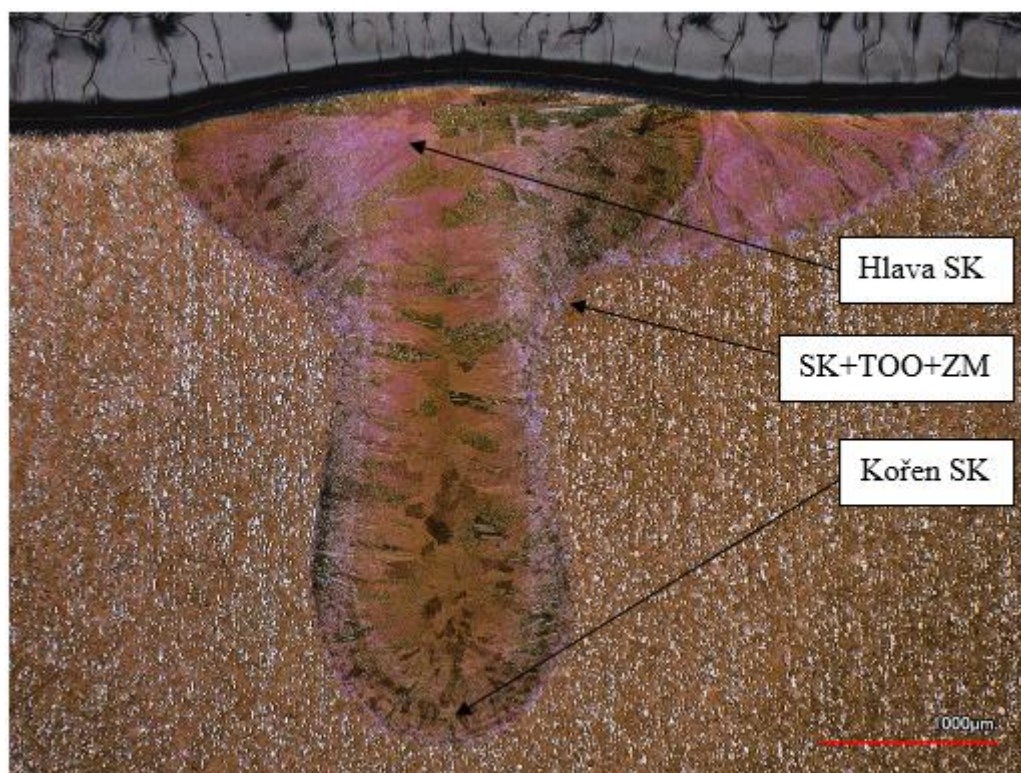


Obr. 41 Snímek makrostruktury vzorku Ev10.

Tab. 19 Hodnoty rozměrů svarů zhotovených elektronovým paprskem.

Svar [-]	Hloubka svaru [μm]	Šírka hlavy [μm]	Šírka kořene [μm]
Ev10	6154,895	3543,254	967,848
Ev20	4001,408	2398,594	681,753

Hodnocení mikrostruktury bylo realizováno pouze na vzorku svařovaného hybridní technologií v modifikaci Laser-TIG. Jelikož v žádném případě nebyl použit přídavný materiál, nemohlo dojít k výrazné změně struktury a mechanismus tvorby bude u všech metod stejný. Při hodnocení mikrostruktury tento vzorek neobsahoval žádné defekty. Na obr. 42 jsou zobrazeny místa zvětšených zkoumaných oblastí.



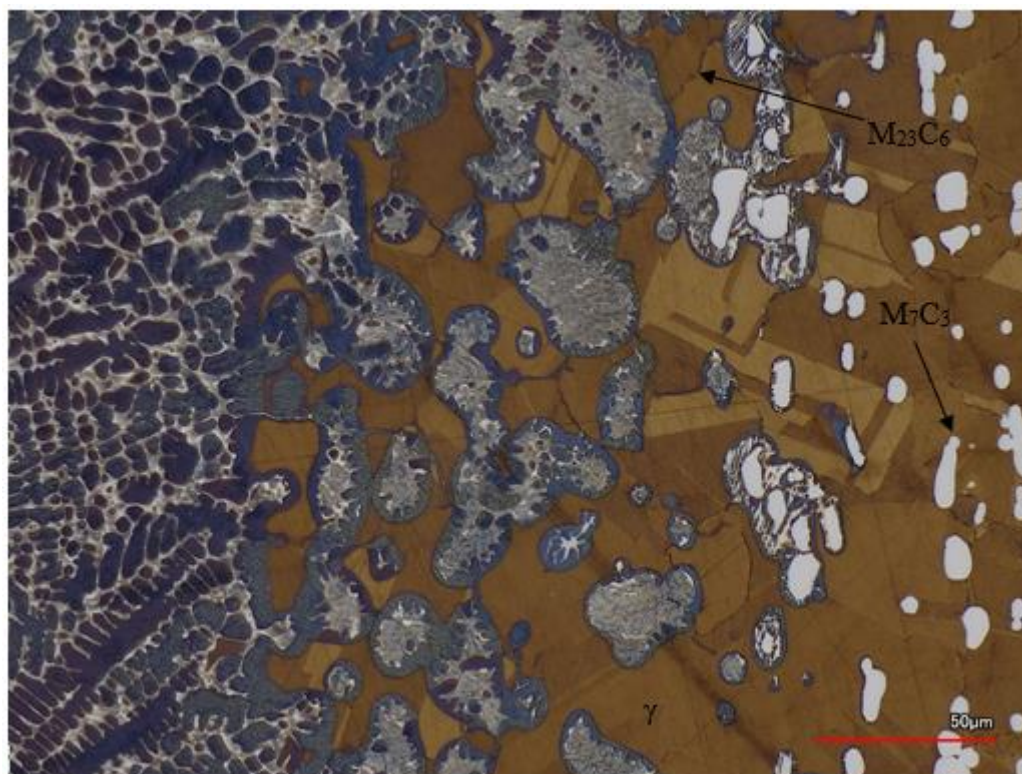
Obr. 42 Znárodnění míst zkoumaných oblastí.

Struktura základního materiálu je tvořena tuhým roztokem γ bohatým na Co a karbidy bohatých na Cr. Jednotlivé strukturní složky a typy karbidů základního materiálu jsou uvedeny na obr. 43. Kromě rozdílného obsahu primárního prvku Cr u obou typů, jsou odlišné i teploty tavení. Ty se u karbidů typu M_7C_3 pohybují v rozsahu 1600-1800 °C a u M_{23}C_6 kolem 1000-1100 °C. M_{23}C_6 tak při ochlazování tuhne jako poslední a jsou vylučovány na hranicích zrn.

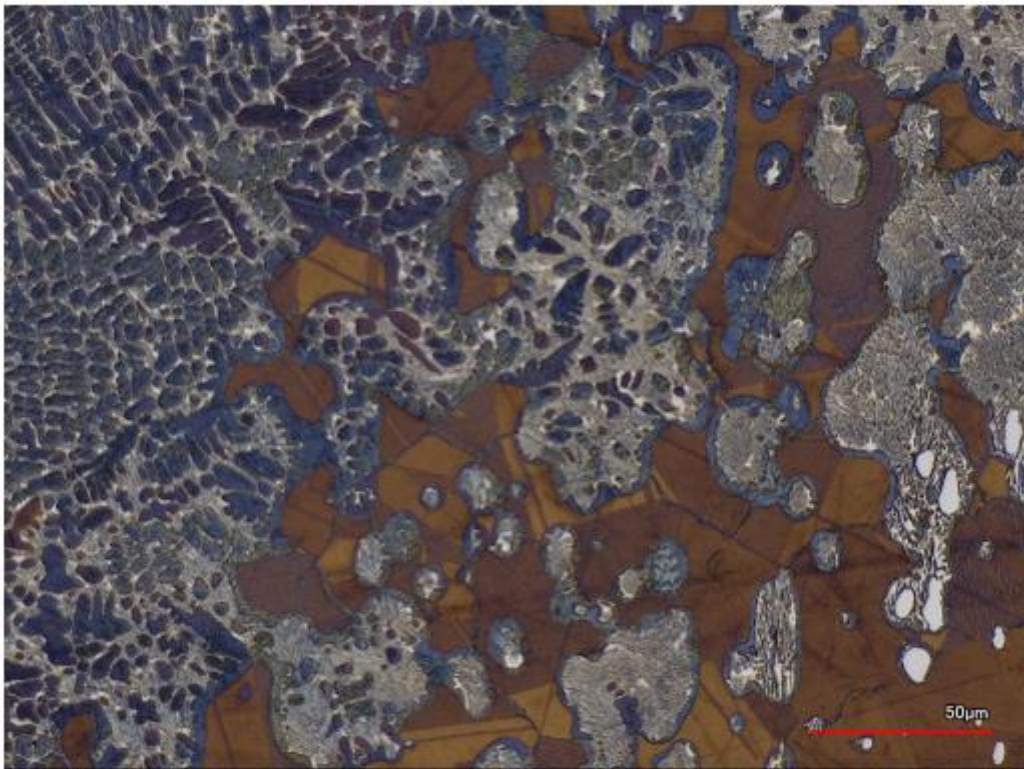
Procesem svařování dochází k rozpuštění všech typů karbidů a vzniku nových fází. Struktura svarového kovu je tvořena dendrity tvořenými tuhým roztokem γ (tmavé fáze), které mají na hranicích zrn vyloučené karbidy (světlé fáze). Dendrity tak byly vylučovány primárně z taveniny a až s poklesem teploty začal být vyplňován mezidendrický prostor karbidy. Hlavní složkou těchto karbidů je stále Cr, ale mohou být přítomny i další karbidotvorné prvky obsažené ve slitině, zejména W a Mo. Velikost a tvar těchto karbidů se odvíjí od rychlosti tuhnutí a chemického složení v daném místě. V případě kořene svaru (obr. 45) byl vysoký teplotní gradient a docházelo k rychlému tuhnutí taveniny. To mělo za následek vznik jemnozrné struktury. Karbidy jsou v tomto případě jemné, jelikož C s karbidotvornými prvky

(Cr, Mo, W) neměl příliš času na precipitaci z taveniny. Je tedy pravděpodobné, že tuhý roztok v této oblasti nebyl o tyto prvky ochuzen a nedošlo především k velké ztratě korozní odolnosti. Kdežto u hlavy svaru obr. 46 byl teplotní gradient nízký. Na snímku je viditelná hrubozrná struktura a rozsáhlejší mezidendritický prostor. Svar tak v této části bude o legované prvky více ochuzen a míra korozní odolnosti bude nižší. Dalším následkem ochlazování je větší rozteč dendritických ramen. V obou případech lze na struktuře pozorovat zvětšená jednotlivá lící zrna. Vliv lokálního chemického složení lze pozorovat na obr. 43 a 44, kde jednotlivé karbidy mají odlišnou barvu. Čím vyšší obsah Cr, tím jsou karbidy světlejší. V této souvislosti lze pozorovat i změnu odstínu tuhého roztoku svarového kovu. U tmavších míst je výskyt světlejších karbidů => menší obsah Cr.

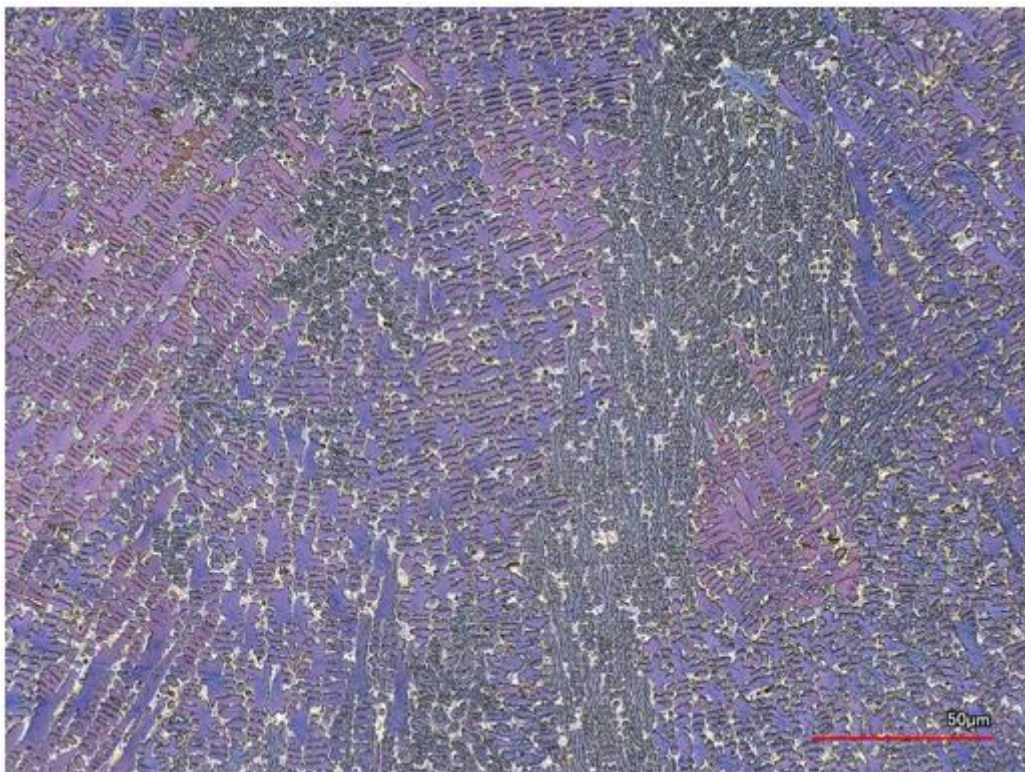
Největší část teplotně ovlivněné oblasti je tvořena rozpuštěnými nebo částečně natavenými karbidy. Teplota v tomto místě již nebyla dostatečná k roztavení tuhého roztoku. Kolem natavených ostrůvků lze pozorovat stejné zbarvení jak u tuhého roztoku neochuzeného o Cr ve svarovém kovu. Je tedy zřejmé, že při rozpuštění karbidů došlo k difuzi Cr do tuhého roztoku, a tím k posílení jeho korozní odolnosti. S rostoucí vzdáleností od svarového kovu rozpustnost těchto karbidů klesá. U karbidů M_7C_3 tak lze pozorovat nedotčený střed. Kdežto karbidy $M_{23}C_6$ mají nižší teplotu tavení a mohou tak být taveny i ve větší vzdálenosti než M_7C_3 .



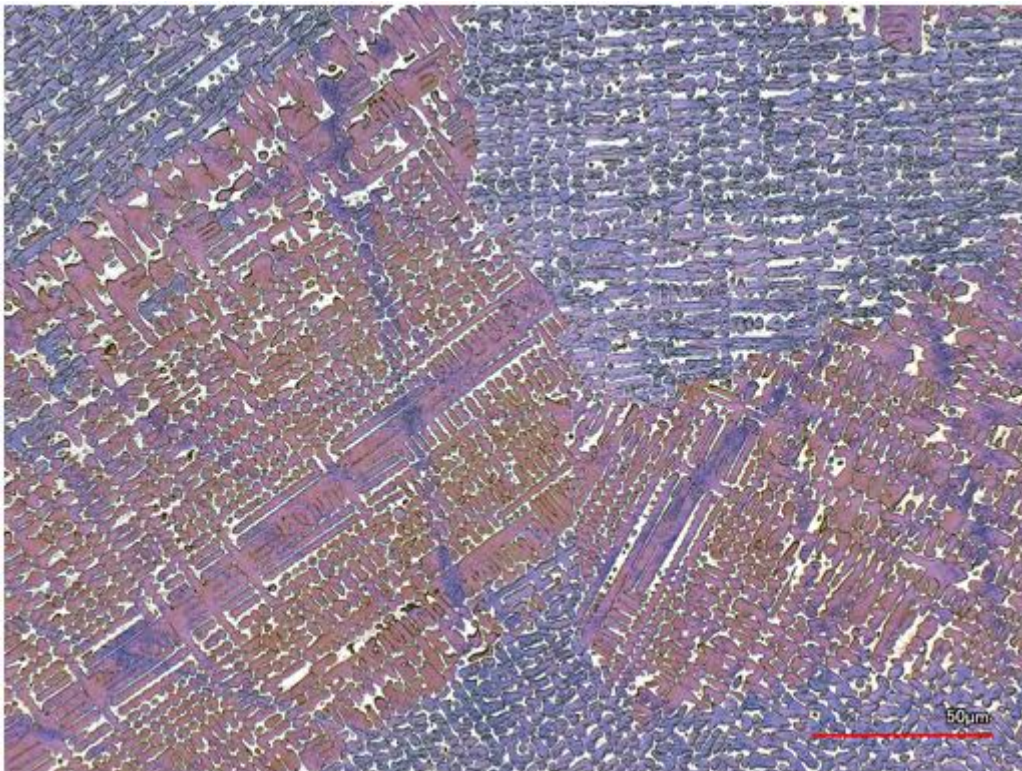
Obr. 43 Snímek mikrostruktury z části SK+TOO+ZM.



Obr. 44 Snímek mikrostruktury tavení karbidů M_7C_3 a $M_{23}C_6$.



Obr. 45 Snímek mikrostruktury z části KOŘEN SK.



Obr. 46 Snímek mikrostruktury z části HLAVA SK.

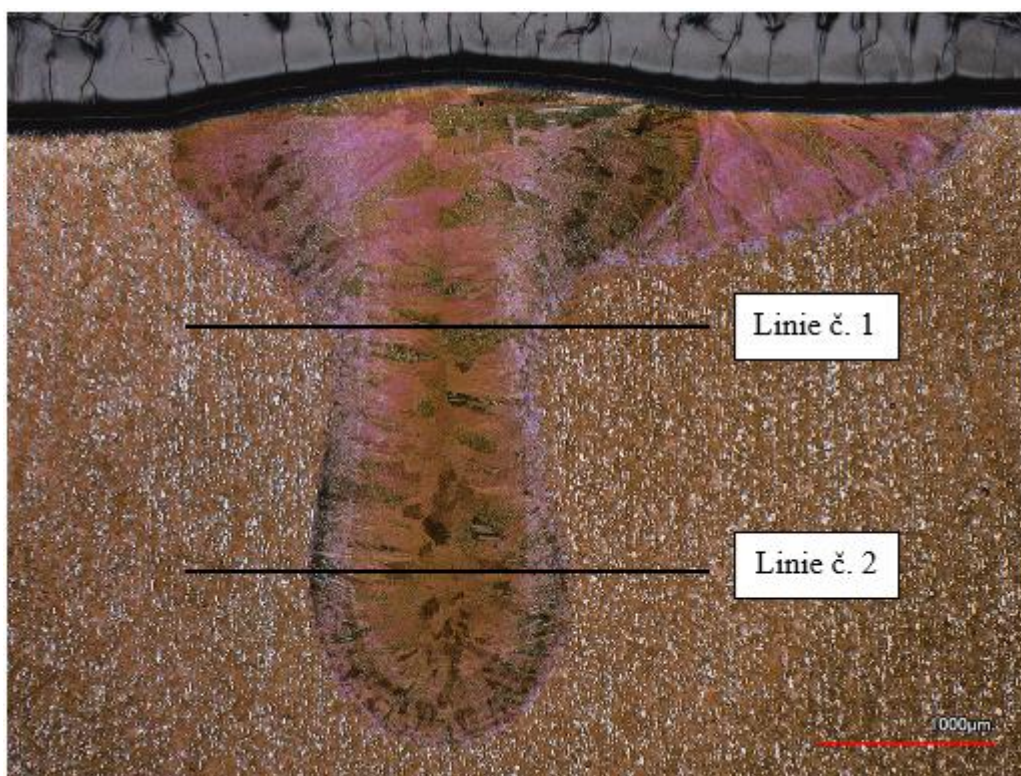
5.6 Vyhodnocení tvrdosti dle Vickerse [98]

Měření tvrdosti probíhalo na automatickém tvrdoměru a mikrotvrdoměru Qness řady Q10A a vyhodnoceno softwarem Qpix Control 2. Označení Q10 udává možnosti rozsahu zkušebního zatížení působícího na vzorek (0,49-98,1N) a písmeno A rozsah vybavení. Na obr. 47 je vyobrazen typ měřicího zařízení. Měřicí indentory a zvětšující objektivy jsou osazeny na šestiosé revolverové hlavě. Díky tomu je možné na přístroji měření tvrdosti i více metodami (Vickers, Brinell, Knoop). Pohyb indentoru a objektivů je realizován v ose Z, která je kolmo k měřicímu stolu. Ten zajišťuje přesné polohování měřeného vzorku ve zbylých osách X a Y. Každá z těchto os je vybavena optickými pravítky pro přesnost a opakovatelnost měření.



Obr. 47 Tvrdoměr a mikrotvrdoměr Qness Q10A+. [98]

Měření tvrdosti probíhalo ve 2 liniích procházejícími všemi částmi spoje. Každá linie obsahuje 21 vpichů ve vzdálenosti 0,2 mm. Původní požadavek byl měření mikrotvrdosti se zatížením HV0,1. Toto zatížení však nebylo možné použít, jelikož vyhotovené vpichy byly příliš malé a nešlo provést jejich vyhodnocení. Měření tak muselo být realizováno se zatížením HV0,5 a jedná se tedy o typ zkoušky tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení. Použitá doba zatížení byla standartní v rozsahu 10–15 s. V rámci komplexního řešení byl do této části, kromě vzorku č. 2 zařazen i vzorek z bakalářské práce svařovaný stejnými parametry laseru. Stejně jako uvedené vzorky bez použití předehtřevu a je označen jako vzorek č. 3. Velký rozsah svaru znemožnil zhotovení snímku měřených linií. Z tohoto důvodu jejich přibližnou pozici znázorňuje obr. 48. U obou vzorků bylo měření zhotovováno na stejných místech, a proto není třeba uvádět oba typy.

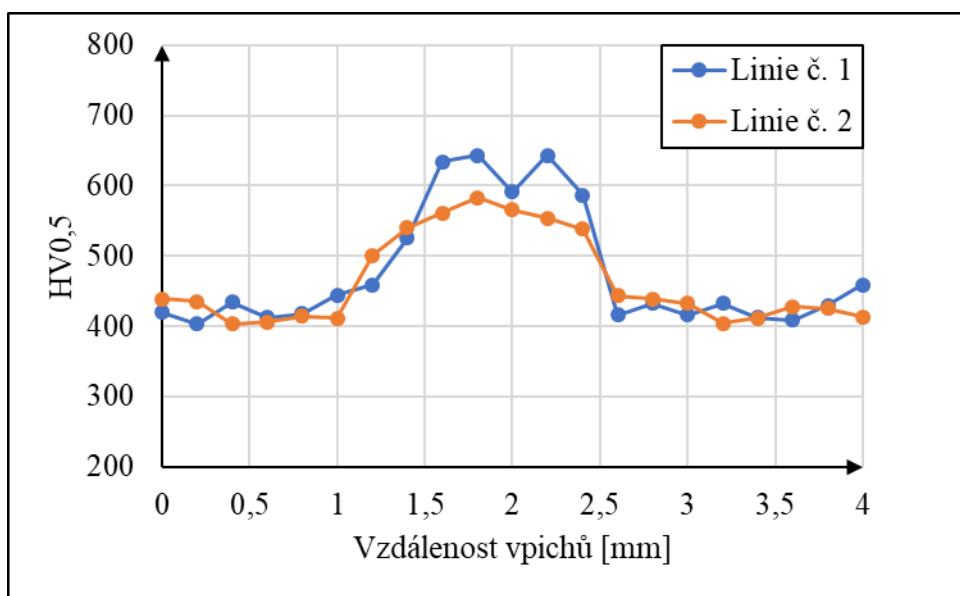


Obr. 48 Naznačení pozic měřených linií.

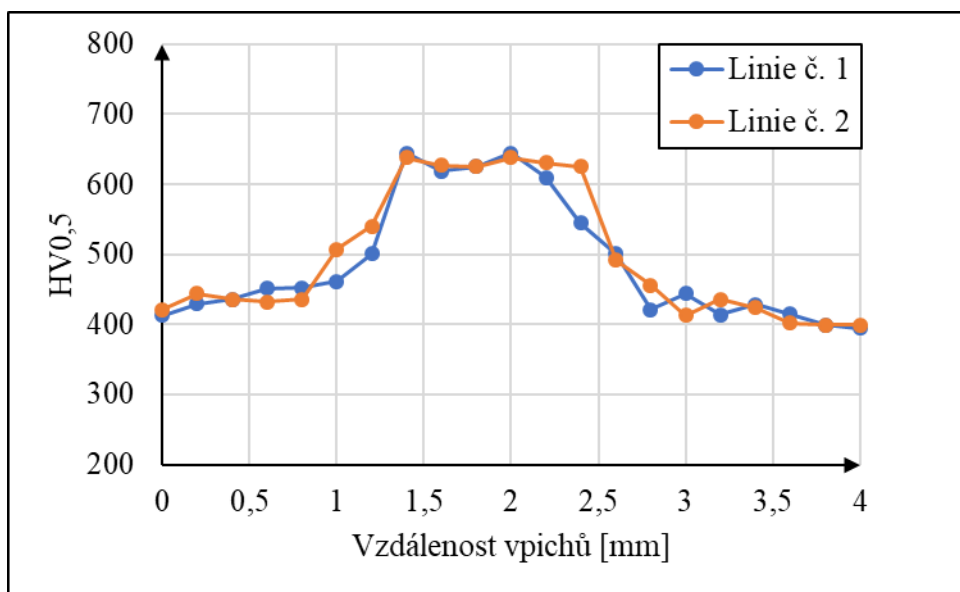
Na obr. 49 je uveden graf naměřených hodnot tvrdostí v závislosti na vzdálenosti pro vzorek č. 2. Průběh obou měřených linií je konstantní v rozmezí 0–1 a 2,6–4 mm, jedná se tedy o základní materiál. Nepatrný výkyv je způsoben lokálním výskytem karbidů. Prudké změny tvrdosti mezi měřenými liniemi nastávají v teplotně ovlivněné oblasti a svarovém kovu. Rozsahy těchto oblastí jsou u teplotně ovlivněné oblasti 1–1,2 mm a 2,5–2,6 mm a u svarového kovu 1,2–2,6 mm. Vyšší tvrdost první linie ve svarovém kovu je způsobena menší rychlostí tuhnutí, která se odrazila jak v hrubozrnné struktuře, tak větším množstvím tvrdých karbidů. Dále je znatelný skokový nárůst tvrdosti pravé strany. Zde měla tavenina více času na precipitaci karbidů, jelikož v tomto místě byl svar více tepelně namáhán vychýleným hořákem. U linie č. 1 je viditelná stoupající tendence a konstantnější průběh. Průměrné hodnoty měřených linií jsou 477 (linie č. 1) a 464 (linie č. 2) HV0,5. Na základě těchto aspektů lze potvrdit lepší mechanické vlastnosti ve spodní části svarového spoje než na povrchu.

Grafický průběh tvrdosti u vzorku č. 3 znázorňuje obr. 50. Obě linie zde dosahují přibližně stejných hodnot. Mírnou změnu lze pozorovat na pravé straně grafu v teplotně ovlivněné oblasti. Zde má nárůst tvrdosti oproti ostatním konstantnější průběh. Pravděpodobně to způsobil menší lokální výskyt karbidů základního materiálu. Hodnoty průměrných tvrdostí jsou 488 (linie č. 1) a 496 (linie č. 2). Pro tyto linie však platí stejný mechanismus jak v předchozím případě. Zde však bylo tuhnutí pomalejší uvnitř kovu, a proto je tato hodnota vyšší (větší čas na precipitaci karbidů).

V celkovém hodnocení však s průměrnými hodnotami nelze úplně počítat, jelikož jsou silně ovlivněny lokálním výskytem karbidů v základním materiálu. Z těchto hodnot by se tak mohlo zdát, že linie č. 1 u vzorku č. 2 dosahuje nižších hodnot jako stejná linie u vzorku č. 3. Při svařování však karbidy u vzorku č. 2 měly více času percipovat a vytvořit tvrdší fáze. Směrodatnější tak jsou grafické průběhy a hodnoty bodů v jednotlivých oblastech. Značným rozdílem jsou hodnoty linií č. 2. Jedna z možných příčin je odlišná hloubka průvaru, která je u vzorku č. 3 vyšší přibližně o 0,3 mm. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 3, 4.



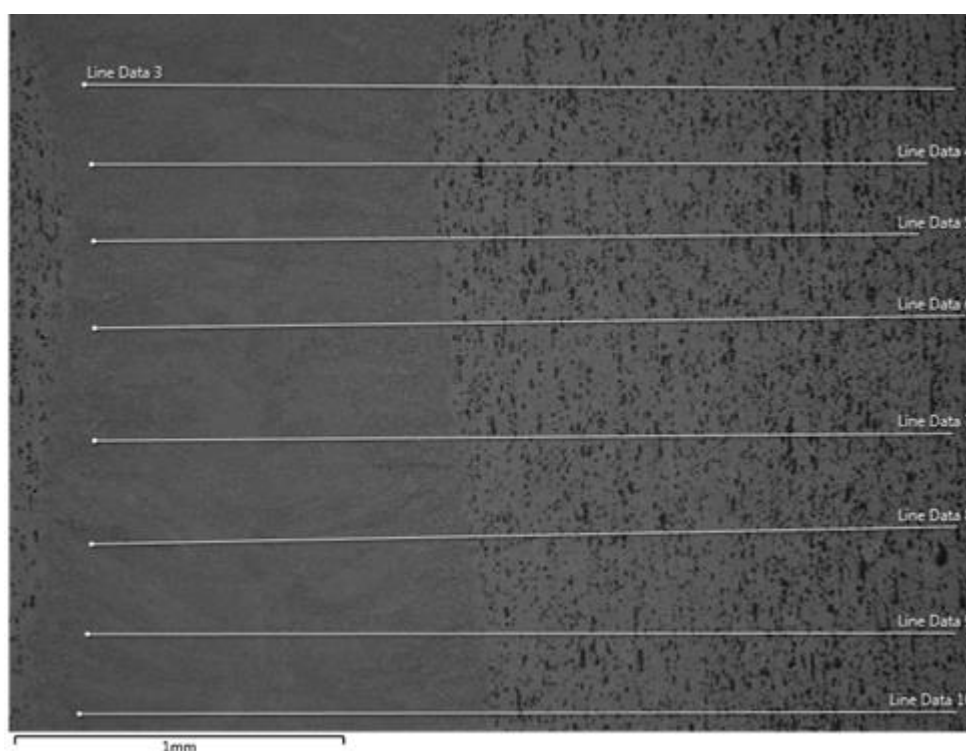
Obr. 49 Graf průběhu tvrdosti pro vzorek č. 2.



Obr. 50 Graf průběhu tvrdosti pro vzorek č. 3.

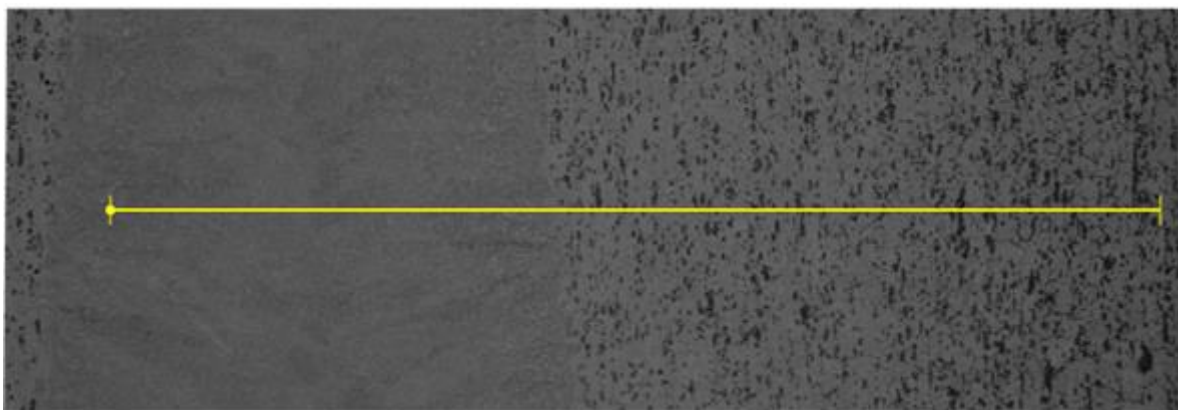
5.7 Vyhodnocení chemického složení pomocí EDS analýzy [58]

Měření chemického zastoupení prvků probíhalo na elektronovém rastrovacím mikroskopu PHILIPS XL30 EDAX, který je vybaven zařízením pro EDS analýzu. Cílem bylo ověření chemického složení v jednotlivých oblastech svarového kovu. Typ zkoumaných prvků byl volen s ohledem na náchylnost k tvorbě karbidů a vlastnostem, které slitině dodávají. Největší důraz byl kladen zejména na Cr, který má po Co největší prvkové zastoupení. V případě ochuzení tuhého roztoku o tento prvek, ztrácí slitina v daném místě svoji korozní odolnost. U svařování jsou dvě možnosti, jak může k ochuzení dojít. Vypařením při tavení nebo precipitací karbidů z tuhého roztoku. Na základě zkušeností personálu byl pro zkoumání zvolen pouze vzorek č. 3. Mechanismus tvorby svarového kovu je všude stejný, a tak je zbytečné provádět analýzu u více vzorků. Nejvhodnější typ zkoumání za tímto účelem byla liniová analýza. Celkem bylo zhotoveno 10 linií (obr. 51), jejichž výsledky však byly neměnné. Z tohoto důvodu je podrobněji rozebrána pouze linie č. 7.

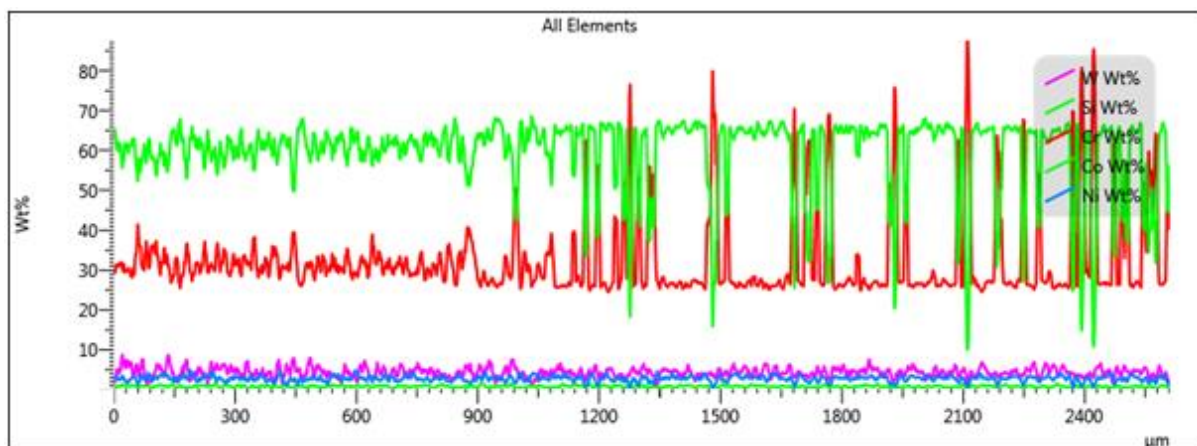


Obr. 51 Místa měření prvkové analýzy.

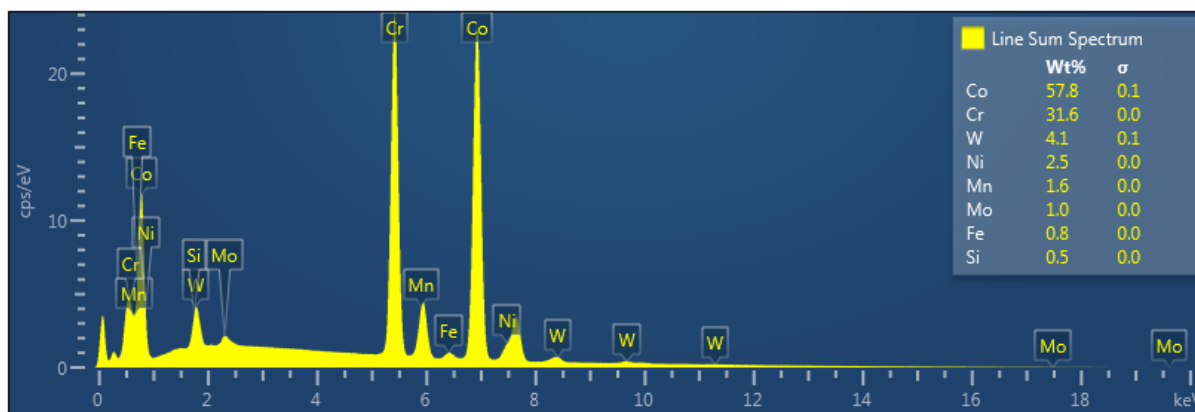
Na obr. 52 je zobrazeno zvětšení měřené linie, ke které se vztahují výsledky z obr. 53. Z grafického vyhodnocení je zřejmý pokles Co při prudkém nárustu Cr. To je dáno výskytem karbidů. Je patrné, že v základním materiálu je kolísání výraznější, jelikož se zde nachází velké množství karbidů M_7C_3 a $M_{23}C_6$. V teplotně ovlivněné oblasti jsou tyto rozdíly mírnější, zde došlo k úplnému nebo částečnému rozpuštění karbidů. Část Cr obsaženého v karbidech tak měla prostor na přechod do tuhého roztoku a jeho posílení. U svarového kovu jsou rozdíly v obou případech konstantní. V místech, kde je nárůst obsahu Cr, se jedná o mezidendritický prostor složený z karbidů. Slitinu lze považovat za korozivzdornou, pokud množství legujícího prvku Cr neklesne pod 12 hm. %. Nejnižší obsah Cr ve svarovém kovu je 22 hm. %, což je pro dodržení pasivity dostačující. Dále je možné pozorovat rostoucí píky W zároveň s Cr, uhlík tak stihl navázat i další prvek. V některých místech tuhého roztoku tak dosahuje nulové nebo minimální hodnoty. Bude tak pravděpodobně ovlivněna korozní odolnost vůči některým vlivům a pevnost tuhého roztoku. Obr. 54 uvádí průměrné hodnoty prvků spolu s jejich intenzitou záření.



Obr. 52 Zvětšená měřená linie č. 7.



Obr. 53 Grafické zobrazení výsledků linie č 7.



Obr. 54 Grafické zobrazení intenzit vyzářených prvků a jejich průměrné hodnoty.

ZÁVĚRY

Cílem diplomové práce bylo ověření svařitelnosti kobaltových slitin různými svařovacími technologiemi a parametry. Vhodnost dané technologie byla posuzována s ohledem na snížení potřeby přídavného materiálu. V budoucnu je očekáván prudký nárůst cen slitin a tím i svařovacích materiálů. Některé oblasti by tak tuto slitinu musely přestat využívat kvůli vysoké ekonomické náročnosti. Zvolené technologie by mohly být odpovědí na daný problém a nerentabilitu částečně potlačit. Na základě těchto aspektů se jako ideální jeví technologie elektronového a hybridního svařování kombinující laserový paprsek s obloukovým svařováním metody TIG (141). Zkoumaným materiálem byla otěruvzdorná slitina s označením Stelit 6B. Zmíněnými metodami byly celkem vyhotoveny 3 vzorky a jejich kvalita byla následně hodnocena destruktivními metodami.

Jako první bylo realizováno hodnocení makrostruktury, od kterého byly odvíjeny další typy zkoumání. Vzorek č. 1 byl svařován kontinuálně konfigurací Laser – TIG. Svarový kov vykazoval nehomogenní strukturu obsahující makropór v kořenové části. U vzorku č. 2 byla použita konfigurace TIG – Laser, kde jednotlivé tepelné zdroje působily s prodlevou. Tepelné zatížení materiálu tak bylo rovnoměrně rozložené a struktura v tomto případě byla stabilnější bez viditelných defektů. Na poslední vzorek byly navařovány 2 svarové housenky pomocí elektronového paprsku s různými rychlostmi. Dle těchto rychlostí jsou zkoumané oblasti odlišovány označením jako Ev10 a Ev20. Proces svařování byl doprovázen nezvyklým „prskáním“. To se odrazilo na špatném vizuálním vzhledu svaru. Svar Ev10, zhotovený pomalejší svařovací rychlostí, obsahuje hrubozrnnou strukturu s viditelnými trhlinami. U druhého svaru nebylo vnesené teplo tak velké a je viditelná pouze hrubozrnná struktura s mikroportem v kořenové části. Podrobnější zkoumání tak mělo význam pouze u vzorku č. 2.

Pro detailnější rozbor bylo použito hodnocení mikrostruktury, tvrdosti dle Vickerse a prvková analýza EDS. Struktura svarového spoje je složená z dendritů tuhého roztoku bohatého na Co a mezidendritický prostor je vyplněn karbidy bohatých na Cr. V oblasti hlavy bylo tuhnutí pomalejší než u kořene. To mělo za následek vznik hrubozrnné struktury s větším množstvím karbidů. Byl zde tedy předpoklad horších mechanických vlastností. To potvrdila zkouška dle Vickerse prováděná ve dvou liniích, kde linie blíže k povrchu vykazovala větší tvrdost. Teplotně ovlivněná oblast obsahuje velké množství natavených karbidů M_7C_3 a $M_{23}C_6$. Kolem těchto karbidů jsou oblasti tuhého roztoku světlejší. EDS analýza v těchto místech odhalila vyšší množství Cr. Při natavení tak Cr přešel do tuhého roztoku. Nejnižší hodnota Cr ve svarovém kovu je kolem 22 hm. %. Výrazný pokles však nastal u W, kde v některých oblastech tuhého roztoku není obsažen. Slitina tak ve svarovém kovu ztratila korozní odolnost pouze vůči některým vlivům.

Na základě výsledků všech zkoušek lze vzorek č. 2 považovat za vyhovující. Kobaltové slitiny je tak možné svařovat hybridní technologií v konfiguraci Laser-TIG. Do budoucna však bude nezbytná úprava parametrů metody TIG (141), kvůli vyrovnání mechanických vlastností svarového spoje. Aplikace elektronového svařování pro tyto slitiny by byla možná po optimalizaci parametrů. S ohledem však na větší náklady a horší možnost automatizace spojené s procesem ve vakuu, bude hybridní svařování lepším řešením.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HERČÍK, Tomáš. *Kobaltové slitiny a jejich svařitelnost*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
2. ROGERS, Kara, ed. Cobalt. In: *Encyklopedia Britannica* [online]. Encyclopædia Britannica [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/cobalt-chemical-element>.
3. History of Cobalt. *Cobalt Institute* [online]. Velká Británie: Cobalt Institute, 2017 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.cobaltinstitute.org/history-of-cobalt.html>.
4. DAVIS, Joseph, ed. *Nickel, cobalt, and their alloys*. Materials Park, OH: ASM International, c2000. ISBN 0-87170-685-7.
5. Svařovací a řezací technika. In: *Hanousek* [online]. Pardubice: Hanousek, c2020 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.hanousek.cz/svarovaci-a-rezaci-technika>.
6. Životnost baterií elektromobilů? VW přiznal reálná čísla a co vše je ovlivní. In: *Autoroad* [online]. Praha: Autoroad, 2019 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://autoroad.cz/technika/96345-zivotnost-baterii-elektromobilu-vw-priznal-realna-cisla-a-co-vse-je-ovlivni/fotografie-364305>.
7. GUNN, Gus, ed. *Critical metals handbook*. Chichester: American Geophysical Union, 2014. ISBN 978-0-470-67171-9.
8. ZHAO, Yiran, Xiangyun GAO, Haizhong AN, Xian XI, Quingru SUN a Meihui JIANG. The effect of the mined cobalt trade dependence Network's structure on trade price. In: *ScienceDirect* [online]. 2020 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420719307263>.
9. RAMKUMAR, Amrith. Battery Metals Slide as Other Commodities Stabilize. In: *The Wall Street Journal* [online]. New York: Amrith Ramkumar, 2019 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.wsj.com/articles/battery-metals-sliding-as-other-commodities-stabilize-11574254801?mod=searchresults&page=1&pos=18>.
10. Cobalt Demand. In: *Global Energy Metals Corp* [online]. Vancouver: Global Energy Metals [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.globalenergymetals.com/cobalt/cobalt-demand/>.
11. Mineral - Cobalt - Local Miners - Cobalt Ore New. In: *Global Business Connection* [online]. Kabwe: Global Business Connection, 2020 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://gbc.net.br/anuncio/detalhe-anuncio/divisao/4/id/92?fbclid=IwAR3mQ-QLAQAHberjsxqlulJpanzgKIv-8oOaW-TjIZzmWOcHvJXw2WWd47k>.
12. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. I. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s. : il. ISBN 80-7204-283-1.

13. Abrazivní opotřebení kovových materiálů. In: *Tribotechnika* [online]. Žilina: TechPark, 2019 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>.
14. Jaký je rozdíl mezi druhy opotřebení? In: *E-konstrukter* [online]. Praha: E-konstrukter, 2016 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-druhy-opotrebeni>.
15. Kavitační opotřebení. In: *Tribotechnika* [online]. Žilina: TechPark, 2019 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12011/kavitacni-opotrebeni.html>.
16. Stellite 6 Alloy, eng. In: *Deloro* [online]. Koblenz: Deloro [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: https://www.deloro.com/fileadmin/users/redakteur/006_Downloads/Data_Sheets/Deloro_MDS_Stellite6_rev00.pdf.
17. Stellite 12 Alloy, eng. In: *Deloro* [online]. Koblenz: Deloro [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: https://www.deloro.com/fileadmin/users/redakteur/006_Downloads/Data_Sheets/Deloro_MDS_Stellite12_rev00.pdf.
18. Stellite 12. In: *CCTTC* [online]. CTTC, 2015 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://ccttc.com/materials/Special-Alloy/45/410/Stellite-12.html>.
19. Stellite 12. In: *Rooplaxmi Steels* [online]. Bombaj: Rooplaxmi Steels [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <http://rooplaxmisteels.com/stellite12.html>.
20. Inhibitory koroze. In: *Kurita* [online]. Ludwigshafenu: Kurita [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.kurita.eu/cz/corrosion-inhibitors>.
21. Nové technické normy. In: *Normservis* [online]. Žďár nad Sázavou: Normservis [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.normservis.cz/normalizace/nove-technicke-normy/>.
22. Dynamic Compression Plates. In: *Orthopedic Implant Companies in India* [online]. Gujarat: Orthopedic Implant Companies in India [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.greensurgicals.com/product-size/Dynamic-Compression-Plates-LC-DCP-Small-for-35-mm-Screws-338.html>.
23. Ultimet. In: *INKOSAS* [online]. Kokomo: HAYNES [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.inkosas.cz/download/niklove-slitiny/ultimet.pdf>.
24. Super Alloy Ultimet(r) alloy. In: *AZoM* [online]. Sydney: AZoM [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7761>.

25. WHAT IS NACE MR0175/ISO 15156? In: *Corrosion Resistant Alloys* [online]. Houston: Corrosion Resistant Alloys [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.cralloys.com/portfolio/nacemr0175iso15156/>.
26. Alloy MP35N. In: *Aircraft Materials* [online]. High Wycombe: Aircraft Materials [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.aircraftmaterials.com/data/nickel/MP35N.html>.
27. Dubajské kontrakty GE Aviation. In: *Planes* [online]. Cincinnati: GE Aviation, 2007 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.planes.cz/en/article/100351/dubajske-kontrakty-ge-aviation>.
28. 25-brochure. In: *Haynes International* [online]. Kokomo: Haynes International [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <http://haynesintl.com/docs/default-source/pdfs/new-alloy-brochures/high-temperature-alloys/brochures/25-brochure.pdf?sfvrsn=26>.
29. Stellite 25. In: *Special Metals Company* [online]. New Hartford: Special Metals Company [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: http://specialmetals.ir/images/technical_info/cobalt_base/Stellite%2025.pdf.
30. Stellite 25 Alloy, eng. In: *Deloro* [online]. Koblenz: Deloro [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: https://www.deloro.com/fileadmin/users/redakteur/006_Downloads/Data_Sheets/Deloro_MDS_Stellite25_rev00.pdf.
31. Alloy L605 Cobalt Sheet, Coil & Bar - AMS 5537, 5759. In: *United Performance Metals* [online]. Belfast: United Performance Metals [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.upmet.com/products/cobalt/alloy-l605>.
32. 188-brochure. In: *Haynes International* [online]. Kokomo: Haynes International [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: http://haynesintl.com/docs/default-source/pdfs/new-alloy-brochures/high-temperature-alloys/brochures/188-brochure.pdf?sfvrsn=bc7229d4_38.
33. Haynes 188 Tech Data. In: *High Temp Metals* [online]. Los Angeles: High Temp Metals [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.hightempmetals.com/techdata/hitempHaynes188data.php>.
34. ASM Material Data Sheet. In: *ASM Aerospace Specification Metals Inc.* [online]. ASM Aerospace Specification Metals [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=NH18BA>.
35. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 185 s. ISBN 80-7082-697-5.
36. WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 2nd ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-0-85709-510-7.
37. Hardfacing alloys. In: *Deloro* [online]. Koblenz: Deloro, 2016 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.deloro.com/downloads/product-information/>

38. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. : il. ISBN 80-85771-81-0.
39. Hardfacing alloys. In: *Deloro* [online]. Koblenz: Deloro, 2016 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.deloro.com/downloads/product-information/>.
40. Hluboké svařování. *TRUMPF* [online]. TRUMPF [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/hluboke-svarovani/.
41. OLSEN, Flemming Ove. *Hybrid Laser-Arc Welding*. Woodhead Publishing Limited and CRC, 2009. DOI: 10.1533/9781845696528. ISBN 9781845696528.
42. Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů. *Leonardo Technology* [online]. Hlohovec: Leonardo Technology [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>.
43. Možné dělení typů a druhů laserů. *Leonardo technology* [online]. Hlohovec: Leonardo technology [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>.
44. Rozdělení laserů. *LASCAM system* [online]. Praha: LASCAM system [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>.
45. Seriál na téma lasery. *LAO* [online]. Praha: LAO, 2011 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>.
46. Průmyslové lasery pro svařování. In: *Portál moderní fyziky* [online]. Portál moderní fyziky [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>.
47. Princip vláknového - FIBER LASERU. In: *Leonardo technology* [online]. Hlohovec: Leonardo technology [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>.
48. Laserové technologie v praxi. In: *Portál moderní fyziky* [online]. Olomouc: Portál moderní fyziky, 2010 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>.
49. Laser Diode. In: *Electronics Coach* [online]. Electronics Coach [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://electronicscoach.com/laser-diode.html>
50. O svařovařovací metodě TIG. *Alfin-Trading* [online]. Náměšť nad Oslovou: Alfin-Trading [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.alfin-trading.cz/o-svarovani-tig>.

51. Tig svařování II. *SVARINFO* [online]. SVARINFO [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008122801>.
52. Aktuální možnosti v laserovém svařování. In: *MM spektrum* [online]. Praha: MM spektrum, 2018 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani.html>.
53. Poslední trendy ve svařování laserem. *MM spektrum* [online]. Praha: MM spektrum, 2009 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/posledni-trendy-ve-svarovani-laserem.html>.
54. Kondukční svařování. *TRUMPF* [online]. TRUMPF [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/kondukcnisvarovani/.
55. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
56. Jaký je rozdíl mezi přenosem tepla vedením, prouděním a sáláním? In: *Portál pro strojní konstruktéry* [online]. Portál pro strojní konstruktéry, 2015 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-prenosem-tepla-vedenim-proudenim-a-salanim>.
57. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. *CWS ANB* [online]. Praha: CWS ANB, 2012 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>.
58. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-857-7185-3.
59. Synergie korozního působení a defektů ve svarech. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* [online]. Brno: Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2003 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://acta.mendelu.cz/media/pdf/actaun_2004052020105.pdf.
60. POŽADAVKY NA PROVÁDĚNÍ KONTROLY KVALITY SVAROVÝCH SPOJŮ KOVŮ A TERMOPLASTŮ NEDESTRUKTIVNÍMI METODAMI. In: *CWS ANB* [online]. Brno: CWS ANB, 2008 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=255>.
61. Současnost a perspektivy nedestruktivní defektoskopie. *MM spektrum* [online]. MM spektrum, 2002 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-perspektivy-nedestruktivni-defektoskopie.html>.
62. Provádění NDT kontroly a hodnocení svarů na konstrukcích. *Strojirensky* [online]. Strojirensky, 2009 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://strojirensky.net/2009/11/26/provadeni-ndt-kontroly-a-hodnoceni-svaru-na-konstrukcich/>.

63. Magnetická prášková zkouška (MT). *Gamalux Plzeň* [online]. Plzeň: Gamalux Plzeň, 2017 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.gamalux.cz/pouzivane-metody/magneticka-praskova-zkouska/>.
64. Destruktivní zkoušky svarových spojů. *Techportál* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 2017 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/destruktivni-zkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EuvDzS7ep4R2shHvEcodyGA/>.
65. Zkoušky svarů. *CZ FERMET* [online]. Kladno: CZ Fermet [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://www.czfermet.cz/zkousky-svaru/>.
66. METALOGRAFIE I. *Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství* [online]. Praha: Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>.
67. Polarizace světla. *Multimedialní Encyklopedie Fyziky* [online]. Multimedialní Encyklopedie Fyziky [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/462-polarizace-svetla>.
68. Polarizace světla. *Kalabovi* [online]. Kalabovi, 2012 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://kalabovi.org/pitel:msz:polarizace_svetla.
69. Konfokální mikroskop. In: *Vesmír* [online]. Praha: Vesmír, 1995 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1995/cislo-9/konfokalni-mikroskop.html#&gid=1&pid=1>.
70. KONFOKÁLNÍ MIKROSKOPIE. In: *LAO* [online]. Praha: LAO [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.lf2.cuni.cz/files/page/files/2016/mikroskop.pdf>.
71. Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura. In: *FZU* [online]. Praha: FZU, 2017 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/aktuality/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>.
72. SEM/EDS analýza. *Průzkum umění cz* [online]. Průzkum umění cz [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://pruzkumumeni.cz/metody-pruzkumu/sem-eds-analyza/>.
73. Elektronová mikroskopie transmisní a rastrovací. *Společná laboratoř optiky* [online]. Olomouc: Společná laboratoř optiky [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: http://jointlab.upol.cz/soubusta/OSYS/El_mikr/El_mikr.html.
74. 8.1.1 Prozařovací (transmisní) elektronový mikroskop. *MUNI MED* [online]. Brno: MUNI MED [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://www2.med.muni.cz/histology/MedAtlas_2/HP_txt8-1-1.htm.
75. Energiově disperzní spektrometrie (EDS). *MATCA* [online]. Praha: MATCA [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/eds/>.

76. SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM). *Materials Evaluation and Engineering* [online]. Minneapolis: Materials Evaluation and Engineering [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.mee-inc.com/hamm/scanning-electron-microscopy-sem/>.
77. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. *Hanyko Praha* [online]. Praha: Hanyko Praha [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrdost-a-jak-se-meri/zkouska-tvrdosti-podle-vickerse/>.
78. Definice tvrdosti. *Merení tvrdosti* [online]. Ostrava: Merení tvrdosti [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.merenitvrdosti.cz/definice-tvrdosti.html>.
79. Měření tvrdosti. *Kalirna* [online]. Pardubice: kalirna [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/36-mereni-tvrdosti.html#tab2>.
80. Vickers test procedure. *EMCO-TEST* [online]. EMCO-TEST [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.emcotest.com/en/the-world-of-hardness-testing/hardness-know-how/theory-of-hardness-testing/vickers/vickers-test-procedure/>.
81. Tvrdoměr Vickers. *Mitutoyo* [online]. Mitutoyo [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/Vickers%20Hardness%20Testing%20Machine%20HV-110%252F120/Tvrdom%20c4%9br%20Vickers/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/810-443D/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/Vickers%20Hardness%20Testing%20Machine%20HV-110%252F120/Tvrdom%20c4%9br%20Vickers/$catalogue/mitutoyoData/PR/810-443D/index.xhtml).
82. Vickers Hardness Test: What it is and how it's measured. *EngineeringClicks* [online]. EngineeringClicks [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/vickers-hardness-test/>.
83. Termovizní kontrola svarových spojů. *MM spektrum* [online]. Praha: MM spektrum, 2017 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/termovizni-kontrola-svarovych-spoju.html>.
84. Tepelné záření. *Termokamera* [online]. Termokamera [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/>.
85. Princip a funkce. *Termokamera* [online]. Termokamera [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/>.
86. Infračervené topení pro lidi. In: *Ceramicx* [online]. Ballydehob: Ceramicx [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.ceramicx.com/cs/information/media/white-papers/infrared-heating-for-humans/>.
87. Chyby a omyly při měření. *Termokamera* [online]. Termokamera [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/chyby-a-omyly-pri-mereni-termokamerou/>.

88. Stellite 6B. *Stellite* [online]. Stellite [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.stellite.com/us/en/products/stellite-6b.html>.
89. Laserové technologie. *Ústav přístrojové techniky* [online]. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.isibrno.cz/cs/laserove-technologie>.
90. MagicWave1700/2200. *Svářecí technika, nářadí a stroje* [online]. Teplice [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.cesva.cz/fotky32119/fotov/_ps_159Magic_Wave_1700_2200_CS_low--1.pdf.
91. Perfect welding. *Fronius* [online]. Fronius [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology?>.
92. Elektronová svářečka MEBW-60/2. *Ústav přístrojové techniky* [online]. Brno: Ústav přístrojové techniky [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/cs/elektronova-svarecka-mebw-602>.
93. Seznam produktů. *Struers* [online]. Struers [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://e-shop.struers.com/CZ/CS/products/Grinding>.
94. STRUERS CITOPRESS-15. *Theseus Lab* [online]. Theseus Lab [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://theseuslab.by/p50748102-avtomaticheskij-press-dlya.html>.
95. Color Metallography. *Metallurgical and Materials Engineering* [online]. Buehler, 2005 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://mme.iitm.ac.in/gphani/lib/exe/fetch.php/om:vandervoort.pdf>.
96. 3D laserový skenovací mikroskop. *KEYENCE* [online]. KEYENCE [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.keyence.eu/landing/microscope/lp_vkx_micro03_cz.jsp.
97. MESSLER, Robert W. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York: John Wiley, 1999, 662 s. ISBN 0-471-25376-6.
98. Tvrdoměr Q10/Q30/Q60. *Metalco Testing* [online]. Metalco Testing [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/mikrotrvrdomery-vickers-a-knoop/trvrdomer-q10-q30-q60--varianta-a/>.
99. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
AC	Střídavý proud	[A]
ASTM	Americká norma	[-]
DC	Stejnoseměrný proud	[A]
DT	Destruktivní testování	[-]
EDS	Energiově disperzní spektroskopie	[-]
FCC	Kubicky plošně středěná mřížka	[-]
HCP	Hexagonálně těsně uzavřená mřížka	[-]
HRC	Tvrdost dle Rockwella	[-]
HV	Tvrdost dle Vickerse	[-]
IR	Infračervené záření	[μm]
LSCM	Konfokální laserová rastrovací mikroskopie	[-]
MIG	Metal inert gas	[-]
MMA	Manual Metal Arc	[-]
MP	Vícefázové slitiny	[-]
ND	Nedestruktivní testování	[-]
RTG	Rentgenové záření	[μm]
SEM	Rastrovací elektronová mikroskopie	[-]
SK	Svarový kov	[-]
TEM	Transmisní elektronová mikroskopie	[-]
TIG	Tungsten inert gas	[-]
TOO	Teplotně ovlivněná oblast	[-]
ZM	Základní materiál	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Konvenční metoda svařování a aplikace automobilového průmyslu [5], [6]	9
Obr. 2 Graf vývoje ceny kobaltu [9]	10
Obr. 3 Aktuální rozsah aplikací kobaltu. [10]	10
Obr. 4 Zabarvení erythritu. [11]	11
Obr. 5 Transformace krystalové mřížky [12]	12
Obr. 6 Binární diagram Co-Cr [4]	13
Obr. 7 Implantát fixující zlomeninu [22]	16
Obr. 8 Proudový motor [27]	18
Obr. 9 Schéma svarového spoje [35]	20
Obr. 10 Formy vyráběného svářecího sortimentu pro kobaltové slitiny [37]	22
Obr. 11 Schéma tvorby key hole u svařování laserem [40]	24
Obr. 12 Schéma principu Nd: YAG laseru [44]	25
Obr. 13 Schéma principu diskového laseru [46]	25
Obr. 14 Schéma principu vláknového laseru [47]	26
Obr. 15 Schéma principu polovodičové diody [48]	26
Obr. 16 Schéma CO ₂ laseru chlazeného difuzí [44]	27
Obr. 17 Schéma sériového (pravý) a paralelního zapojení (levý) [41]	28
Obr. 18 Podrobné schéma při svařování TIG (141) [51]	29
Obr. 19 Rozdíl mezi svařovacími režimy [53]	30
Obr. 20 Schéma výskytu vad [53]	31
Obr. 21 Možnosti výskytu krystalizačních trhlin [58]	32
Obr. 22 Příklad výskytu studených trhlin [58]	32
Obr. 23 Schéma procesu přípravy zkoumaného vzorku [63]	35
Obr. 24 Vysvětlení hloubky ostrosti a rozlišitelné vzdálenosti [12]	36
Obr. 25 Schéma polarizovaného světla [68]	36
Obr. 26 Schéma principu konfokálního rastrovacího mikroskopu [70]	37
Obr. 27 Schéma interakce elektronu se zkoumaným vzorkem [71]	38
Obr. 28 Schéma závislosti hloubky vtisku na velikosti tvrdosti [82]	39
Obr. 29 Elektromagnetické spektrum [86]	40
Obr. 30 Rozložení svařovacího pracoviště	42
Obr. 31 Způsob zapojení hybridního svařování.	43
Obr. 32 Visuální vzhled zhotovených svarů hybridním svařováním	43
Obr. 33 Visuální vzhled zhotovených svarů elektronovým paprskem	45
Obr. 34 Elektronová svářečka MEBW-60/2	45
Obr. 35 Lisovací stroj Struers CitoPress-15. [94]	46
Obr. 36 Vyhotovené metalografické vzorky	47
Obr. 37 3D laserový konfokální mikroskop KEYENCE [96]	48
Obr. 38 Snímek makrostruktury vzorku č. 1	49
Obr. 39 Snímek makrostruktury vzorku č. 2	49
Obr. 40 Snímek makrostruktury vzorku Ev20.	50
Obr. 41 Snímek makrostruktury vzorku Ev10.	50
Obr. 42 Znázornění míst zkoumaných oblastí.	51
Obr. 43 Snímek mikrostruktury z části SK+TOO+ZM	52
Obr. 44 Snímek mikrostruktury tavení karbidů M ₇ C ₃ a M ₂₃ C ₆	53
Obr. 45 Snímek mikrostruktury z části KOŘEN SK	53
Obr. 46 Snímek mikrostruktury z části HLAVA SK	54
Obr. 47 Tvrdoměr a mikrotvrdoměr Qness Q10A+ [98]	54
Obr. 48 Naznačení pozic měřených linií	55

Obr. 49 Graf průběhu tvrdosti pro vzorek č. 2.	56
Obr. 50 Graf průběhu tvrdosti pro vzorek č. 3.	56
Obr. 51 Místa měření prvkové analýzy.	57
Obr. 52 Zvětšená měřená linie č. 7.	58
Obr. 53 Grafické zobrazení výsledků linie č 7.	58
Obr. 54 Grafické zobrazení intenzit vyzářených prvků a jejich průměrné hodnoty.	58

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní vlastnosti prvku [2], [4]	12
Tab. 2 Volba slitiny v jednotlivých průmyslových oblastech [4]	15
Tab. 3 Chemické složení a mechanické vlastnosti Stelitu 6 [16].....	15
Tab. 4 Chemické složení a mechanické vlastnosti stelitu 12 [17]	16
Tab. 5 Chemické složení a mechanické vlastnosti Ultimet [24].....	17
Tab. 6 Chemické složení a mechanické vlastnosti MP35N [4], [26].....	17
Tab. 7 Chemické složení a mechanické vlastnosti Stelitu 25 [30].....	19
Tab. 8 Chemické složení a mechanické vlastnosti Hayness 188 [4], [34]	19
Tab. 9 Shrnutí průměrných parametrů průmyslově dostupných laserů [44].....	28
Tab. 10 Shrnutí ND zkoušek a jejich princip [61], [62], [63]	33
Tab. 11 Shrnutí základních DT metod pro určení mechanických vlastností [58], [64], [65] .	34
Tab. 12 Chemické složení Stelitu 6B	41
Tab. 13 Mechanické vlastnosti Stelitu 6B [88].....	41
Tab. 14 Parametry hybridního svařování	44
Tab. 15 Parametry elektronového svařování.....	45
Tab. 16 Použité lisovací parametry	46
Tab. 17 Shrnutí použitých brusných a leštících parametrů	47
Tab. 18 Hodnoty rozměrů svarů zhotovených hybridním svařováním.....	50
Tab. 19 Hodnoty rozměrů svarů zhotovených elektronovým paprskem.	51

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list slitiny Stelit 6B
- Příloha 2 Zákotovaná velikost měřených vzorků
- Příloha 3 Hodnoty tvrdosti jednotlivých vpichů pro vzorek č. 2
- Příloha 4 Hodnoty tvrdosti jednotlivých vpichů pro vzorek č. 3

Příloha 1 – Materiálový list slitiny Stelit 6B 1/2

C15080465-140784 Kennametal
eingelangt am 01-06-2015

SEIKO reg no:
T162 / SQ2

Beleg-Nr.:.....3
Seite:.....1/2



SEIKO
Zur Schleuse 5

A-2000 Stockerau
AUSTRIA

Ihr Zeichen

Ihr Schreiben vom

Unser Zeichen
SJ/mn

Datum
08/05/2015

ABNAHMEPRÜFZEUGNIS / INSPECTION CERTIFICATE
gemäß / according to DIN EN 10204/3.1

No.: 128510 Rev01
Seite / Page 1 / 2

Kunden-Auftragsnummer: <i>Customer order no.:</i>	C15080465-140784		
Unsere Auftragsnummer: <i>Our order no.:</i>	22947679 Pos. 10 (BE4511040)	vom/dt.	16/04/2015
Beschreibung <i>Description:</i>	STANGE geschmiedet/ <i>BAR forging</i>		
Ident-Nr.: <i>Ident-No.:</i>	-		
Zeichnung-Nr.: <i>Drawing-No.:</i>	Ø 34,9mm		
Werkstoff: <i>Material:</i>	STELLITE® alloy 6B		
Anforderungen: <i>Requirements:</i>	-		
Menge: <i>Quantity:</i>	4,037 kg		
Kennzeichnung: <i>Ident marks:</i>	-		
Charge: <i>Batch No.:</i>	1810-4-1098		

KENNAMETAL STELLITE GmbH			Werksachverständiger / <i>Works Inspector</i>		
Dr. Hofmann	M. Jeuk	S. Josephs	B. Royer	J. Sternsek	

Příloha 1 – Materiálový list slitiny Stelit 6B 2/2

C15080465-140784 Kennametal
eingelangt am 01-06-2015

SEIKO reg no:
T162 / SQ2

Beleg-Nr.:.....3
Seite:.....2/2



ABNAHMEPRÜFZEUGNIS / INSPECTION CERTIFICATE gemäß / according to DIN EN 10204/3.1

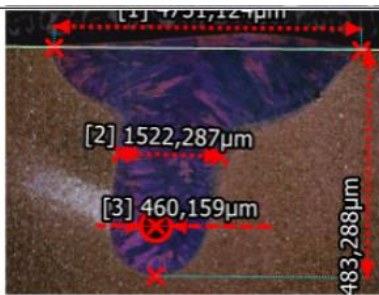
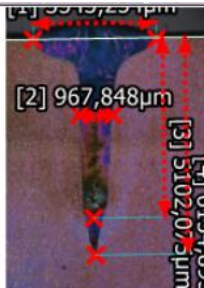
No.: 128510 Rev01
Seite / Page 2 / 2

HÄRTEPRÜFUNG nach / HARDNESS TEST / acc. To DIN EN ISO 6508-1 (Rockwell C)	
Härte: Hardness:	Ergebnis / Result: Teil Nr. / Piece no. 36 HRC

CHEM. ANALYSE (Massen %) / CHEM. ANALYSIS (Wt. %):						ERSCHMELZUNGSART: Elektro ,E' / MELTING PROCESS: Electro ,E'					
Chargen Nr. Batch no.	C	Cr	Si	W	Fe	Co	Ni	Mn	Mo	P	S
1810-4-1098	0,99	29,47	0,59	3,55	1,27	Rest/Bal.	2,76	1,21	1,35	<0,01	<0,002

KENNAMETAL STELLITE GmbH				Werksachverständiger / Works Inspector	
Dr. Hofmann	M. Jeuk	S. Josephs	B. Royer	J. Stermsek	

Příloha 2 – Zákotovaná velikost měřených vzorků

vzorek1		<table><tr><th>No.</th><th>Measurement name</th><th>Measured value</th><th>Unit</th></tr><tr><td>1</td><td>2 Points1</td><td>4731,124</td><td>µm</td></tr><tr><td>2</td><td>2 Points2</td><td>1522,287</td><td>µm</td></tr><tr><td>3</td><td>Diameter1</td><td>460,159</td><td>µm</td></tr><tr><td>4</td><td>Perpendicular1</td><td>3483,288</td><td>µm</td></tr></table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	2 Points1	4731,124	µm	2	2 Points2	1522,287	µm	3	Diameter1	460,159	µm	4	Perpendicular1	3483,288	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit																			
1	2 Points1	4731,124	µm																			
2	2 Points2	1522,287	µm																			
3	Diameter1	460,159	µm																			
4	Perpendicular1	3483,288	µm																			
vzorek2		<table><tr><th>No.</th><th>Measurement name</th><th>Measured value</th><th>Unit</th></tr><tr><td>1</td><td>2 Points1</td><td>3093,927</td><td>µm</td></tr><tr><td>2</td><td>2 Points2</td><td>4606,866</td><td>µm</td></tr><tr><td>3</td><td>2 Points3</td><td>1036,947</td><td>µm</td></tr><tr><td>4</td><td>Perpendicular1</td><td>3499,022</td><td>µm</td></tr></table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	2 Points1	3093,927	µm	2	2 Points2	4606,866	µm	3	2 Points3	1036,947	µm	4	Perpendicular1	3499,022	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit																			
1	2 Points1	3093,927	µm																			
2	2 Points2	4606,866	µm																			
3	2 Points3	1036,947	µm																			
4	Perpendicular1	3499,022	µm																			
vzorek1e_v20		<table><tr><th>No.</th><th>Measurement name</th><th>Measured value</th><th>Unit</th></tr><tr><td>1</td><td>2 Points1</td><td>2398,594</td><td>µm</td></tr><tr><td>2</td><td>2 Points2</td><td>681,753</td><td>µm</td></tr><tr><td>3</td><td>Perpendicular1</td><td>4001,408</td><td>µm</td></tr></table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	2 Points1	2398,594	µm	2	2 Points2	681,753	µm	3	Perpendicular1	4001,408	µm				
No.	Measurement name	Measured value	Unit																			
1	2 Points1	2398,594	µm																			
2	2 Points2	681,753	µm																			
3	Perpendicular1	4001,408	µm																			
vzorek1e_v10		<table><tr><th>No.</th><th>Measurement name</th><th>Measured value</th><th>Unit</th></tr><tr><td>1</td><td>2 Points1</td><td>3543,254</td><td>µm</td></tr><tr><td>2</td><td>2 Points2</td><td>967,848</td><td>µm</td></tr><tr><td>3</td><td>Perpendicular1</td><td>5102,075</td><td>µm</td></tr><tr><td>4</td><td>Perpendicular2</td><td>6154,895</td><td>µm</td></tr></table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	2 Points1	3543,254	µm	2	2 Points2	967,848	µm	3	Perpendicular1	5102,075	µm	4	Perpendicular2	6154,895	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit																			
1	2 Points1	3543,254	µm																			
2	2 Points2	967,848	µm																			
3	Perpendicular1	5102,075	µm																			
4	Perpendicular2	6154,895	µm																			

Příloha 3 – Hodnoty tvrdosti jednotlivých vpichů pro vzorek č. 2

Vzorek č. 2 zhotovený hybridní technologií TIG-Laser.			
Číslo bodu [-]	Vzdálenost bodů [mm]	Linie č. 1 HV0,5	Linie č. 2 HV0,5
1	0	420	439
2	0,2	403	435
3	0,4	434	403
4	0,6	412	406
5	0,8	418	414
6	1	444	411
7	1,2	459	501
8	1,4	525	540
9	1,6	634	561
10	1,8	643	583
11	2	591	566
12	2,2	643	554
13	2,4	587	538
14	2,6	416	443
15	2,8	432	439
16	3	416	432
17	3,2	432	404
18	3,4	412	411
19	3,6	409	428
20	3,8	430	425
21	4	459	413

Příloha 4 – Hodnoty tvrdosti jednotlivých vpichů pro vzorek č. 3

Vzorek č. 3 zhotovený laserem.			
Číslo bodu [-]	Vzdálenost bodů [mm]	Linie č. 1 HV0,5	Linie č. 2 HV0,5
1	0	413	421
2	0,2	429	444
3	0,4	436	436
4	0,6	451	432
5	0,8	452	436
6	1	461	507
7	1,2	501	540
8	1,4	644	638
9	1,6	619	627
10	1,8	625	625
11	2	644	638
12	2,2	610	631
13	2,4	545	625
14	2,6	501	492
15	2,8	421	456
16	3	444	413
17	3,2	414	436
18	3,4	428	424
19	3,6	415	402
20	3,8	399	399
21	4	395	399