



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**RENOVACE LICÍCH FOREM TECHNOLOGIÍ LASEROVÉHO
NAVAŘOVÁNÍ**

RENOVATION OF CASTING MOLDS BY LASER CLADDING TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tereza Cicha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Bc. Tereza Cicha**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, 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:

Renovace licích forem technologií laserového navařování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ověřit možnost renovace licích forem pomocí technologie laserového navařování. Optimalizovat procesní parametry s ohledem na mechanické vlastnosti svaru. Srovnat výsledky se stávajícími technologiemi užívanými pro renovace.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii laserového navařování.
Osvojit si problematiku využití této technologie při renovacích ocelových licích forem.
Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.
Osvojit si základy metalografického vyhodnocování návarů, identifikaci základních mikrostruktur a svarových vad.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0.

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

CICHA Tereza: Renovace licích forem technologií laserového navařování.

Diplomová práce se zabývá studiem technologie laserového navařování a možnostmi jejího uplatnění při renovacích licích forem vyrobených z nástrojové oceli pro práci za zvýšených teplot. V teoretické části jsou popsány metody laserového navařování, metody zkoušení a charakteristika základního materiálu a jeho tepelné zpracování. V experimentální části byly provedeny zkušební návary a zhotoveny metalografické výbrusy. Vzorby byly vyhodnoceny z hlediska makrostruktury a mikrostruktury, především pak výšky návaru, hloubky závaru, zředění a vzniklých vad typu pórů a trhlin. Také byla měřena mikrotvrdomost. Nakonec bylo provedeno technicko-ekonomické vyhodnocení.

Klíčová slova: laser, laserové navařování, svařování, renovace, nástrojová ocel

ABSTRACT

CICHA Tereza: Renovation of casting molds by laser cladding technology.

The diploma thesis deals with study of laser cladding technology and possibilities of its use in renovation of casting molds made of hot-work tool steel. The theoretical part describes methods of laser cladding, testing methods and characteristics of the base material and its heat treatment. In the experimental part the test clads, and the metallographic samples were made. The samples were evaluated in terms of macrostructure and microstructure, especially clad geometry, dilution, and defects like pores and cracks. Microhardness was also measured. In conclusion a technical and economic evaluation was performed.

Keywords: laser, laser cladding, welding, renovation, tool steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CICHA, Tereza. *Renovace licích forem technologií laserového navařování* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124885>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. 6. 2020

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu mé práce, panu doc. RNDr, Liborovi Mrňovi Ph.D., za cenné rady a připomínky při zpracovávání diplomové práce. V neposlední řadě děkuji také své rodině za podporu během celého studia.

Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Možnosti oprav	14
2 LASEROVÉ NAVAŘOVÁNÍ	15
2.1 Způsoby laserového navařování	16
2.1.1 Podávání pasty	17
2.1.2 Podávání drátu	17
2.1.3 Navařování prášku	18
2.2 Vlastnosti navařených vrstev	19
2.3 Laserové zdroje	21
2.3.1 Pevnolátkové lasery	22
2.3.2 Plynové lasery	23
2.3.3 Diodové lasery	24
3 MATERIÁL FORMY	25
3.1 Svařitelnost a stanovení teploty předehřevu	26
4 METODY ZKOUŠENÍ	27
4.1 Destruktivní zkoušky	27
4.1.1 Zkoušky tvrdosti	28
4.2 Nedestruktivní zkoušky	30
4.2.1 Vizuelní kontrola	30
4.2.2 Kapilární zkouška	31
4.2.3 Magnetická prášková metoda	31
4.2.4 Zkouška vířivými proudy	32
4.2.5 Radiografická zkouška	32
4.2.6 Ultrazvuková zkouška	33
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
5.1 Návrh experimentu a příprava vzorků	35
5.2 Vyhodnocení experimentu	36
5.2.1 Navařování TIG	37
5.2.2 Navařování mikroplazmou	39
5.2.3 Laserové navařování drátu	41
5.2.4 Laserové navařování prášku	43
5.2.5 Laserové pulzní mikronavařování	49
6 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	57
7 ZÁVĚRY	58

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

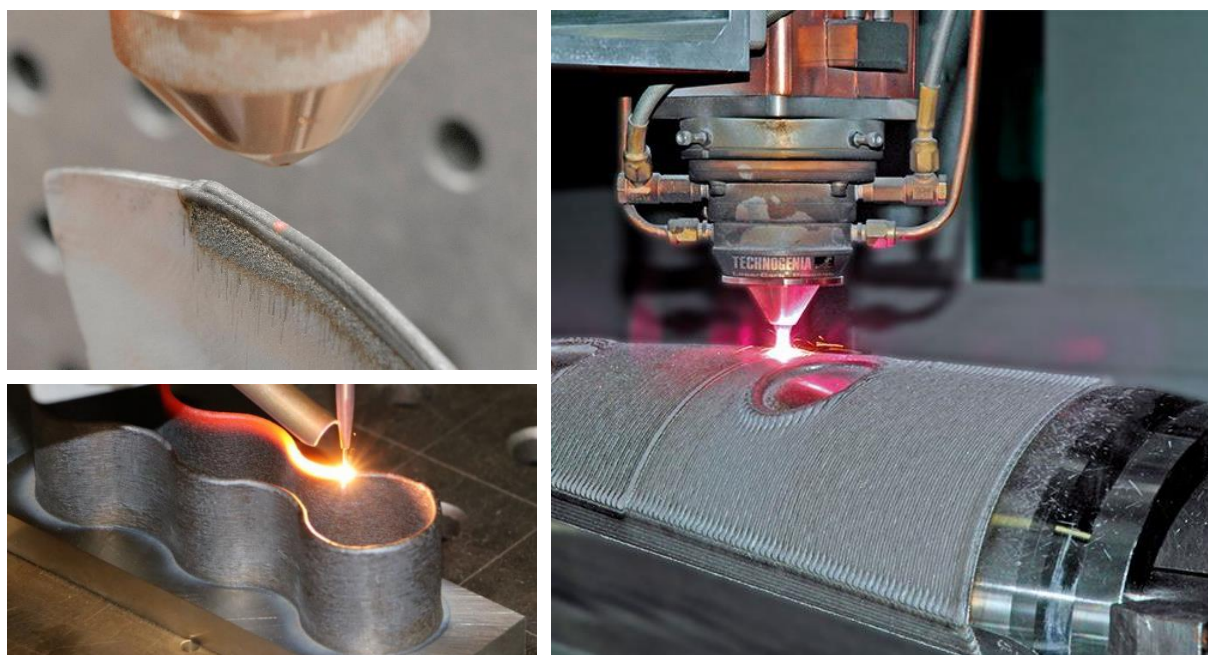
Seznam příloh

ÚVOD [1], [2], [3], [4]

Velkou část celkové produkce kol pro osobní automobily dnes tvoří litá hliníková kola. Vlivem globalizace, rostoucí poptávky a neustálých nároků na zlepšení konkurenceschopnosti jsou slévárenské formy neustále vyvíjeny, roste jejich tvarová složitost a technologická propracovanost. Z toho vyplývá, že formy a udržení jejich životnosti, zaujímají v procesu výroby hliníkových kol klíčové postavení. Během licího cyklu je tvarová dutina formy vystavena řadě faktorů, které dříve či později způsobují její opotřebení. Vzhledem k vysokým nákladům na výrobu nových forem je potřeba řešit otázku oprav, přičemž výběrem vhodné technologie je možné prodloužit životnost forem a snížit tak celkové náklady.

Za účelem odstranění vad jsou v současnosti využívány různé metody svařování a navařování. Dobré postavení si stále udržují konvenční technologie, především pak TIG navařování.

V posledních letech dochází k rychlému rozvoji laserových technologií a jejich význam stále narůstá. Laserové zpracování materiálů nachází uplatnění v různých odvětvích průmyslu, nejznámějšími aplikacemi jsou svařování, řezání a kalení. Stále větší pozornosti se však v poslední době dostává technologii laserového navařování, která má velký význam a potenciál právě v oboru oprav a renovací. Laserové navařování umožňuje při volbě vhodné kombinace materiálů a procesních parametrů vytvoření velmi kvalitních vrstev, zlepšení mechanických a užitných vlastností navařovaných součástí, a tím i zvýšení jejich životnosti. Různé modifikace technik laserového navařování jsou využívány například i pro vytváření povlaků a legování. Navařování je také čím dál tím více uplatňováno jako součást výrobní technologie, kdy je formou 3D tisku využíváno pro tvorbu prototypů i strojních součástí.



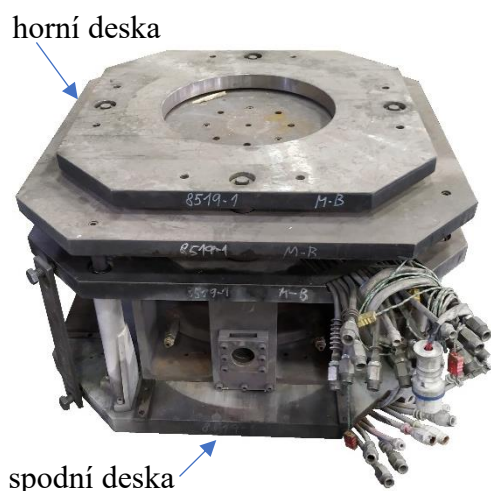
Obr. 1: Ukázky laserového navařování [4]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]

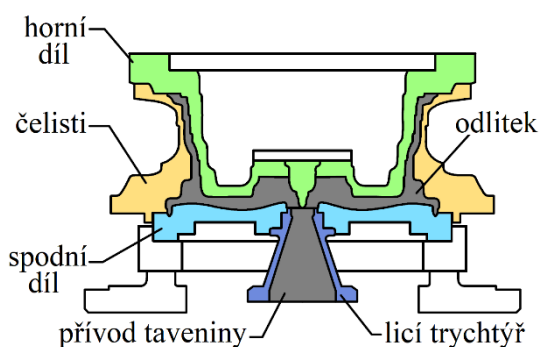
Licí formy, jejichž renovací se zabývá tato práce, jsou určeny pro výrobu hliníkových kol pro osobní automobily, která jsou odlévána technologií nízkotlakého lití. Výchozím materiálem je slitina AlSi7 nebo AlSiMg11, která je na začátku výrobního procesu roztavena spolu s vyřazenými koly a s trískami vzniklými při obrábění odlitků. Následuje odplynění taveniny, její přeprava k licímu stroji a plnění udržovací pece, která je jeho součástí, je hermeticky uzavřená a udržuje teplotu roztaveného hliníku na požadované hodnotě. Nad udržovací pecí je umístěna kovová forma (obrázek 2), v jejíž spodní části se nachází vtokový otvor, na který je přes licí trychtýř napojen horní konec licího potrubí, které propojuje udržovací pec s dutinou formy a zprostředkovává její plnění. Roztavený kov je plněn do dutiny formy přetlakem vzduchu o hodnotě cca $0,03 \div 0,04$ MPa. Velmi podstatné je pomalé a klidné plnění formy bez turbulence a vírů. Tuhnutí odlitku probíhá směrem odshora dolů a musí být ukončeno v ústí licího potrubí.



Obr. 2: Rozevřená forma na licím stroji



Obr. 3: Forma ve složeném stavu



Obr. 4: Průřez tvarovou dutinou [7]

Jak již bylo zmíněno, forma pro odlévání hliníkových kol je umístěna přímo nad udržovací pecí. Kompletní forma ve složeném stavu je zobrazena na obrázku 3. Základní konstrukce je tvořena pevnou a pohyblivou částí. Pevná část, tedy spodní deska formy, je pevně umístěna těsně nad udržovací pecí. Pohyblivá část, tzv. horní deska, koná vertikální pohyb po vedení licího stroje, a je vybavena vyhazovači, které po rozevření formy uvolní odlitek.

Součástí spodní a horní desky jsou díly, které společně tvoří tvarovou dutinu formy, jejíž schéma je na obrázku 4. Tvarové části, které určují geometrii a design kola jsou:

- Spodní díl – (obrázek 5) je součástí spodní desky, která je pevně uchycena na licím stroji. Tento díl formy vytváří vzhled pohledové strany kola, což je ta část, která je viditelná při pohledu na bok automobilu. Ve středu je umístěn vtokový otvor a licí trychtýř, kterým se uskutečňuje plnění formy. Důležitou součástí spodního dílu je také vyhřívací spirála, tzv. boccola, která zajišťuje správné tuhnutí odlitku, které musí být ukončeno v oblasti středového otvoru. Přívod chlazení ústí v místě šroubových otvorů.

- Horní díl – znázorněný na obrázku 6, je umístěn na horní desce a utváří vnitřní část odlitku. Důležitým prvkem toho dílu jsou plochy, nesoucí číselná značení, která slouží k identifikaci odlitků.
- Čelisti – utváří ráfek kola z vnější strany. Jsou znázorněny na obrázku 5. Pro tyto formy jsou používány 4 čelisti, které se pohybují po ližinách na spodní desce formy.



Obr. 5: Spodní díl a čelisti [8]



Obr. 6: Horní díl formy

Během licího cyklu jsou formy neustále vystaveny vysokým mechanickým, tepelným a chemickým zatížením. Ty po určité době způsobují různé povrchové vady, které se více či méně projevují na odlitcích. Z tohoto důvodu jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu povrchu forem, která je úzce spojena s odolností proti opotřebení. Vady a nepřesnosti jsou do jisté míry přípustné na čelistech a horním dílu formy, protože tyto plochy jsou po odlití obráběny. Výjimkou jsou místa nesoucí číselné označení, která musí být neustále v bezchybném stavu a vady v této oblasti jsou nepřijatelné, neboť způsobují nečitelnost znaků. Nejvyšší požadavky na kvalitu povrchu jsou kladeny na spodní díl formy. Důvodem je, že na pohledové části kola se provádí pouze odvrtání nálitku ve středovém otvoru a děr pro šrouby, přičemž ostatní plochy se neobrábí.



Obr. 7: Model spodního dílu [6]

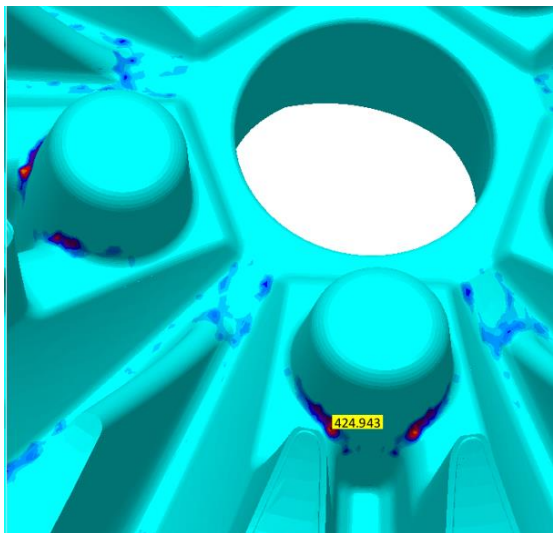
Zbytek práce bude zaměřen pouze na spodní díl formy, a to především z důvodu, že podléhá největšímu zatížení a opotřebení. Právě zde se provádí většina nejdůležitějších a nejobtížnějších oprav. Mechanismy opotřebení budou podrobněji popsány v souvislosti s jejich působením na tuto část formy a také pro jeden konkrétní typ kola, jehož forma byla poskytnuta pro experiment. Spodní díl je vyroben z oceli 1.2885 a zušlechtěn na tvrdost 35 až 40 HRC. Materiál bude podrobněji rozebrán v kapitole 3. Přesný model spodního dílu formy je znázorněn na obrázku 7.

Mezi nejvýznamnější mechanismy opotřebení patří eroze způsobená tokem taveniny. Roztavený hliník obsahuje také tvrdé částice křemíku a Al_2O_3 , které mají vysokou teplotu tavení. Tyto částice obsažené v proudící tavenině posilují její erozivní účinky. Jako ochrana před erozí jsou formy opatřeny nástřikem a na kritická místa v oblasti vtokového otvoru je nanášeno mazivo. V oblastech, kde dojde k odstranění ochranné vrstvy nástřiku nebo maziva, dochází k největšímu erozivnímu opotřebení. Na obrázku 8 je znázorněno erozivní opotřebení vtokového otvoru.



Obr. 8: Eroze vtoku formy

Dalším významným mechanismem opotřebení je tepelná únava. Formy neustále podléhají cyklickému tepelnému zatížení. Teplota povrchu dosahuje během licího cyklu až 550°C. Po naplnění formy následuje chlazení, kdy teplota klesne v místech i pod 400°C. Neustálé změny teplot způsobují také roztažení a kontrakci materiálu formy. Místa, která jsou nejvíce namáhána teplotními rozdíly a kontrakcemi materiálu, jsou znázorněna na obrázku 9 tmavě modře a červeně. Tyto faktory způsobují vznik trhlin (obrázek 10), které se při opakování licího procesu postupně šíří.



Obr. 9: Kritická místa [6]



Obr. 10: Trhlina v kritickém

V erodovaných oblastech a také v místech trhlin pak dochází k ulpívání taveniny hliníku. Díky dobré afinitě uhlíku k železu obsaženému v materiálu formy může docházet také k tvorbě intermetalických sloučenin. Tyto jevy se na odlitku projevují nedostatkem materiálu, jak je znázorněno na obrázcích 11 a 12.



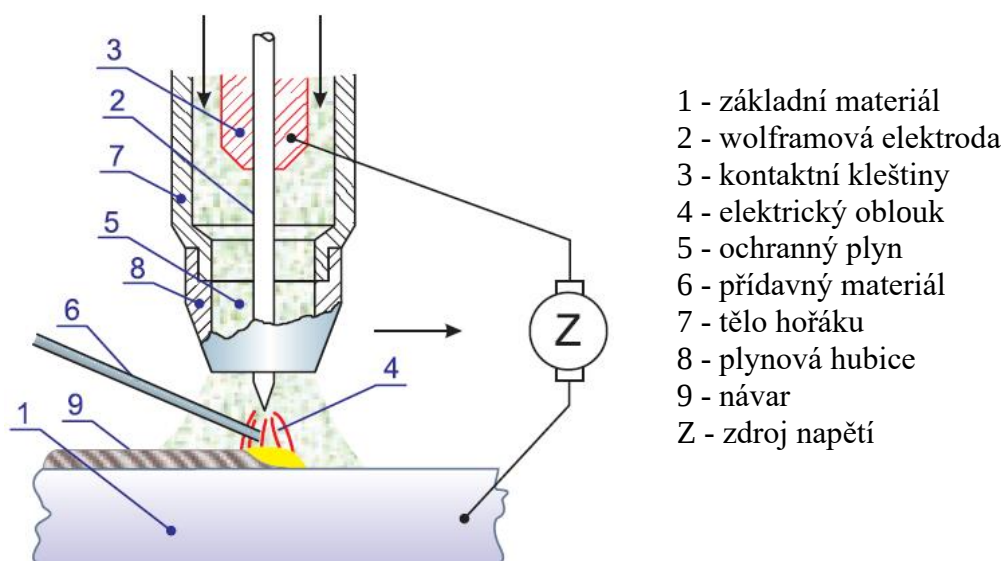
Obr. 11: Chybějící materiál - střed kola [6]



Obr. 12: Chybějící materiál - šroubový otvor [6]

Opotřebení povrchu formy nelze sledovat během licího cyklu, proto je míra opotřebení rozpoznávána především na základě kontroly odlitků. Pokud je opotřebení příliš velké a vady na odlitcích překročí přípustnou mez, tzn. že i po následném obrobení by byly na odlitku viditelné, jsou formy vyměněny nebo opraveny. Výroba nových forem však složitá a velmi nákladná. Není-li forma nenávratně poškozená, je ekonomicky výhodnější provést její opravu a prodloužit tak její životnost. Cena opravy se pohybuje přibližně do 10 % pořizovací hodnoty formy. Pro opravy forem lze uplatnit různé technologie.

Stávajícím způsobem oprav je navařování metodou TIG. Jedná se o obloukové navařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu. Elektrický oblouk hoří mezi hrotem elektrody a základním materiálem a svým tepelným účinkem taví přídavný materiál ve formě drátu, který je ze strany podáván do oblouku. Schéma metody je na obrázku 13.



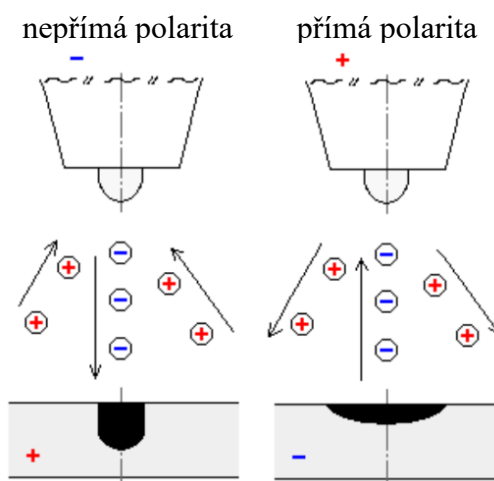
Obr. 13: navařování TIG [11]

Ochranný plyn zabezpečuje především ochranu tavné lázně a přilehlého základního materiálu před účinky okolní atmosféry. Zároveň slouží jako ochrana wolframové elektrody, má vliv na tepelný výkon svařovacího oblouku, jeho zapálení a stabilitu po celý čas svařovacího procesu. Předností této technologie je tedy vysoká čistota a dobrá kvalita navařené vrstvy. Jako ochranný plyn je nyní při opravách používán argon a přídavný materiál OK TIGROD 16.95, jehož chemické složení uvádí tabulka 1. Jedná se o austenitický drát typu 18Cr8Ni7Mn.

Tabulka 1: Chemické složení materiálu OK TIGROD 16.95 [12]

Chemické složení [hm. %]						
Mn	Mo	Cu	C	Si	Ni	Cr
7,00	0,20	0,10	0,08	0,90	8,10	18,70

Pro navařování vrstev metodou TIG na nástrojové oceli se používá zdroj stejnosměrného proudu a ve většině případů se používá tzv. přímá polarita, kdy je wolframová elektroda zapojena jako katoda (-) a navařovaná součást jako anoda (+). Při opačném zapojení, tzv. nepřímá polarita, lze dosáhnout mělkých návarů s nižším zředěním a menším prohřátím základního materiálu. Wolframová elektroda je však vystavena velkému tepelnému namáhání a je nutné použít speciální svařovací zařízení a zajistit její intenzivní chlazení. Z tohoto důvodu se toto zapojení používá jen ve velmi omezené míře. Schéma obou zapojení je znázorněno na obrázku 14. Použití metody TIG je vhodnější, pokud je nutné navaření většího množství materiálu.



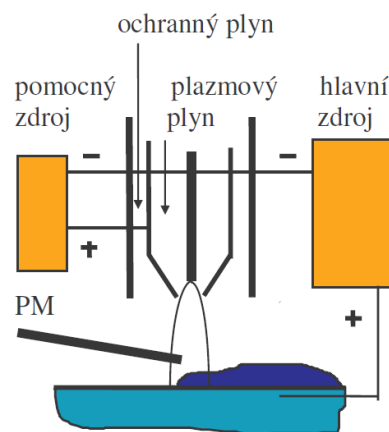
Obr. 14: TIG svařování DC [15]

Metoda je velmi často využívána také z důvodu toho, že operátor má dobrou kontrolu nad procesem. Avšak pro opravy menších defektů není tato metoda příliš vhodná, a to především z důvodu značného tepelného ovlivnění materiálu formy svařovacím teplem, což může vést ke změně struktury i mechanických vlastností. Jsou také nutné následné dokončovací práce pro opracování navařených ploch. V praxi v současnosti navíc dochází k problémům s životností oprav provedených touto metodou. Životnost nových forem se průměrně pohybuje přibližně v rozmezí 4-6 tisíc licích cyklů a životnost po opravě by měla být s tímto číslem srovnatelná. Avšak u některých typů forem nastává nutnost opravy zhruba již po 200 až 350 odlitcích, což je nepřijatelné. Z tohoto důvodu se přistoupilo k hledání nových vhodnějších metod.

1.1 Možnosti oprav [1], [2], [10], [11], [16], [17]

Jak již bylo zmíněno, u některých typů forem se vyskytují problémy s velmi nízkou životností oprav provedených metodou TIG. Vysoká četnost oprav vede ke zvýšení nákladů s nimi spojenými, navíc také k častým odstávkám a prostojům výroby. Z těchto důvodů se přistoupilo k hledání nových možností oprav, které by pomohly vyřešit tuto problematiku. Opravy forem obvykle zahrnují odstranění části materiálu z poškozené oblasti, její vyčištění a následné navaření vrstvy materiálu do poškozené oblasti, které může být provedeno několika způsoby. V této práci budou realizovány a zkoušeny následující, dosud nezkoušené metody oprav:

- Navařování mikroplazmou – je pokročilou formou konvenčního plazmového navařování. Technologie využívá vysoké stability hoření plazmového oblouku i při nízkých proudech. Intenzita proudu se pohybuje v rozsahu 0,05 až 20 A, oblouk je přesně řízený pomocí napájecího zdroje a energie je soustředěna na malou plochu. Toho se využívá například pro svařování tenkých fólií tloušťky 0,01 mm a plechů do tloušťky 2 mm. Technologie využívající mikroplazmu obecně dosahuje lepší výsledky než v případě použití navařování metodou TIG. Plazmový paprsek dosahuje vysokých teplot i hustoty energie, v důsledku čehož probíhá natavení povrchu součásti ve velmi krátkém čase. S tím souvisí malá tepelně ovlivněná oblast a další výhodou je také vysoká kvalita návarů s nízkým zředěním. Navařování mikroplazmou se provádí ručně, schéma metody je znázorněno na obrázku 15.

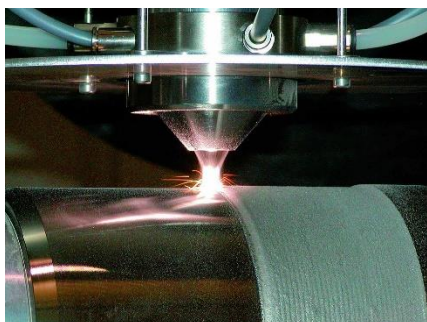


- Laserové navařování – je moderní technologie, která je v současnosti hojně využívána pro opravy a renovace. Hustota energie laserového paprsku je podobně jako u předchozí technologie vysoká, optimálně 10^5 až 10^6 W/cm². Návary se vyznačují úzkou tepelně ovlivněnou oblastí, lze očekávat vysokou kvalitu a nízké zředění. Laserové navařování může být realizováno několika způsoby, které budou podrobněji popsány v kapitole 2.
 - Laserové navařování prášku – metoda vyžaduje stojní vedení navařovací hlavy, je nákladnější a náročnější než předešlé metody. V úzkých mezerách a těžko dostupných místech může velikost navařovací hlavy působit problém. Výhodou je dostupnost širokého spektra druhů přídavných materiálů, nevýhodou může být však vyšší cena práškových přídavných materiálů
 - Laserové navařování drátu – lze realizovat jako v případě navařování prášku strojně. Další možností je ruční vedení drátu, tzv. mikronavařování.

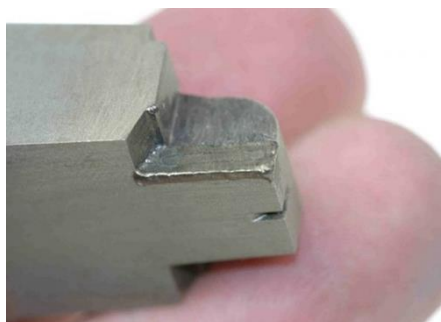
2 LASEROVÉ NAVAŘOVÁNÍ [3], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27]

Laserové navařování je v současnosti v širokém rozsahu využíváno jako součást výrobní technologie i jako prostředek k prodloužení životnosti strojů, zařízení a nástrojů. Velké uplatnění nachází tedy právě v opravárenství. Umožňuje opravy stávajících poškozených povrchů a je optimální technologií pro opravy forem, nářadí, nástrojů a adhezně namáhaných dílců. Laserové navařování lze také využít pro vytváření funkčních povlaků odolných proti opotřebení a korozi. Na základě způsobu použití této technologie lze rozlišit:

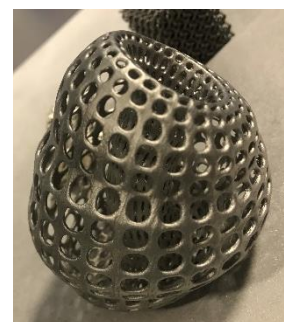
- povlakování (obrázek 16)
- opravy a renovace součástí a nástrojů (obrázek 17)
- vytváření nových součástí a prototypů pomocí 3D tisku (obrázek 18)



Obr. 16: Povlakování [19]



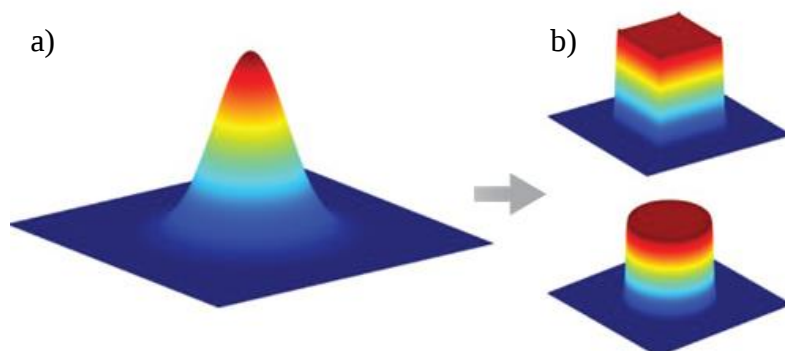
Obr. 17: Opravy a renovace [25]



Obr. 18: 3D tisk

Podstatou laserového navařování je nanášení vrstvy přídavného materiálu na povrch součásti. Tepelným účinkem laseru dojde k natavení přídavného materiálu a současně tenké vrstvy základního materiálu. Mezi oběma materiály dojde k vytvoření metalurgického spoje a na povrchu součásti vzniká návar.

Jedním z hlavních parametrů laserového paprsku, který má důležitou roli v procesu, je transverzální elektromagnetický mód značený zkratkou TEM. Tento parametr v podstatě označuje rozložení intenzity záření na průřezu paprsku. Nejběžnější a nejjednodušší mód je TEM_{00} , což je mód nultého řádu, který má při ideálních podmínkách Gaussovo rozložení. S tímto režimem se lze nejčastěji setkat při dělení materiálů, kdy je potřeba dosáhnout co nejmenšího poloměru a velmi vysoké hustoty energie dopadajícího paprsku. Využívá se také pro lasery s nízkým výkonem, kvůli nejlepšímu využití energie svazku. Pokud je paprsek zaostřen do bodu, dochází k intenzivnímu tavení a odpařování materiálu, což je nežádoucí. Při technologii navařování je nutné, aby byl paprsek zaostřen do plošky a docházelo tak k natavování povrchové vrstvy materiálu, jak již bylo zmíněno výše. Používá se proto speciální optika, která transformuje Gaussovo rozložení paprsku na tzv. flat-top mód (obrázek 19). Optickým prvkem je integrátor (obrázek 20), jehož povrch je tvořen fazetkami.

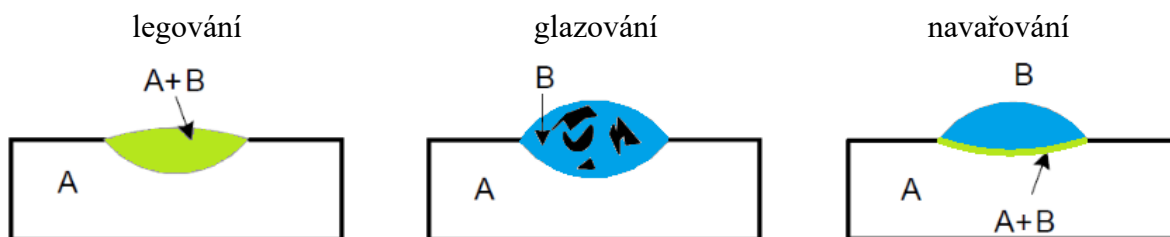


a) Gaussovo rozložení, b) flat-top módy
Obr. 19: flat-top módy [26]



Obr. 20: integrátor [27]

Díky výhodám laseru, spočívajícím ve velmi vysoké hustotě dodané energie, v důsledku čehož je doba tavení krátká a dochází k natavení malé oblasti, se navařené vrstvy vyznačují malou tepelně ovlivněnou oblastí, díky čemuž nedochází k nežádoucím změnám vlastností základního materiálu. V závislosti na množství přidaného materiálu a dosaženém stupni jeho promísení se základním materiálem, lze rozlišit laserové legování, glazování a navařování. To je znázorněno na obrázku 21. Při laserovém legování je do taveniny přidáváno malé množství přídavného materiálu a navařená vrstva je tvořena homogenní směsí obou materiálů. Naproti tomu u navařování je toto promísení nežádoucí a zředění přídavného materiálu musí být co nejmenší.

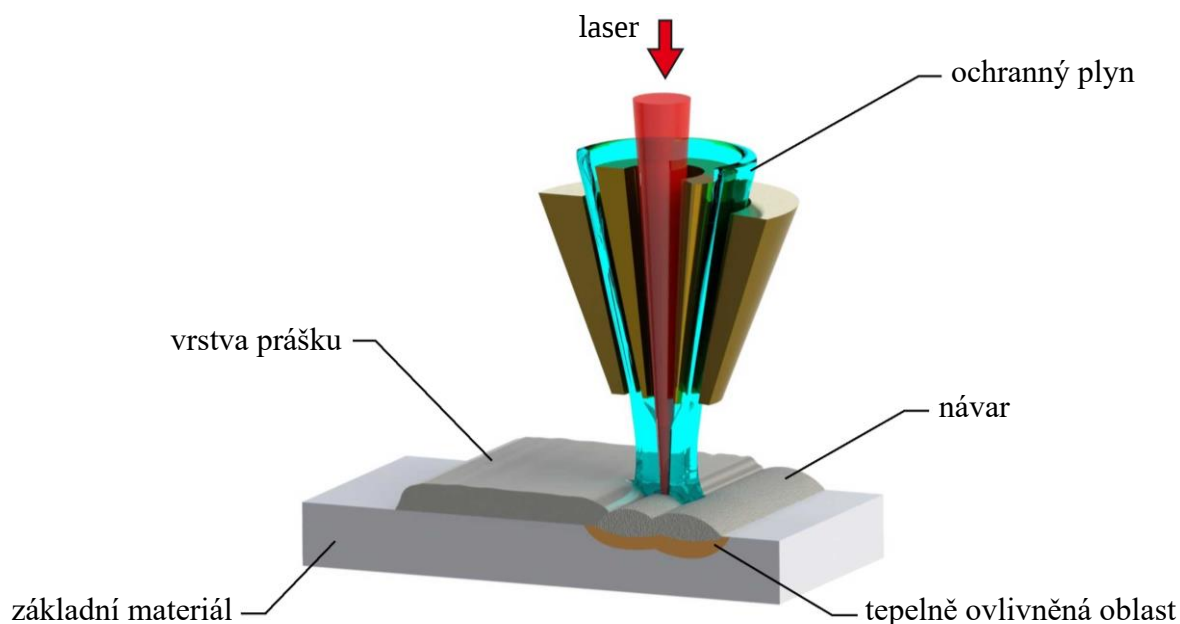


Obr. 21: Rozdíl mezi legováním, glazováním a navařováním [3]

2.1 Způsoby laserového navařování [3], [21], [22], [23], [28], [29], [30]

Laserové navařování lze rozdělit podle aplikace přídavného materiálu rozdělit do dvou skupin na dvoufázový a jednofázový proces.

Dvoufázový proces je jednoduchá a relativně levná metoda používaná pro tvorbu vrstev a povlaků. Schéma je znázorněno na obrázku 22. První fáze spočívá v nanášení práškového přídavného materiálu na povrch součásti před laserovým zpracováním. Ve druhé fázi je prášek laserovým paprskem nataven spolu se základním materiálem. Prášek umístěvaný na podklad musí mít dostatečnou adhezi k povrchu a také dostatečnou soudržnost částic k sobě navzájem. Je třeba se vyvarovat odfouknutí prášku proudem plynu při druhé fázi, proto je prášek obvykle smíchán s chemickým pojivem. Odpařování pojiva však může vést ke vzniku nežádoucí porozity. Produktivita této metody je poměrně nízká, v průmyslu je proto málo používaná a hlavní oblastí využití je navařování menších ploch součástí nebo legování. Nevýhodou této metody je také to, že proces je možné realizovat pouze v horizontální poloze.

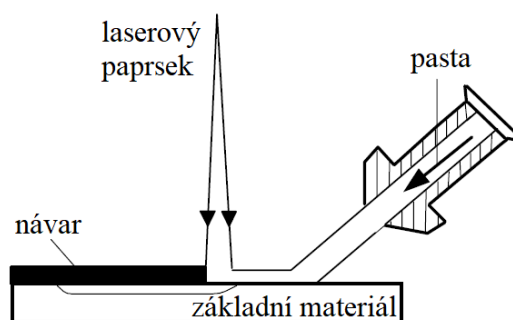


Obr. 22: Dvoufázové navařování [29]

V jednofázovém procesu je tepelným účinkem laserového paprsku nataven povrch základního materiálu a do tavné lázně je současně přiváděn přídavný materiál, který je rovněž nataven. Následně dochází ke spojení obou materiálů a na povrchu součásti vzniká návar. Tento způsob navařování je často využíván. Přídavný materiál může být do pracovního prostoru dodáván v několika různých formách: podáváním pasty, podáváním drátu a vstřikováním prášku.

2.1.1 Podávání pasty [3], [22]

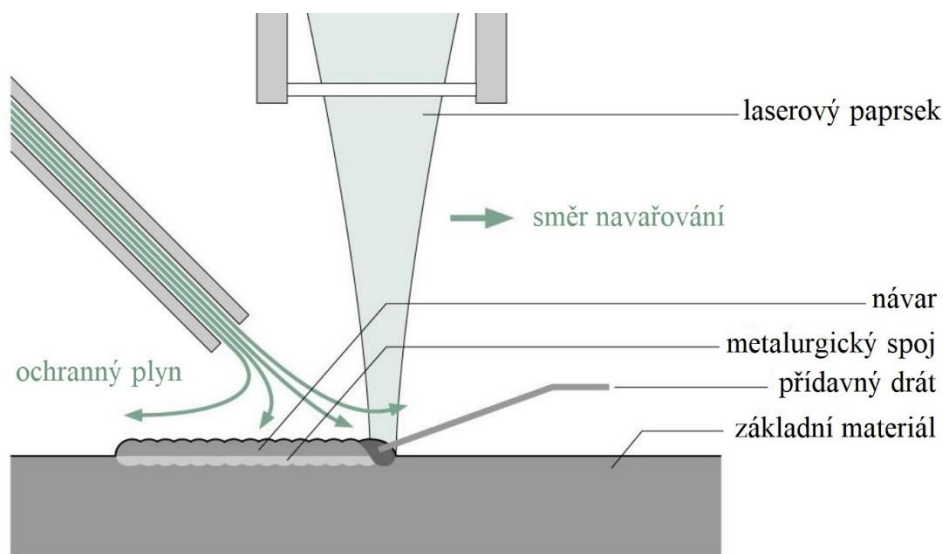
Přídavný materiál ve formě pasty je pokládán na základní materiál těsně před paprsek laseru a jeho roztavením vzniká návar. Schéma je na obrázku 23. Během navařování se vysušuje pojivo a proces proto musí probíhat v krátkém čase, jinak by došlo k jeho úplnému vysušení a následně i k od fouknutí částic prášku ochranným plynem. Obvykle se proto pojivo z důvodu krátkého času nevypaří úplně, což způsobuje pórovitost návaru. Z tohoto důvodu je tato metoda málo používaná.



Obr. 23: Navařování pasty [3]

2.1.2 Podávání drátu [3], [22], [28], [32], [31], [33], [34]

Laserové navařování s přídavným materiálem ve formě drátu je metoda, která je velmi často využívána. Technologii lze realizovat několika způsoby, jedním z nich je boční podávání drátu, jehož schématické znázornění je na obrázku 24. Svarová oblast je chráněna před nepříznivými vlivy okolní atmosféry ochranným plynem. Je důležité zajistit přesné vedení a dávkování drátu do tavné lázně, aby nedocházelo k nespojitostem v návarech.

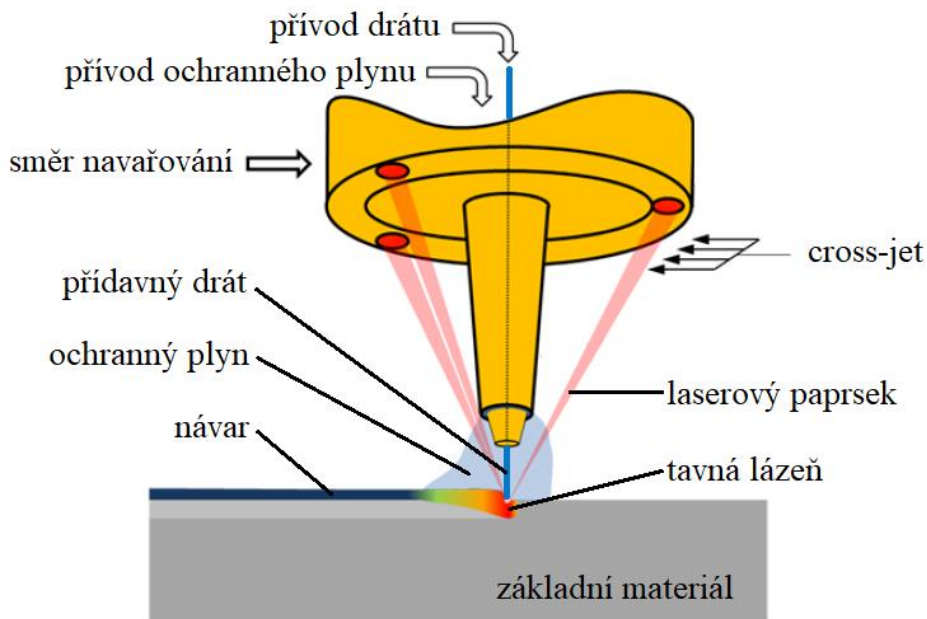


Obr. 24: Navařování drátem [33]

Výhodami této metody v porovnání s navařováním práškem jsou například větší využití přídavného materiálu, nižší cena drátu oproti prášku a větší variabilita polohy navařování.

Nevýhodou bočního podávání drátu je vliv směru podávání drátu na kvalitu navařené vrstvy. Tato technika je navíc oproti prášku méně účinná. To lze řešit zvýšením výkonu laseru, což ale způsobí vyšší přehřátí základního materiálu, větší zředění a také větší tepelně ovlivněnou oblast. Další možností, jak zvýšit účinnost procesu, je předehřev drátu, například odporovým teplem (více než 1000 °C). Navařování drátu je také možné kombinovat s MIG svařováním, čímž může být množství nataveného přídavného materiálu zvýšeno až 4x a návary dosahují tloušťky až 5 mm s nízkým zředěním. Rychlost navařování tak může dosáhnout až 3x vyšších rychlostí než u běžného laserového navařování drátu.

Podávání drátu může být realizováno také koaxiálně. Pro tuto techniku jsou využívány koaxiální hlavy, které jsou vybaveny speciální optikou pro dělení paprsku, která byla vyvinuta firmou Fraunhofer IWS. Základním principem těchto hlav je, že speciální optika rozdělí kolimovaný laserový paprsek na tři oddělené paprsky, které jsou následně zaostřeny do kruhového ohniska. Zaostřovací průměr je závislý na průměru použitého drátu. Optické elementy jsou umístěny v takové poloze, že tavení drátu probíhá přesně ve střední ose laserového paprsku. Drát tak proniká do středu taveniny generované laserem, což vede k dokonalé nezávislosti svařovacího procesu na směru a gravitaci. Výhodou této konfigurace je, že lze provádět všechny technické svařovací pozice. Schématické znázornění koaxiálního podávání drátu je na obrázku 25.

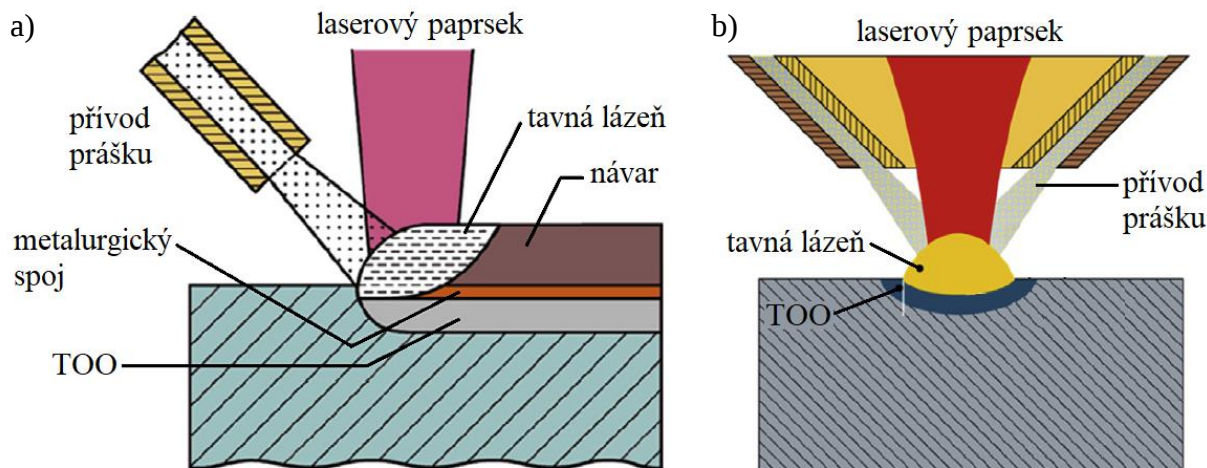


Obr. 25: Koaxiální podávání drátu [34]

Laserové navařování drátem je metoda, kterou lze aplikovat nejen strojně, ale lze ji také použít i při ručních opravách. Pro tyto účely je používáno pulzní mikronavařování.

2.1.3 Navařování prášku [3], [18], [20], [22], [28], [35], [36]

Navařování pomocí přídavných materiálů ve formě prášku je velmi efektivní. Prášek je dopravován koaxiální nebo laterální tryskou do místa působení laseru za pomoci inertního nosného plynu, kterým je např. argon nebo hélium. Schéma je na obrázku 26.



a) boční vstřikování, b) koaxiální vstřikování

Obr. 26: Princip navařování pomocí vstřikování prášku [20]

Při průchodu laserovým paprskem se prášek rychle ohřeje. Tavení nastává na rozhraní se základním materiálem, který je také natavován laserem, a mezi oběma materiály vzniká metalurgický spoj. Jako ochrana před nepříznivými vlivy okolní atmosféry je do místa taveniny foukán ochranný plyn. Je také velmi důležité dobře zvolit procesní parametry. Energie laseru musí být dost velká na to, aby natavila prášek, ale současně nesmí dojít velkému natavení podkladu, což by mělo za následek velké zředění a tím i degradaci kvality navařené vrstvy.

Systém podávání prášku prošel od svých počátků značným vývojem. V současnosti jsou používány tři základní konfigurace práškových trysek, přičemž každá z nich má své specifické použití, výhody i nevýhody:

- Boční trysky – jsou vůči základnímu materiálu skloněny pod určitým úhlem, prášek je přiváděn do místa působení laserového paprsku z boku prostřednictvím inertního plynu. Schématické znázornění je na obrázku 26-a. Nevýhodou tohoto způsobu přívodu prášku je, že ovlivňuje tvar návaru. Využitelnost prášku je v porovnání s přívodem koaxiálními tryskami menší, pohybuje se v rozmezí 50 až 70 %. Výhodou je dobrá přístupnost k součásti, takže se často využívají právě v případech, kdy nelze návar provést koaxiálními tryskami. Další výhodou je šířka návaru 0,5 až 25 mm.
- Kontinuální koaxiální trysky – mají kuželový tvar a vyváří kónický proud prášku který obklopuje paprsek laseru. Tento typ trysek má řadu výhod, kterými jsou například integrovaný ochranný plyn a dobrá ochrana tavné lázně, dobrá fokusovatelnost proudu prášku v rozsahu 0,3 až 1,5 mm a v neposlední řadě vysoká využitelnost prášku, která přesahuje 80 %. Šířka návarů se pohybuje v rozmezí 0,1 až 5 mm. Lze navařovat pod úhlem maximálně 20°.
- Radiálně symetrické boční trysky – jsou složeny z několika (nejčastěji tří) oddělených trysek umístěných koaxiálně vzhledem k paprsku laseru. Jednotlivé trysky produkují samostatné proudy prášku, které jsou následně fokusovány do jednoho bodu. Využitelnost prášku je poměrně vysoká a to přibližně 70 %. Dosažitelná šířka návarů se pohybuje v rozsahu 1 až 6 mm a fokusovatelnost 1 až 3 mm. Výhodou je možnost navařovat i plochy ve svislé poloze.



Obr. 27: Koaxiální tryška [36]



Obr. 28: Radiálně symetrická tryška [36]

2.2 Vlastnosti navařených vrstev [3], [37], [38], [39], [40]

Kvalitu a vlastnosti návaru ovlivňuje řada vstupních a operačních parametrů, během procesu následně i fyzikálních vlivů:

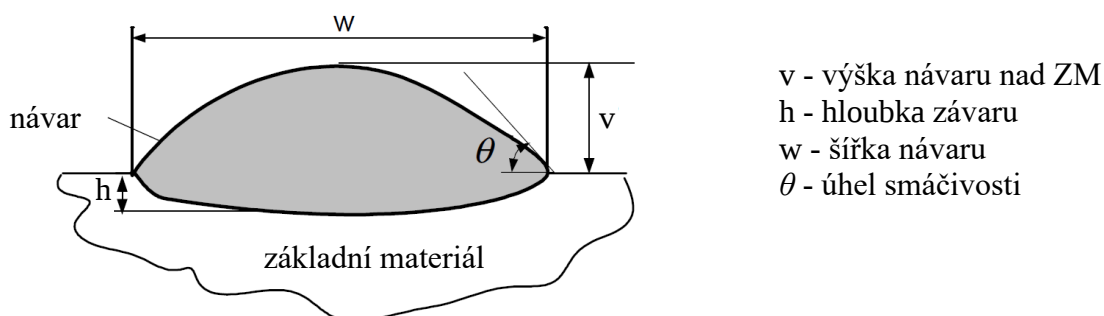
- Laserový zdroj – má při navařování zásadní vliv a existuje několik parametrů, které ovlivňují celý proces, a tedy i výslednou kvalitu navařených vrstev. Jsou to zejména výkon laseru, vlnová délka, kontinuální nebo pulzní časový režim provozu, tvarování pulzů a mód laserového paprsku.
- Navařovaný materiál – je dalším významným parametrem. Nejzásadnější jsou chemické složení, metalurgické, termo-fyzikální a optické vlastnosti přídavného materiálu. Navíc hraje roli jeho forma, tedy zda je ve formě drátu nebo prášku, dále také způsob a rychlost jeho přivádění.
- Ochranná atmosféra a dopravní plyn – mají vliv zejména na výslednou kvalitu návarů. Záleží především na druhu, množství a rychlosti proudění ochranného a nosného plynu.
- Manipulační zařízení – může také ovlivňovat proces, především pak rychlostí, zrychlením a přesností navádění.

Vlastnosti navařených vrstev lze roztrždit do čtyř základních skupin, které jsou uvedeny v tabulce 2. Některé z těchto vlastností spolu navzájem souvisí. Například odolnost proti opotřebení je ovlivňována tvrdostí, mikrostrukturou, počtem trhlin a jejich hloubkou a směrem, spojením základního a přídavného materiálu apod. V praxi je obtížné vyrobit návar, který splňuje všechny požadavky a obvykle je potřeba najít rovnováhu mezi několika vlastnostmi. Příkladem je snížení tvorby trhlin v návaru přehřátím základního materiálu. Přehřev snižuje rychlost ochlazování a výsledné zbytkové napětí. V důsledku toho je zabráněno tvorbě trhlin a snižuje se také tvrdost. Prevence tvorby trhlin je důležitá, protože trhliny vyvolávají korozní lomy a snižují velikost meze únavy.

Tabulka 2: Základní vlastnosti navařených vrstev [3, 37].

Geometrické vlastnosti	Mechanické vlastnosti	Metalurgické vlastnosti	Kvalitativní vlastnosti
- rozměry navařené vrstvy - zředění - drsnost povrchu	- rozložení tvrdosti - zbytkové napětí - odolnost proti opotřebení - pevnost v tahu	- mikrostruktura - zředění - velikost zrna - homogenita - odolnost proti korozi	- pórovitost - praskání

Hlavními požadavky, které musí návary splňovat, jsou především nízké zředění, nulová pórovitost, a s nimi spojené pevnost a odolnost proti opotřebení. Na obrázku 29 je schematicky znázorněna a popsána geometrie návaru.



Obr. 29: Geometrie návaru [3]

Zředění je používáno k charakterizování kvality navařené vrstvy a je definováno jako relativní množství základního materiálu, který byl během procesu nataven a smíchán s přídavným materiálem. V procesu laserového navařování je požadováno silné spojení mezi oběma materiály. To vyžaduje natavení povrchu součásti a spojení tak zajišťuje metalurgická vazba, která vznikne promísením nataveného základního a přídavného materiálu. K dosažení čisté návarové vrstvy, která je co nejméně zředěná základním materiálem, je nutné, aby hloubka natavení byla co nejmenší. Velké zředění totiž degraduje vlastnosti návaru. Obecně platí, že zvyšováním výkonu laseru narůstá i zředění. Míru zředění navařného materiálu základním materiálem lze určit dvěma způsoby. První metoda je založena na geometrii návaru a zředění je definováno jako poměr hloubky závaru v základním materiálu a celkové výšky návaru nad povrchem deponované součásti. Tento přístup předpokládá homogenní rozdělení prvků na průřezu. Druhá metoda je tzv. chemické nebo objemové zředění, která je založena na srovnání chemického složení čistého přídavného materiálu a materiálu již navařného na podklad. Protože ne všechny vrstvy mají rovnoměrné rozložení prvků, je tato metoda upřednostňována před geometrickým přístupem, neboť umožňuje sledovat průběh zředění na průřezu.

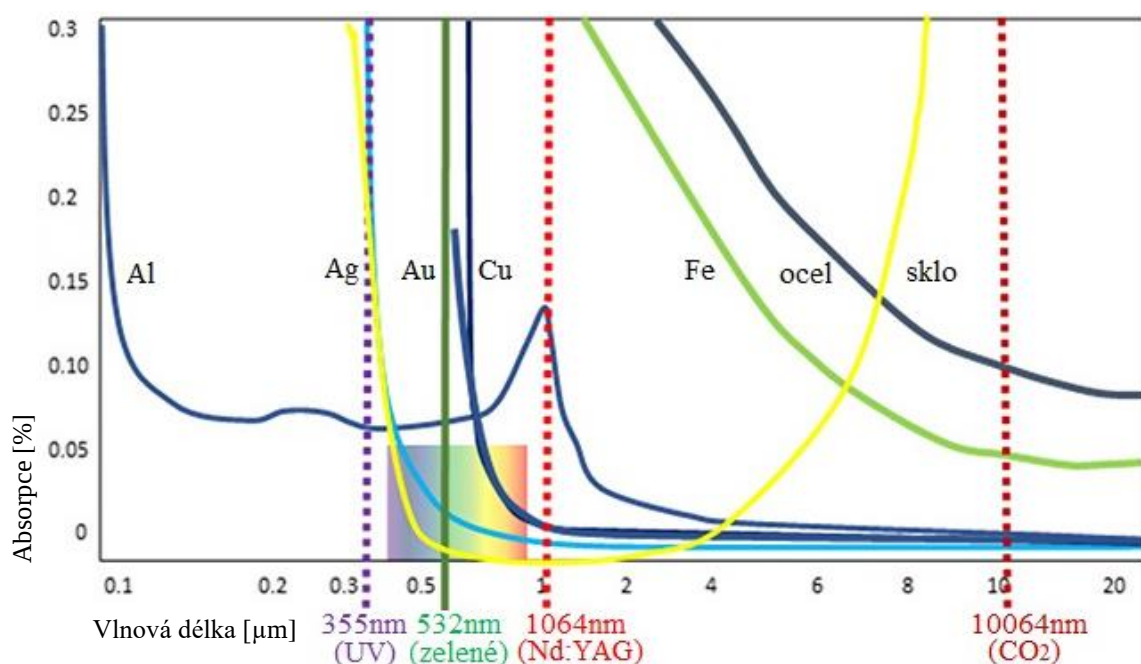
Dalším parametrem, na který je kladem velký důraz, je porozita. Tento jev je nežádoucí a degraduje kvalitu navařených vrstev. Porozita může mít několik příčin. Jednou z nich je vznik plynových bublin, které jsou následně zachyceny v roztavené oblasti. Další příčinou může být nerovnoměrné tuhnutí, v důsledku čehož dojde k uzavření některých stále natavených oblastí. To je následováno kontrakcemi v těchto místech a následně vznikem tahového napětí v navařené vrstvě, což může dokonce vést i k tvorbě trhlin a dutin. Porozita může vznikat také na rozhraní mezi základním a přídavným materiálem, a to například v důsledku přítomnosti nečistot na povrchu součásti nebo při nesprávném dávkování přídavného materiálu.

Charakteristické znaky vrstev navařených laserem jsou metalurgické spojení navařené vrstvy se základním materiálem, malé zředění a vysoká přesnost tvarů, čímž se kvalitativně liší od jiných technologií nanášení materiálu nebo od tepelně nastříkaných vrstev. Z důvodu místního přívodu tepla, které je dáno dokonalým zaostřením paprsku laseru, je do základního materiálu vnášeno malé množství energie, proto je tepelně ovlivněná oblast i oblast vzniku trhlin velmi malá. Díky malému tepelnému ovlivnění součástí dochází rovněž obecně k menší deformaci než u konvenčních technologií nanášení vrstev. Díky tomu, že proces probíhá v atmosféře ochranného plynu a paprsek laseru taví současně tenkou vrstvu na povrchu součásti i přiváděný přídavný materiál, dosahují návary stoprocentní hustoty naneseného materiálu a rovněž se vyznačují vysokou čistotou a nízkou porozitou. Díky tomu, že laserové navařování je velmi přesné, se minimalizují nebo úplně odpadávají nároky na následné obrábění návarů. V neposlední řadě je také velmi výhodná možnost automatizace celého procesu.

Nevýhodou mohou být vyšší pořizovací a provozní náklady zařízení. V případě práškového navařování pak také vyšší cena přídavného materiálu. Výhodou prášků je však širší sortiment typů přídavných materiálů, k dostání jsou totiž i materiály, které ve formě drátu nejsou dostupné, a lze tak navařovat kovové i nekovové materiály.

2.3 Laserové zdroje [33], [41], [42], [43], [44], [45]

V současné době se lasery využívají v mnoha oborech. Konkrétní užití obvykle klade i specifické požadavky na vlastnosti laserového zdroje a na konstrukční provedení laserové stanice. V současné době existuje mnoho typů laserů a při výběru laserového systému pro konkrétní aplikaci má zásadní vliv vlnová délka záření. Ta souvisí s absorpcí záření povrchem materiálu, a tedy i účinností procesu. Na obrázku 30 je znázorněna závislost míry



Obr. 30: Absorpce materiálu v závislosti na vlnové délce [42]

absorpce na vlnové délce záření pro různé technické materiály. Další parametry, které jsou závislé na absorpci, jsou například pracovní rychlost a míra tepelného ovlivnění materiálu.

Lasery lze obecně rozdělit z více hledisek na mnoho typů, nejčastěji pak podle druhu aktivního prostředí na plynové, kapalinové a pevnolátkové. Dle časového režimu provozu lze rozlišit kontinuální, kvazikontinuální a pulzní lasery. Pulzní lasery se dále člení dle doby trvání pulzů na lasery s dlouhými, krátkými a velmi krátkými (pikosekundové, femtosekundové) pulzy, a nacházejí uplatnění především při ručním navařování a svařování velmi tenkých dílů a drobných součástí, gravírování, strukturování povrchů a vrtání.

V současných průmyslových aplikacích se používá pět základních typů laserů, které jsou uvedeny v tabulce 3. Tyto lasery je také možné využít právě pro navařování.

Tabulka 3: Přehled základních typů laserů [43].

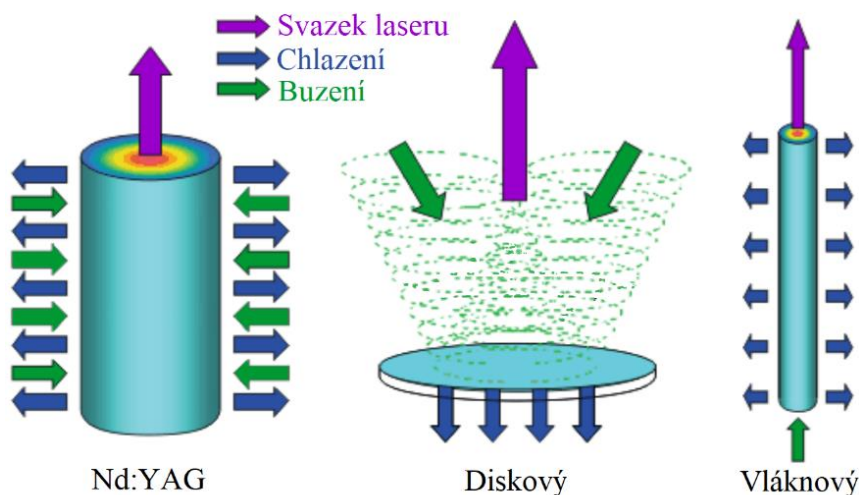
Laser	Vlnová délka	Buzení	Účinnost	Režim	Výkon / Energie	Typické aplikace
Nd:YAG	1064 nm	laserové diody	7 %	kontinuální	až 6kW	řezání, svařování
				pulsní	mJ, ns (100 W)	značení, gravírování
		lampy	3 %	pulsní	mJ, ms (600 W)	svařování,
CO2	10600 nm	radio frekvenčně	10 %	kontinuální, pulsní	10-250 W	značení, gravírování, řezání nekovů
					až 5kW (slab)	řezání, svařování
		elektricky	25 %		až 20kW (průtočné)	řezání, svařování
Diskový	1070 nm	laserové diody	15 %	kontinuální	až 16kW	řezání, svařování
Vláknový	1070 nm	laserové diody	30 %	kontinuální	až 80kW	řezání, svařování
				kvazi kontinuální	J, ms (1,2 kW)	značení, gravírování, mikro-obrábění
				pulsní	mJ, ns (100 W)	značení, gravírování, mikro-obrábění
Diodový	808-980 nm	Elektricky	60 %	kontinuální	až 10kW	svařování, kalení, nanášení vrstev

2.3.1 Pevnolátkové lasery [14], [33], [43], [46], [47]

Aktivní prostředí u pevnolátkových laserů je pevná, opticky propustná látka. Z laseru vychází záření v podobě úzkého, málo rozbíhavého svazku. Tento svazek je veden do technologické hlavy pomocí optického vlákna, v případě nutnosti soustavou zrcadel. Možnost vedení záření flexibilním optickým vláknem je velkou výhodou pevnolátkových laserů, neboť usnadňuje přenos záření z laseru do místa procesu.

Pevnolátkové lasery lze rozlišit na základě materiálu aktivního prostředí. Nejčastěji používanými typy jsou Nd:YAG, vláknový a diskový laser, jejichž aktivní prostředí tvoří matrice umělého krystalu YAG (ytrium aluminium granát) dopovaného ionty neodymu (Nd), případně yterbia (Yb). Hlavní rozdíl mezi těmito typy laserů je v geometrii aktivního prostředí. Schéma je uvedeno na obrázku 31. U Nd:YAG laseru je aktivní prostředí tyčinka. Mohou pracovat v kontinuálním i pulzním provozu, jejich nevýhodou je nízká účinnost přeměny elektrické energie na světelnou. Další variantou je diskový laser, jehož aktivní prostředí má tvar disku. Oproti Nd:YAG laseru se vyznačuje především vyšší účinností (15-20%) a dobrou

kvalitou výstupního svazku, dále také lepší stabilitou módu a kompaktnější konstrukcí. Vláknový laser je technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru, aktivním prostředím je dlouhé optické vlákno. Výhodou těchto laserů je jednoduchá konstrukce, vysoce kvalitní a stabilní mód, a velmi kvalitní laserový svazek, který může být fokusován na velmi malý průměr. Oproti předchozím typům dosahuje také vysoké účinnosti (50 %).



Obr. 31: Pevnolátkové lasery [43]

Dalším typem pevnolátkových laserů jsou lasery s neodýmovým sklem. Narozdíl od předešlých typů, kdy jsou ionty neodymu rozptýleny v YAG matrici, slouží jako základní materiál sklo (SiO_2). Pracují na vlnové délce $1,06 \mu\text{m}$.

Posledním představitelem a zároveň nejstarším typem jsou lasery rubínové. Jako aktivní prostředí je použit krystal korundu (Al_2O_3), aktivní látkou jsou ionty chromu. Laser pracuje v pulsním režimu a vyzařuje červené světlo o vlnové délce $0,694 \mu\text{m}$.

2.3.2 Plynové lasery [21], [23], [41], [43], [48], [49]

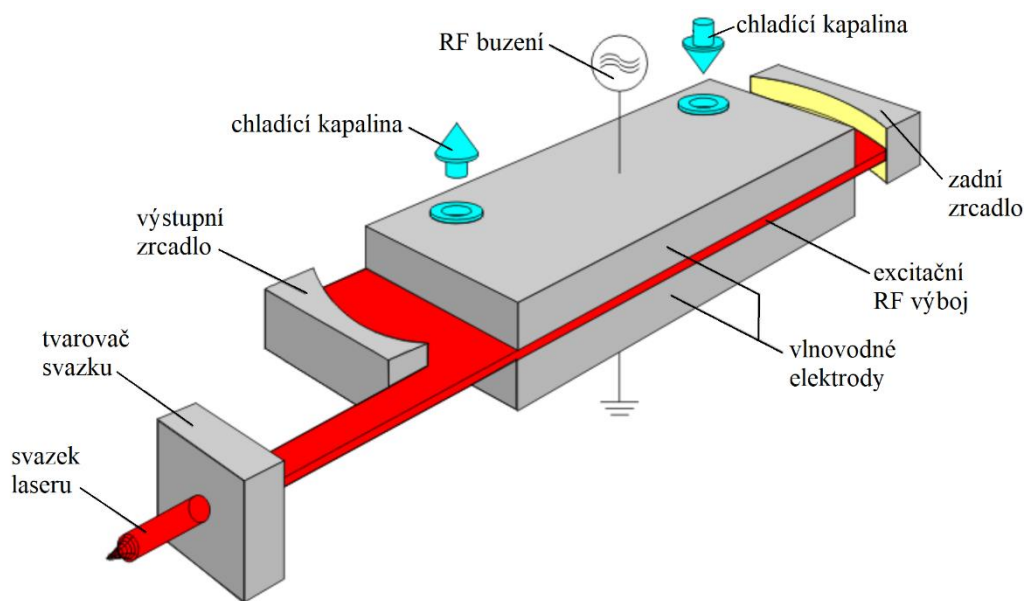
Plynové lasery jsou již dlouho známé a používané. Úrovně výkonu se pohybují v rozsahu od miliwattů (He-Ne lasery) až do několika kilowattů (lasery na bázi CO_2). Mohou pracovat v kontinuálním i pulzním režimu a výstupní vlnová délka je v rozsahu oblastí ultrafialových až infračervených záření. Jak už je zřejmé z názvu, aktivním prostředím je plyn. Základní rozdělení plynových laserů je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 4: Rozdělení plynových laserů [21, 41].

Rozdělení dle způsobu čerpání	Rozdělení dle aktivního média
Lasery s výbojem v plnu	Atomové
Lasery s přímým čerpáním	Iontové
Dynamické	Molekulární
Chemické	S parami kovů a jiných prvků
Excimetrové	

Do skupiny plynových laserů patří CO_2 lasery s aktivním prostředím tvořeným směsí plynů obsahující oxid uhličitý, které generují stimulované záření o vlnové délce $10,6 \mu\text{m}$ s účinností až 25 %. V průmyslu se používají lasery buzené radio-frekvenčně nebo elektrickým výbojem. Z hlediska uzavřenosti rezonátoru lze rozlišit tzv. sealed off lasery s hermeticky uzavřeným rezonátorem a tzv. průtočné lasery, ve kterých plyn neustále proudí rezonátorem, což je nutné u vysokých výkonů. Do výkonu 5 kW jsou nejčastěji využívány lasery DC RF CO_2 , tedy

difúzně chlazené a radio-frekvenčně buzené. Schématické znázornění je na obrázku 32. Tyto typy laseru se vyznačují vysokou spolehlivostí, dlouhou životností a nízkými provozními náklady.



Obr. 32: Schéma DC RF CO₂ laseru [43]

Velkou nevýhodou CO₂ laserů oproti pevnolátkovým je, že z důvodu velké vlnové délky nelze záření vést optickým vláknem. Pro vedení svazku je nutné využít zrcadla, optická dráha je tak složitější a je nutná její pravidelná kalibrace. Navíc jsou zde nároky na čistotu a údržbu zrcadel. CO₂ lasery jsou kvůli svým nevýhodám a nižší účinnosti postupně vytlačovány a nahrazovány vláknovými, ale stále si v průmyslu uchovávají dobré postavení, zejména vysokým dosahovaným výkonům až do 20 kW. Lasery s vyššími výkony jsou v průmyslu uplatňovány především při řezání a svařování kovů. Zařízení s výkony do 1,5 kW nacházejí využití v oblasti řezání nekovů, např. sklo, papír, plasty apod., značení a gravírování, kdy nelze použít ostatní lasery s vlnovou délkou cca 1 μm .

2.3.3 Diodové lasery [23], [30], [48], [50], [51]

První diodové lasery byly vyvinuty již v roce 1962, byly to pulzní lasery s aktivním prostředím GaAs, které měly vysoké proudové hustoty a pro práci s nimi byly nutné kryogenní teploty. Od té doby prošla technologie značným vývojem a řadou vylepšení. K průlomu došlo v roce 1969 a v současnosti nachází řadu uplatnění nejen ve strojírenství, ale i v mnoha dalších odvětvích vědy a průmyslu.

Aktivním prostředím diodových laserů je polovodič, konkrétně polovodičový P-N přechod. Záření je generováno přímo v polovodiči (GaAs, AlGaAs) průchodem elektrického proudu v P-N přechodu, který je tvořen soustavou elektronů a děr. V aktivní vrstvě vzniká interakcí elektronů (obsažených ve vodivé vrstvě) s dírami (v pásmu clon) světlo, jehož vlnová délka závisí na energetické mezeře mezi těmito dvěma pásmy. Inverze populace se dosáhne dodáním vhodného elektrického proudu do zařízení.

Diodové lasery mohou dosahovat výkonů v rozsahu od několika miliwatt až po desítky kilowatt. Vysokých výkonů je dosahováno skládáním jednotlivých diod do řad délky několika milimetrů, které se dále skládají do sloupců, kterých může být v jednom zařízení hned několik. Hlavní nevýhodou diodových laserů je nízká kvalita laserového svazku, respektive jeho velká rozbíhavost. Paprsek nelze fokusovat do malého bodu, proto jsou diodové lasery vhodné především pro povrchové aplikace svařování, navařování, kalení a nanášení povlaků. Výhodou je vysoká účinnost, která dosahuje téměř 50 %.

3 MATERIÁL FORMY [6], [52], [53], [54],

Výroba forem je pracná a jejich povrch musí být velmi kvalitní, takže cena za lidskou práci převyšuje cenu materiálu. Jak již bylo zmíněno, formy jsou značně tepelně i mechanicky namáhány. Z ekonomického hlediska je pro výrobu funkčních částí vhodné použít nízkolegované až vysokolegované oceli, kde vyšší cenu oceli vyvažuje vyšší životnost nástroje. Pro výrobu spodních dílů forem jsou používány legované nástrojové oceli pro práci za zvýšených teplot. V případě formy, která byla poskytnuta pro tuto práci, se jedná konkrétně o martenzitickou ocel X32CrMoCoV3-3-3, s číselným označením 1.2885. Chemické složení oceli je uvedeno v tabulce 5.

Tabulka 5: Chemické složení oceli 1.2885 [53].

Chemické složení [hm. %]								
C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	V
0,28-0,35	0,10-0,40	0,15-0,45	max. 0,03	max. 0,03	2,50-3,00	2,70-3,20	2,60-3,00	0,40-0,70

Na nástroje pracující za tepla je kladena řada požadavků. Především musí zůstat zachovány jejich mechanické vlastnosti za normálních i zvýšených teplot. Zásadní vliv na mechanické vlastnosti mají legury, tepelné a chemicko-tepelné zpracování. Hlavním legujícím prvkem je u těchto typů ocelí chrom, vlastnosti za tepla zlepšuje přísada molybdenu, kobaltu a vanadu. Základní požadavky kladené na oceli pro lití kovu jsou:

- Tvrdost – je závislá především na obsahu uhlíku a způsobu tepelného zpracování. Dále se její hodnota zvyšuje přísadou prvků, které tvoří s uhlíkem stabilní karbidy, především se jedná o Cr, V a Mo.
- Odolnost proti popouštění – se zajišťuje karbidotvornými prvky a přísadou kobaltu a je posuzována dle poklesu tvrdosti při dlouhodobém tepelném namáhání. Má-li ocel nízkou odolnost proti popouštění, dochází během provozu k poklesu mechanických vlastností a nastává plastická deformace funkčních částí, která má za následek změnu rozměrů odlitků.
- Odolnost vůči tepelné únavě – je závislá na mezi kluzu a houževnatosti oceli a je příznivě ovlivněna přísadou Cr a Mo. U nástrojů vystavených střídání teplot se tepelná únava projevuje jako trhliny na pracovním povrchu.
- Odolnost proti korozi roztavenými kovy – je ovlivněna reakcemi, které probíhají na styčné ploše formy a odlitku, kdy dochází k rozpouštění fází základní matrice v tavenině. Při odlévání slitin hliníku se tvoří křehké intermetalické fáze, které navíc umožňují vznik trhlin tepelné únavy a způsobují lepení odlitků na stěny formy.
- Prokalitelnost – je definován jako schopnost dosáhnout po kalení požadované hodnoty tvrdosti do určité hloubky. Prokalitelnost zvyšují téměř všechny legující prvky, především pak Cr, Mn a Mo.
- Mezi další požadavky patří v neposlední řadě i rozměrová stálost, a také odolnost proti abrazi a erozi za pracovních teplot, které souvisí se způsobem plnění formy.

Jak již bylo zmíněno, zásadní vliv na mechanické vlastnosti má také způsob tepelného zpracování, které vyvolává změny struktury a tím i změny vlastností v žádaném směru. Smyslem tepelného zpracování je získání vhodné struktury pro vlastní zpracování oceli a následně i finálních užitných vlastností hotového dílu nebo nástroje.

Pro výrobu spodního dílu formy jsou používány tyčové polotovary, které jsou dodávány ve stavu po žíhání naměkko. Ocel má v tomto stavu nízkou hodnotu tvrdosti a je dobře obrobitelná. Konečné požadované vlastnosti formy se získávají kalením a následným popouštěním. Kalení spočívá v ohřevu na teplotu austenitizace a po předepsané výdrži na kalící teplotě následuje ochlazení pod teplotu počátku vzniku martenzitu. Austenitizační teplotu je

potřeba zvolit dostatečně vysoko, aby došlo k rozpuštění přiměřeného množství karbidů a obohacení austenitu o uhlík a karbidotvorné prvky. Po zakalení jsou díly křehké a náchylné k praskání, proto je nutné následné popouštění, kterým se získají finální vlastnosti formy. Výše popouštěcí teploty se volí na základě požadované tvrdosti a dalších potřebných mechanických vlastností. Nástroje z ocelí pro práci za tepla se obvykle popouštějí v rozmezí teplot 500 až 650°C. Ohřev je pozvolný s dostatečnou prodlevou na popouštěcí teplotě, aby proces proběhl v celém objemu materiálu. Popouštění se provádí nejméně 2x.

Spodní díl formy je takto zušlechťen na tvrdost v rozsahu 35 až 40 HRC. Tato hodnota je volena z důvodu možnosti použití konvenčních nástrojů pro opracování formy při opravách.

3.1 Svařitelnost a stanovení teploty předehřevu [55], [56], [57], [58], [59], [60]

Svařitelnost je komplexní charakteristika materiálu, která vyjadřuje vhodnost kovu pro požadované svarové spoje předepsané jakosti a konstrukční spolehlivosti. Je podmíněna především chemickým složením, tepelným zpracováním, způsobem výroby, strukturou a z toho plynoucích pnutí ve svařovaném materiálu. Technologická svařitelnost je závislá na způsobu svařování a použitých parametrech.

Konkrétní svarový spoj je nutné posuzovat ze všech hledisek, z nichž nejjednodušší je vliv chemického složení. Ve srovnání s konstrukčními oceli mají nástrojové oceli podstatně vyšší obsah uhlíku, svařitelnost je navíc ztížena díky obsahu legujících prvků. Jsou také náchylné na vznik trhlin a vytvrzení. Oprava součástí z nástrojových ocelí bez toho, aby se změnila jejich původní vlastnosti, může být velmi obtížná. Svařují se zpravidla s předehřevem dle typu oceli, velikosti a geometrie.

Teplotu předehřevu je možno stanovit např. výpočtem pomocí rovnice dle Séferiána. pro výpočet budou použity hodnoty z tabulky 5, uvažovaná tloušťka materiálu $s = 40$ mm.

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad (3.1)$$

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,35 + 40 \cdot (0,45 + 3,2) + 20 \cdot 0 + 28 \cdot 3}{360} = 0,989 \%$$

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c \quad (3.2)$$

$$C_s = 0,005 \cdot 40 \cdot 0,989 = 0,198 \%$$

$$C_p = C_c + C_s \quad (3.3)$$

$$C_p = 0,989 + 0,198 = 1,187 \%$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \quad (3.4)$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{1,187 - 0,25} = \underline{\underline{338,7^\circ\text{C}}}$$

Na základě výpočtů dle Séferiána je vhodné volit teplotu předehřevu 400 °C.

Teplotu předehřevu lze také stanovit s využitím tabulek výrobců nástrojových ocelí. Příručka firmy BÖHLER Edelstahl doporučuje pro ocel 1.2885 volit předehřev v rozsahu 400 až 450 °C, což koresponduje s hodnotou zvolenou na základě předchozího výpočtu. Tabulka z příručky je uvedena v příloze 1.

4 METODY ZKOUŠENÍ [13], [55], [61], [62], [63], [64]

Vlastnosti navařených vrstev musí odpovídat kladeným požadavkům, ať už se jedná o mechanické vlastnosti nebo jiné podmínky nutné pro bezproblémovou funkci. Mechanické vlastnosti svarových kovů jsou ovlivňovány jeho chemickým složením, čistotou, způsobem krystalizace, mikrostrukturou, velikostí zrn, precipitačními procesy a stárnutím. Důležitým kvalitativním parametrem, který má zásadní vliv na bezpečný a spolehlivý provoz jsou vady svarových spojů. Vady ve svarech a návarech jsou považovány za nebezpečné koncentrátoři napětí, které nepříznivě ovlivňují velikost meze únavy, a tedy i životnost navařených vrstev. Vady svarových spojů lze rozdělit jednak podle polohy výskytu na povrchové a vnitřní, dále pak dle geometrie na:

- Bodové – zde se řadí mikropóry, případně malé sférické vměstky.
- Plošné – trhliny, mikrotrhliny, studené spoje, neperůvary a nespojitosti návaru se základním materiálem, tj. neprůvar v rovině souběžné s povrchem.
- Prostorové – plynové dutiny, např. bubliny a póry, vměstky a staženiny.

Vady svarových spojů a příčiny jejich vzniku jsou závislé na druhu svařovaného materiálu a použité technologii svařování. Pórovitost, praskavost nebo změny mechanických vlastností mohou být zapříčiněny také absorpcí plynů ve svarovém kovu.

Návary jsou navíc často za provozu vystavovány nepříznivým vlivům okolního prostředí, jako je abraze, koroze a konkrétně u licích forem také cyklické tepelné zatížení a erozivní působení proudícího roztaveného kovu, proto je kladen velký důraz na kvalitu navařených vrstev. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, je požadována nulová pórovitost a nízké zředění, s čímž se pojí pevnost a odolnost proti opotřebení. Komplex užitečných vlastností materiálů, svarových spojů a návarů, které představují garanci odolnosti vůči vnějším vlivům, a také definice vlastního strukturního stavu, úzce souvisí s bezpečným a spolehlivým provozem dílů a součástí. Tyto vlastnosti je nutné zkoušet a deklarovat a v průběhu rozvoje průmyslové výroby došlo ke standardizaci řady testů zajišťujících přesnost a reprodukovatelnost výsledků za daných podmínek zkoušení. Metody zkoušení lze rozdělit do dvou velkých skupin na destruktivní a nedestruktivní zkoušky.

Destruktivním zkouškám předchází odebrání vhodného zkušební vzorku, případně se samotná zkouška provádí přímo na součásti. Protože při zkoušení dochází k trvalému porušení, jsou tyto zkoušky uplatňovány zejména při návrhu technologie a schvalování postupů.

Nedestruktivní zkoušky jsou nejrozšířenější skupinou zkoušek, protože výrobky a součásti lze po provedení zkoušek nadále používat. Uplatnění nacházejí také přímo ve výrobních procesech např. při mezioperačních kontrolách. Vady v materiálu jsou zjišťovány nepřímo prostřednictvím fyzikálních veličin, které v interakci s prostředím mění své parametry. Na základě měření a rozboru těchto změn lze následně stanovit přítomnost, velikost, tvar i polohu vad ve zkoušené součásti. Nedestruktivním testováním však nelze prokázat všechny užité vlastnosti, a právě proto jsou uplatňovány i destruktivní zkoušky.

4.1 Destruktivní zkoušky [13], [14], [55], [62], [63]

Destruktivní zkoušky slouží především k určení základních mechanických vlastností materiálu a jak již vyplývá z názvu, při zkoušení dochází k porušení zkušební vzorku nebo testované součásti. Mezi základní destruktivní zkoušky patří například zkouška tahem, zkouška vrubové houževnatosti, zkoušky tvrdosti, zkouška v ohybu nebo zkoušky únavové pevnosti. U navařených vrstev se pak velmi často zkouší odolnost proti různým mechanismům opotřebení, neboť během provozu musí velmi často odolávat řadě nepříznivých vlivů okolního prostředí. Bylo vyvinuto mnoho zkoušek opotřebení a volba konkrétní metody se provádí na základě vlastností, které jsou od návarů požadovány.

Základním doplňkem mechanických testů jsou metalografická šetření, kterými se ověřuje stav struktury materiálů, resp. svarových spojů. Před vlastním provedením metalografické

analýzy je nutné provést přípravu zkušební vzorku. Výsledky metalografických pozorování se obvykle dokladují fotografickou reprodukcí. Podle použitého zvětšení je zkoušky možné rozdělit na ověření makrostruktury a mikrostruktury:

- Hodnocení makrostruktury – spočívá v pozorování vzorků pouhým okem nebo při malém, maximálně třicetinasobném zvětšení, např. s využitím lupy nebo optického mikroskopu. Vzorek odebraný příčným řezem zahrnuje svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast i základní materiál. Lze tak zjistit vady typu studených spojů, vměstků, ověřit spojení jednotlivých svarových housenek nebo velikost a tvar tepelně ovlivněné oblasti. Lze také určit zředění, které je pro navařování dáno vztahem:

$$Z = \frac{h}{v+h} \cdot 100 \quad (4.1)$$

kde: Z – zředění [%]

h – hloubka závaru [mm]

v – výška návaru (nad povrchem základního materiálu) [mm]

- Hodnocení mikrostruktury – spočívá v pozorování vhodně připraveného povrchu řezu vzorku, odebraného ze zkušební materiálu, při sto až tisícinásobném zvětšení pod mikroskopem. Mohou být použity stejné vzorky, jako při zkoušce makrostruktury, přičemž je kladen velký důraz na kvalitu povrchu a jejich bezchybnou přípravu, neboť i drobné chyby mohou mít za následek nesprávné vyhodnocení. Základním výstupem z mikroskopického pozorování je posouzení přítomnosti a množství, resp. rozložení základních strukturních fází nebo strukturních složek materiálu svaru a tepelně ovlivněné oblasti. Lze pozorovat jednotlivá zrna materiálu a jejich hranice.

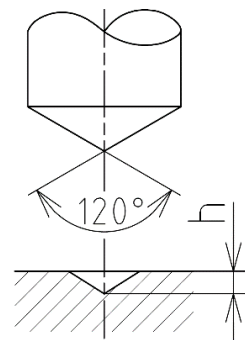
Velkou důležitost mají z hlediska hodnocení návarů také zkoušky tvrdosti, přičemž lze zjišťovat jak hodnoty tvrdosti na povrchu navařené vrstvy, tak i průběh tvrdosti na příčném průřezu návaru. Měření tvrdosti je dostatečně selektivní metoda, která umožňuje zjišťovat mechanické charakteristiky ve velmi malých vzdálenostech, tudíž lze pomocí ní nepřímo zjistit i pevnost jednotlivých zón tepelně ovlivněné oblasti.

4.1.1 Zkoušky tvrdosti [13], [14], [17], [54], [62], [63]

Tvrdot je jedna z mechanických vlastností, která má u kovových materiálů mimořádnou důležitost. U návarů, resp. svarových spojů, umožňuje její měření zjistit průběh tvrdosti na příčném průřezu a provádí se pro stanovení nejnižší a nejvyšší hodnoty tvrdosti základního a svarového kovu. Je definována jako odpor materiálu proti deformaci povrchu vnikajícím tělesem. Zkušební tělíska se nazývají indentory a jsou přesně geometricky definována. Pro měření tvrdosti bylo vyvinuto mnoho zkušebních metod, které lze podle rychlosti zatížení rozdělit na statické a dynamické, dle principu jsou rozlišovány jako vnikací, vrypové, odrazové a kyvadlové.

V případě statických vnikacích zkoušek je měřítkem tvrdosti velikost plastické nebo elasticko-plastické deformace. V technické praxi mezi nejpoužívanější zkoušky patří:

- Zkouška tvrdosti dle Rockwella – používá se ve dvou variantách, které se liší použitými indentory. Pro materiály o vysoké tvrdosti se používá diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° (obrázek 33), v případě měkčích materiálů je indentorem kalená ocelová kulička s průměrem 1/16". Tvrdot je vyjádřena jako rozdíl mezi smluvní a trvalou hloubkou otisku, přičemž odpovídající hodnota tvrdosti se odečítá přímo na stupnici měřicího přístroje.



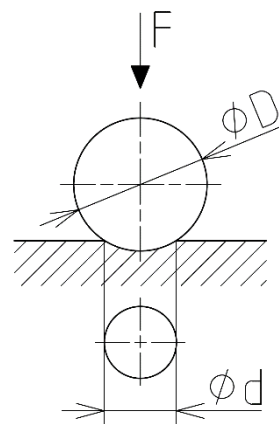
Obr. 33: Zkouška tvrdosti dle Rockwella [63]

Při zkoušce lze použít stupnice A až K. Nejčastěji jsou používány stupnice A a C, pro které se využívá diamantový kužel, a stupnice B pro ocelovou kuličku. Ve značení tvrdosti dle Rockwella se pak kromě číselné hodnoty tvrdosti uvádí i písmena HRA, HRB nebo HRC, které udávají označení použité metody a stupnice.

- Zkouška tvrdosti dle Brinella (HB) – je použitelná pro měkké a středně tvrdé materiály s heterogenní strukturou. Spočívá v zatlačování kuličky z kalené oceli (HBS) nebo slinutého karbidu (HBW) do povrchu zkoušeného materiálu konstantní silou, čímž vznikne otisk, u kterého se opticky měří jeho průměr a určuje jeho plocha. Schéma je na obrázku 34. Tvrdost se určí jako poměr zatěžovací síly a plochy otisku dle vztahu:

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102}{\frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4.2)$$

kde: F – zatěžující síla [N]
 D – průměr kuličky [mm]
 d – průměr vtisku [mm]

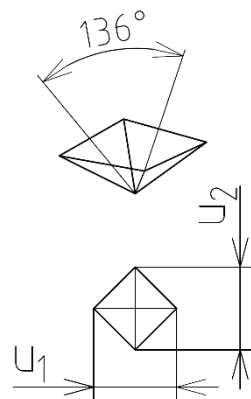


Obr. 34: Princip zkoušky dle Brinella [63]

- Zkouška tvrdosti dle Vickerse (HV) – využívá jako indenter diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° a vzhledem k jeho tvrdosti je zkouška vhodná i pro materiály o vyšších pevnostech. Po odlehčení zkušebního tělíka se měří délky uhlopříček otisku, ze kterých se vypočte střední hodnota. Schéma je znázorněno na obrázku 35. Hodnota tvrdosti je dána podílem zatěžující síly a povrchu otisku, její výpočet je dán pomocí vzorce:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (4.3)$$

kde: F – zatěžující síla [N]
 u – střední uhlopříčka vtisku [mm]



Obr. 35: Zkouška tvrdosti dle Vickerse [63]

- Zkouška mikrotvrdosti – provádí se pro určení tvrdosti jednotlivých složek struktury materiálu na metalografických výbrusech. Princip je podobný jako v případě Vickersovy zkoušky, ale s tím rozdílem, že síly a vtisky jsou výrazně menší a měří se mikroskopicky. Jako hranice mezi makro a mikrotvrdostí se často uvádí hodnota zatížení 19,8 N.

Další skupinou jsou dynamické zkoušky tvrdosti, jejichž principem je aplikace rázového zatížení indentoru. Jsou účelné především v případech, kdy je požadována mobilita zkoušení pomocí přenosného přístroje, a používají se zejména při ověřování vlastností u rozměrných a velmi hmotných výrobků, při montážních pracích nebo při ověřování tvrdosti povrchu dílů, kdy navíc nedochází k jejich porušení odběrem vzorků a není nutný transport do laboratoře. Lze rozlišit dynamické zkoušky tvrdosti vnikací a odrazové. Nejčastěji využívané metody jsou:

- Zkouška Poldiho kladívkem – jinak známá také jako zkouška tvrdosti komparační metodou, je používána jako alternativa Brinellovy metody. Jedná se o vnikací zkoušku, avšak klidné zatěžování je nahrazeno dynamickým rázem. Princip zkoušky spočívá v současném vtlačování kalené ocelové kuličky do zkoušeného materiálu i do porovnávací tyčinky se známou tvrdostí, která je vložena v kladívku. Úderem kladiva na úderník vznikají otisky v obou materiálech a z jejich velikostí se pomocí tabulek určí příslušná tvrdost dle Brinella (HB_M).

- Shoreho odrazová zkouška – používá k měření tvrdosti tzv. Shoreho skleroskop a testujícím tělískem je kulově zabroušený diamantový hrot. Jedná se o nejpoužívanější odrazovou zkouškou, která je založena na principu měření velikosti odrazu indentoru spuštěného na zkoušený vzorek z určité výšky. Při nárazu se malá část kinetické energie přemění na nevratnou plastickou deformaci a zbylá energie se projeví odrazem indentoru. Hodnota tvrdosti se vypočítá z dosažené výšky odrazu.

4.2 Nedestruktivní zkoušky [13], [61], [62], [65]

Nedestruktivní zkoušky se provádí bez porušení svarového spoje. Tyto metody zkoušení jsou důležitým článkem při zjišťování provozní schopnosti a jakosti ve všech etapách výroby. Mají velký význam při ověřování a zajišťování kvality výrobků, jejich technické způsobilosti a funkční bezpečnosti. Využití nedestruktivních kontrolních metod je v současné době velmi rozsáhlé, uplatnění nacházejí nejen v oboru svařování, ale i v dalších odvětvích výroby a průmyslu. Základní metody nedestruktivního zkoušení lze rozdělit podle jejich schopnosti identifikace vad, tedy podle toho, zda jsou identifikovány vady na povrchu nebo uvnitř materiálu. K zjišťování povrchových vad se využívají metody:

- vizuální
- kapilární (penetrační)
- magnetická prášková
- vířivé proudy

Pro identifikaci vnitřních vad jsou používány metody:

- radiografická (prozařovací)
- ultrazvuková (akustická)

Každá z metod má své specifické výhody, možnosti a omezení použití, které jsou dány jejich fyzikální podstatou. Obecně neexistuje taková metoda, která by umožňovala detekovat všechny typy vad, proto se v praxi obvykle volí kombinace dvou i více metod, které se vzájemně doplňují.

4.2.1 Vizuální kontrola [13], [62], [65], [66], [67]

Vizuální kontrola je základní, nejlevnější a nejstarší nedestruktivní metoda testování, která se provádí jako první a předchází všem ostatním zkouškám. Metoda je zaměřena na zjišťování a hodnocení stavu povrchů a identifikování povrchových vad jako jsou trhliny, póry nebo tvarové odchylky. Vizuální kontrola je prováděna přímo zrakem nebo s využitím jednoduchých pomůcek jako jsou lupy, zrcadla, posuvná měřítka a měrky (obrázek 36). Pro případnou kontrolu na těžko dostupných místech se využívá endoskopů. Povrch součásti musí být před samotnou kontrolou řádně připraven, tzn. očištěn, odmaštěn a vysušen. Výhodou této metody je jednoduchost potřebného vybavení i jejího provedení. Základními podmínkami pro úspěšnost vizuální kontroly jsou dobrá zraková způsobilost provádějícího pracovníka, dostatečné osvětlení testovaného povrchu a v neposlední řadě také odborná způsobilost pracovníka, který musí mít dostatečné znalosti i praktické dovednosti. Nevýhodou této metody je tedy to, že může být ovlivněna subjektivitou ze strany pracovníka.

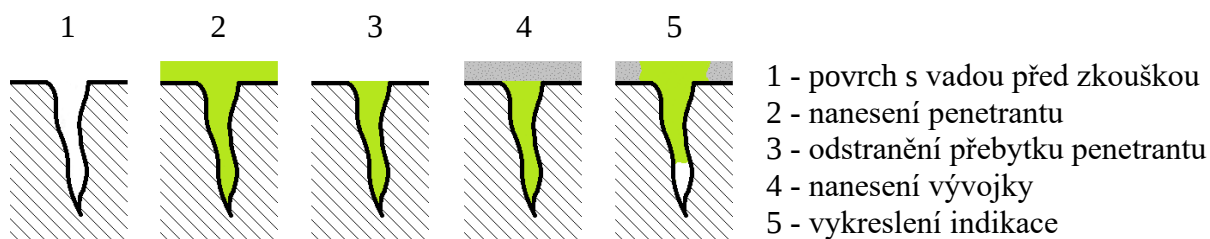


Obr. 36: Vizuální kontrola pomocí posuvné měrky [67]

4.2.2 Kapilární zkouška [13], [62], [65], [66], [68], [69]

Kapilární zkouška se používá pro zjištění povrchových vad i pouhým okem neviditelných jako jsou trhliny, póry, studené spoje apod. Není možné indikovat defekty, které nemají s povrchem součásti žádnou spojitost. Základním principem této metody je využití kapilárních vlastností kontrastní penetrační tekutiny.

V prvním kroku je nutné řádně připravit zkoušený povrch. Po mechanickém očištění, odmaštění a osušení je na povrch nanесena kontrastní penetrační kapalina, která pronikne do vad a necelistvostí. Po uplynutí penetračního času je odstraněn přebytek kapaliny a následuje nanесení vhodné detekční látky, tzv. vývojky, která svými absorpčními vlastnostmi napomáhá vztlínání penetrantu z necelistvostí. Tím dojde k vyvolání a zvýraznění indikací vad, které se následně vizuálně vyhodnocují buďto pouze zrakem nebo pomocí lupy. Postup zkoušky je schematicky znázorněn na obrázku 37.



Obr. 37: Postup kapilární zkoušky [69]

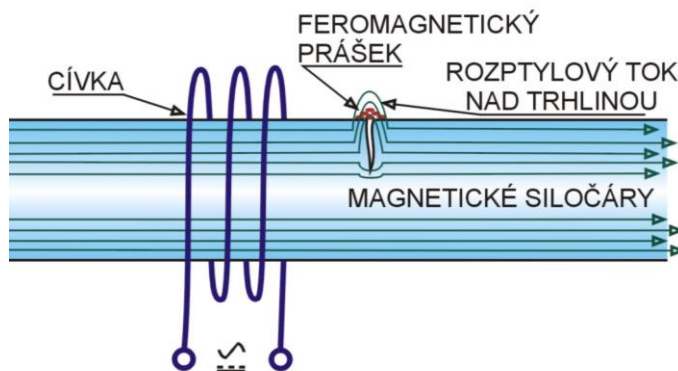
Metoda je použitelná v širokém rozsahu materiálů, a to od výrobků z oceli přes neželezné kovy až po nekovové materiály. Nelze však zjišťovat vady na porézních materiálech a na materiálech, které by byly narušeny kapilárními prostředky.

4.2.3 Magnetická prášková metoda [13], [65], [66], [68]

Magnetická prášková metoda se používá pro zjištění povrchových vad, navíc lze také odhalit vady nacházející se těsně pod povrchem. Je založena na principu rozptylových polí a použitelná pouze pro feromagnetické materiály.

Nejprve je nutné zmagnetizovat zkoušený předmět, to lze provést pomocí elektromagnetu, permanentního magnetu nebo cívky. Střídavým proudem dochází k příčné magnetizaci, která se využívá pro zjišťování podélných vad, stejnosměrným proudem se docílí podélné magnetizace a zjišťují se tak příčné vady. Po zmagnetizování dochází k magnetickému nasycení materiálu a vzniká magnetické pole. Přítomnost vad, které mají jiné magnetické vlastnosti než okolní materiál, pak vyvolávají změnu magnetického toku. V místě jejich výskytu vystupují siločáry na povrch a vzniká tzv. rozptylový magnetický tok, který je nositelem informací o místní změně magnetických vlastností. Na povrch součásti se nanесí detekční suspenze obsahující feromagnetické částice, které se na povrchu přichytí právě v místech, kde siločáry magnetického pole vystupují na povrch a vzniká obraz vady. Princip metody je schematicky znázorněn na obrázku 38.

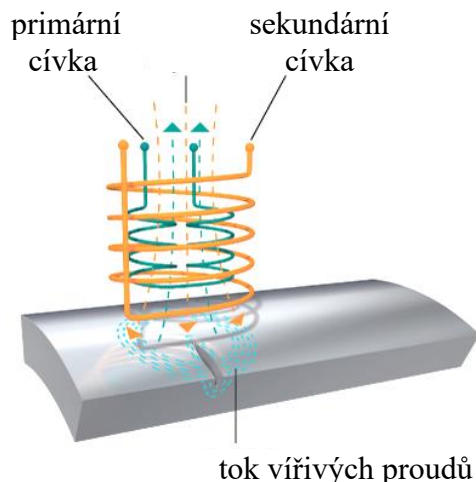
Výhodou magnetické práškové metody je její jednoduchost, je rychlá a levná. Vady jsou zaznamenávány okamžitě a metoda navíc nevyžaduje vysokou čistotu povrchu a je použitelná i pro povrchy opatřené nátěrem.



Obr. 38: Princip magnetické práškové metody [66]

4.2.4 Zkouška vířivými proudy [65], [66], [70], [71]

Zkouška vířivými proudy je využívána pro testování dílů vyrobených z elektricky vodivých materiálů a je pomocí ní možné odhalit povrchové vady i vady nacházejících se těsně pod povrchem. Využívá elektromagnetickou indukci, která vyvolává vířivé proudy, což jsou indukované elektrické proudy, které tečou po kruhové dráze. Pro testování je používán snímač tvořený dvěma cívkovými systémy. Schéma je znázorněno na obrázku 39. Budící (primární) cívka prochází vysokofrekvenční proud a v jejím okolí vzniká elektromagnetické pole, které v materiálu vyvolává tok vířivých proudů. Ty způsobují vznik sekundárního magnetického pole, které působí proti primárnímu. V měřicím cívkovém systému se tak v důsledku působení obou magnetických polí indukuje napětí, které reaguje na změny ve zkoušeném materiálu. Pokud se v materiálu vyskytuje vada nebo se změní vzdálenost snímače od zkoušeného povrchu, dojde ke změně impedance cívky, tedy ke změně napětí v měřicím cívkovém systému. Tato změna představuje indikce, které jsou dále zpracovávány a vyhodnocovány.

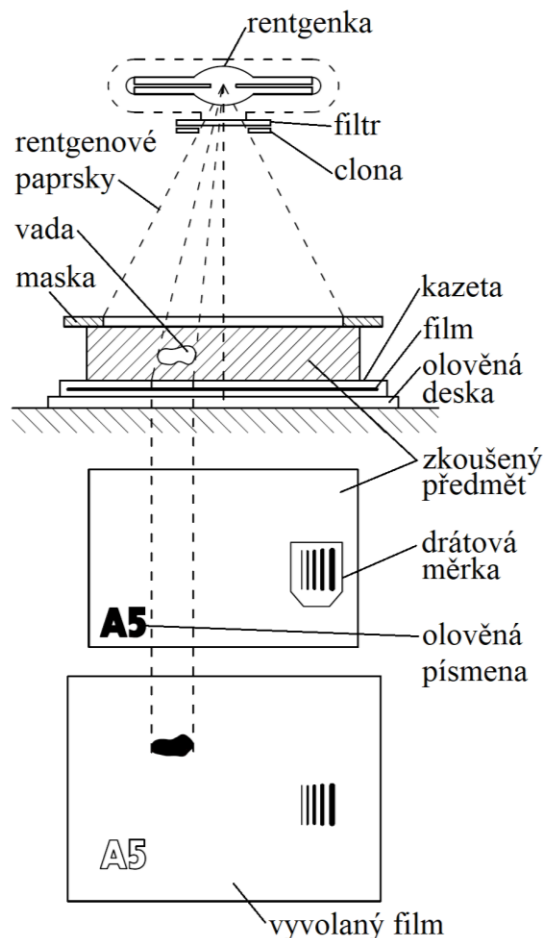


Obr. 39: Zkouška vířivými proudy [71]

4.2.5 Radiografická zkouška [13], [62], [65], [66], [68], [69]

Radiografická zkouška neboli zkouška prozařováním je zaměřena především na zjišťování objemových vnitřních vad materiálu, ale v případě vhodné orientace lze odhalit i plošné vady. Zkoušení lze provádět pro u různých druhů materiálů, a to jak kovových, tak i nekovových.

Materiál je prozařován zářičem, který je zdrojem rentgenového nebo gama záření. Princip zkoušky pak spočívá v zeslabování intenzity záření procházejícího materiálem. Pokud se v materiálu nachází defekt s vhodnou orientací vůči směru záření, dochází v tomto místě k menšímu zeslabení záření. Neviditelný obraz, vytvářený za zkoušeným předmětem primárním zářením, se převádí na viditelný pomocí vhodného detektoru, kterým je radiografický film nebo paměťová fólie. Vzniká tak trvalý obraz, tzv. radiogram, na kterém se skryté vady v materiálu projeví zčernáním různé intenzity ve tvaru vady. K posuzování vad se používají měrky, které se pokládají na rentgenovaný materiál a jsou složeny z drátků s odstupňovanými průměry. Na testovaný vzorek se ještě před zkouškou pokládají olověné značky a písmena, které se na snímku projevují jako nejsvětlejší místa a zajišťují trvalé označení snímku vzorku. Princip metody je schematicky znázorněn na obrázku 40.



Obr. 40: Radiografická zkouška [69]

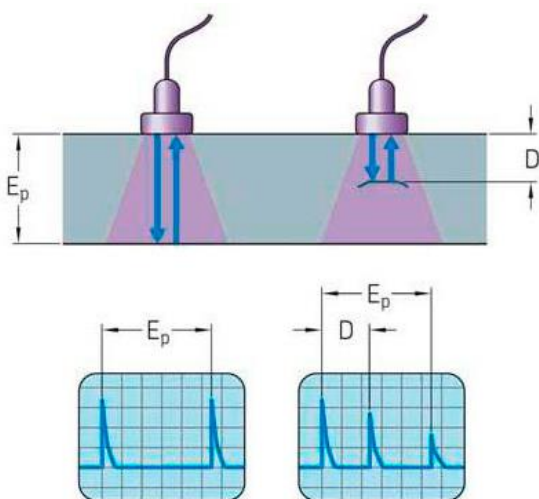
4.2.6 Ultrazvuková zkouška [13], [62], [65], [66], [68], [70], [69]

Ultrazvuková zkouška má největší dosah ze všech nedestruktivních zkoušek, umožňuje zjistit přítomnost vnitřních vad materiálu, a to i těch nacházejících se ve velké hloubce pod povrchem. Mimo jiné lze detekovat také povrchové vady. V oblasti technologií svařování je možné odhalit vnitřní vady svarů a také chybné přilnutí návarů. Mezi výhody zkoušky patří okamžité zobrazení výsledků.

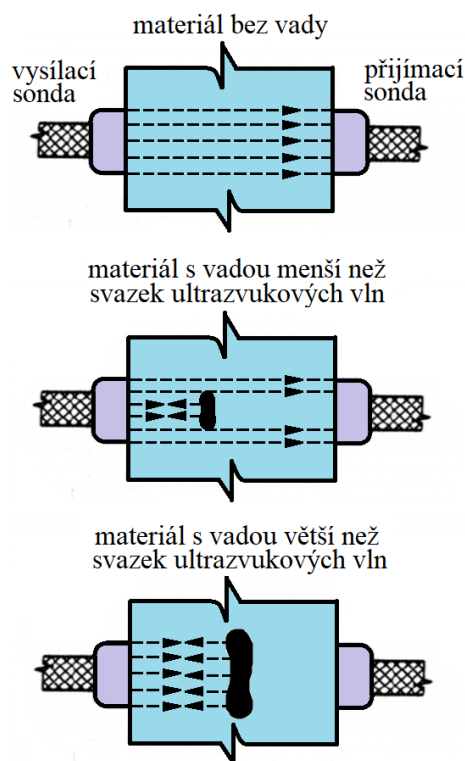
Metoda využívá průchodu ultrazvukového vlnění materiálem. Pevné, kovové i nekovové materiály, jsou dobrými vodiči ultrazvukových vln, které se odrážejí od každého rozhraní, a tedy i od vnitřních nehomogenit. Během průchodu vln zkoušeným materiálem dochází ke zmenšování intenzity vlnění i amplitudy kmitů. V případě, že vlna narazí na rozhraní dvou prostředí, tedy na vadu, dochází k odrazu a lomu vlnění. Část vlny se odrazí a část projde přes vadu. Většina měření se zakládá na měření ultrazvukové energie, která projde materiálem nebo se naopak po odrazu od rozlišného rozhraní vrátí zpět. Pro zkoušení jsou využívány frekvence od 0,5 MHz do 25 MHz a obecně platí, že čím menší je frekvence vlnění, tím menší vady lze detekovat.

Základní prvky zařízení pro zkoušení jsou vysílací a přijímací sonda, dále defektoskop, na jehož displeji se z průběhu proudového echa zjišťuje přítomnost vady, jejich poloha a velikost. Pro přenos vlnění ze sondy do materiálu je nutné na zkoušený povrch nanést vazebnou vrstvu (gel, vazelína, petrolej), protože přítomnost vzduchové vrstvy brání přechodu ultrazvuku do zkoušeného předmětu. Měření lze provádět pomocí analogových i digitálních ultrazvukových přístrojů. Zkoušení materiálů pomocí ultrazvuku se neustále zdokonaluje a vyvíjí, základními metodami zkoušení jsou:

- odrazová metoda (Obrázek 41)
- průchodová metoda (Obrázek 42)



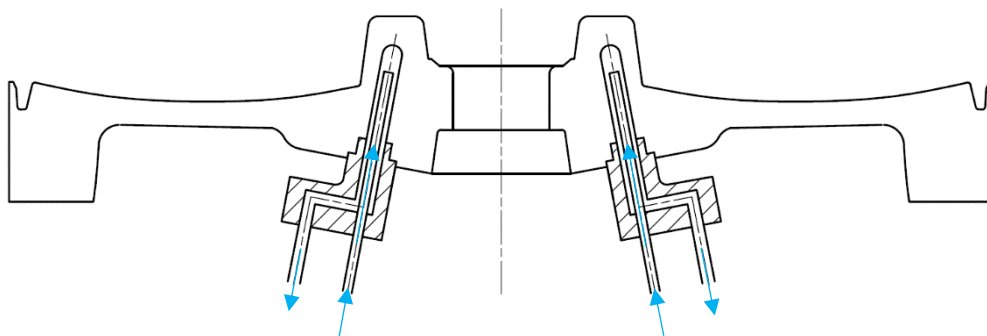
Obr. 41: Odrazová metoda a záznam na defektoskopu [70]



Obr. 42: Průchodová metoda [69]

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [6]

V této kapitole bude popsán experiment, který byl proveden za účelem prověření možnosti využití nových metod oprav a jejich porovnání se stávající technologií TIG. Pro experiment byl poskytnut spodní díl formy, kde bylo největším problémem tvorba trhlin v místech šroubových otvorů, ve kterých ústí chlazení. Opravy těchto vad navíc vykazovaly velmi nízkou životnost. Tato problematika je již podrobněji popsána v kapitole 1, znázornění kritických míst a trhlin je na obrázcích 7 a 8. Na obrázku 43 je pro lepší názornost schéma systému vodního chlazení.

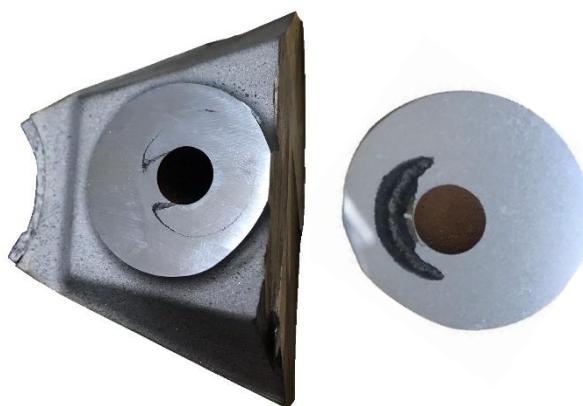


Obr. 43: Schéma přívodu chlazení [6]

Forma byla nejprve pro jednodušší manipulaci během experimentu rozřezána na menší díly. Následně byly dva z dílů rozděleny přímo v místě ústí chlazení v radiálním i axiálním směru. Uvnitř materiálu byly nalezeny trhliny (obrázky 44 a 45), které vznikají v místech, kde materiál formy přichází do kontaktu s vodou, a následně se vlivem opakování licích cyklů šíří materiálem.



Obr. 44: Trhliny na axiálním řezu



Obr. 45: Trhliny na radiálním řezu

Lze tedy předpokládat, že trhliny na povrchu jsou pravděpodobně způsobeny také těmito vnitřními vadami. Problémy s životností oprav provedených v těchto místech v tomto konkrétním případě nejsou zapříčiněny pouze nevhodnou metodou. Jednou z hlavních příčin je cyklické tepelné zatěžování a prudké změny teplot během licího cyklu, kdy po naplnění formy taveninou dochází k intenzivnímu chlazení jejího povrchu vodou. Tento konkrétní problém nelze vyřešit pouhým navařením chybějícího materiálu do místa trhliny, oprava by měla zahrnovat i odstranění vad, vyskytujících se pod povrchem. Vznik a rozvoj vnitřních vad je v tomto případě mnohem komplexnější a složitější problém, který mimo jiné souvisí s konstrukcí formy, a lze předpokládat, že i po řádně opravě by docházelo k opětovné tvorbě trhlin. Tento problém se ovšem týká pouze této konkrétní formy.

Na povrchu forem však dochází k mnoha dalším defektům, které se posléze více či méně projeví na odlitcích. Tyto vady je nezbytné odstraňovat pro zajištění bezvadného povrchu a tím i eliminaci zmetkovitosti.

5.1 Návrh experimentu a příprava vzorků [72]

V oboru oprav a renovací je v současnosti využívána řada postupů a technologií. Pro tento experiment byly navrženy a zhotoveny návary následujícími metodami:

- navařování TIG
- navařování mikroplazmou
- laserové navařování drátu
- laserové navařování prášku
- laserové pulzní mikronavařování

Návary byly provedeny na jednom z dílů odebraného z formy (obrázek 46). Charakteristika materiálu i tepelné zpracování je uvedeno v kapitole 3, chemické složení uvádí tabulka 5. V případě navařování TIG, mikroplazmou a laserového navařování drátu byl jako přídavný materiál použit austenitický drát OK TIGROD 16.95, jehož chemické složení uvádí v první kapitole tabulka 1. Ostatní použité přídavné materiály, procesní parametry, vybavení a přístroje budou pro lepší přehlednost uvedeny v kapitole 5.2.



Obr. 46: Část formy použité pro experiment

Po navaření všemi výše uvedenými metodami byla zhotovena sada vzorků. Nejprve byl realizován odběr vzorků pomocí řezání na pile Struers Secotom 60 (obrázek 47), která díky intenzivnímu chlazení brusného kotouče umožňuje přesné oddělení vzorků bez tepelného ovlivnění materiálu. Následně byly vzorky pomocí automatického lisu Struers CitoPress 1 (obrázek 48) za horka zalisovány do plastu, poté byly vzorky broušeny a leštěny na leštičce Struers Tegramin 20 (obrázek 49).



Obr. 47: Struers Secotom-60 Obr. 48: Struers CitoPress-1 Obr. 49: Struers Tegramin-20

Posledním krokem bylo leptání vzorků. Vzhledem k tomu, že forma je vyrobena z martenzitické oceli a jako přídavný materiál byl ve většině případů použit austenitický drát OK TIGROD 16.95, bylo leptání vzorků obtížné. Protože pro každý z materiálu je vhodné použít jiný typ leptadla, dojde ke zviditelnění struktury buďto základního materiálu nebo svarového kovu. V tomto případě bylo použito leptadlo Nital 3 %, vhodné pro martenzitické oceli, čas leptání byl 8 vteřin.

Na metalografických výbrusech bylo provedeno hodnocení makrostruktury, mikrostruktury a měření mikrotvrdosti. Makrostruktura byla vyhodnocována na mikroskopu Olympus SZ61. U všech vzorků byly zhotoveny snímky a provedeno měření geometrie návarů. Z geometrie bylo následně pomocí vztahu (4.1) určeno zředění. Mikrostruktura byla vyhodnocena na konfokálním mikroskopu Keyence, který je zobrazen na obrázku 50. Vzhledem k problematickému leptání nelze u vzorků s austenitickým náwarem rozlišit mikrostrukturu svarového kovu. Byly však odhaleny některé vady návarů, které nebyly na snímcích makrostruktury viditelné.

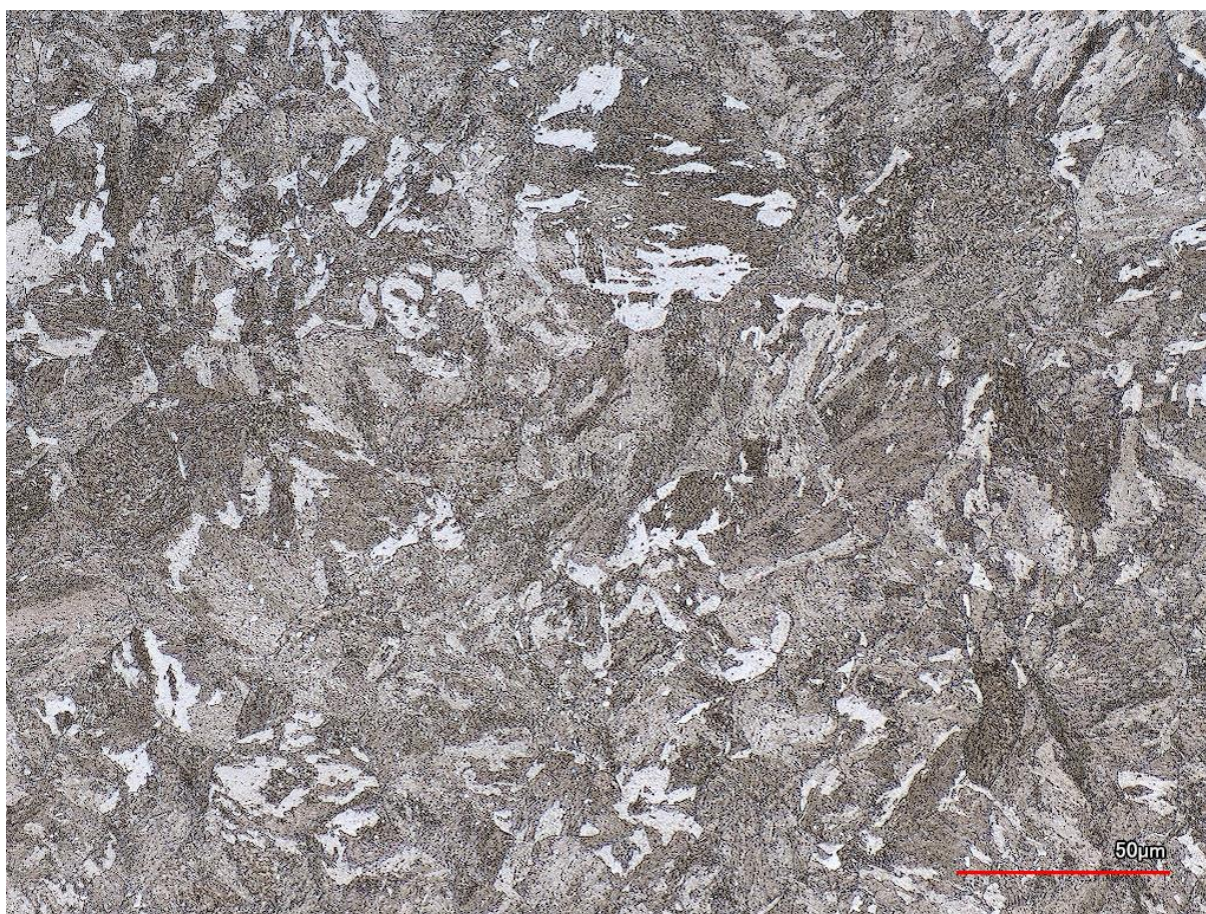


Obr. 50: Konfokální mikroskop Keyence [72]

Po metalografických šetřeních byla měřena mikrotvrdost. Bylo použito zatížení 0,1 kg, doba trvání zatížení 10 s, vzdálenost mezi jednotlivými vpichy 0,1 mm. Měření bylo provedeno v ose návaru v jedné řadě, směrem od povrchu do základního materiálu. Protokoly z měření jsou uvedeny v příloze 2.

5.2 Vyhodnocení experimentu

Před samotným vyhodnocením metalografických výbrusů jednotlivých návarů byl proveden rozbor mikrostruktury základního materiálu. Bylo ověřeno, že materiál formy, který je v zušlechťeném stavu, má skutečně martenzitickou strukturu. Snímek mikrostruktury je na obrázku 51. Pro ověření tvrdosti povrchu formy bylo provedeno i kontrolní měření přenosným tvrdoměrem. Bylo naměřeno cca 37 až 38 HRC.



Obr. 51: Snímek mikrostruktury materiálu formy

5.2.1 Navařování TIG

Jako první byl proveden návar metodou TIG (obrázek 52). Navařování bylo realizováno pomocí svářečky EWM Tetrix 350 AC/DC, bez předehřevu a se stejným přídatným materiálem, jako při současném způsobu oprav.

Přídavný materiál: OK TIGROD 16.95

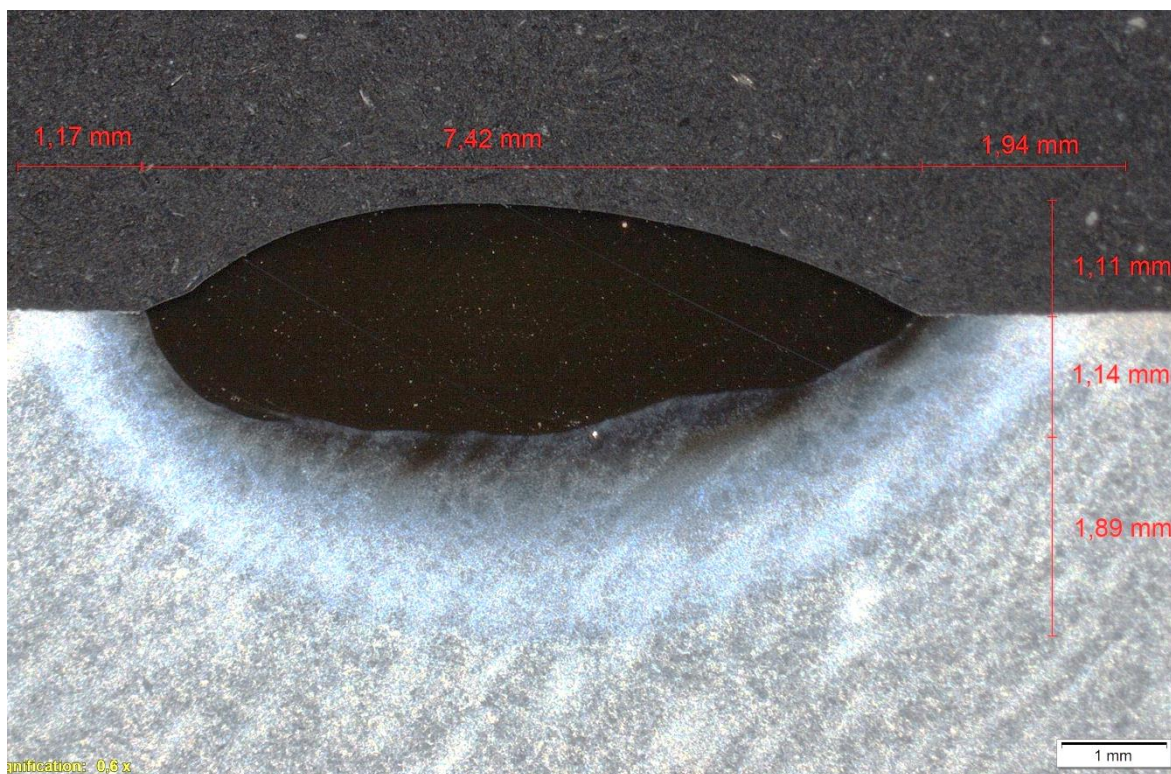
Parametry:

Svařovací proud	96 A
Svařovací napětí	14,5 V
Ochranný plyn	Ar (čistý)
Čas navařování	30 s



Obr. 52: TIG návar

Snímek makrostruktury TIG návaru je na obrázku 53. Lze dobře rozlišit oblast výskytu tepelně ovlivněné oblasti, která zasahuje přibližně do hloubky 3 mm od povrchu. Přechod mezi svarovým kovem a základním materiálem je ostře ohraničen. Samotný návar je celistvý a bez vad.



Obr. 53: Makrostruktura – návar TIG

Výška návaru dosahuje 1,11 mm, hloubka závaru 1,14 mm. Z těchto hodnot lze s využitím vztahu (4.1) určit zředění:

$$Z = \frac{h}{v + h} \cdot 100 [\%]$$

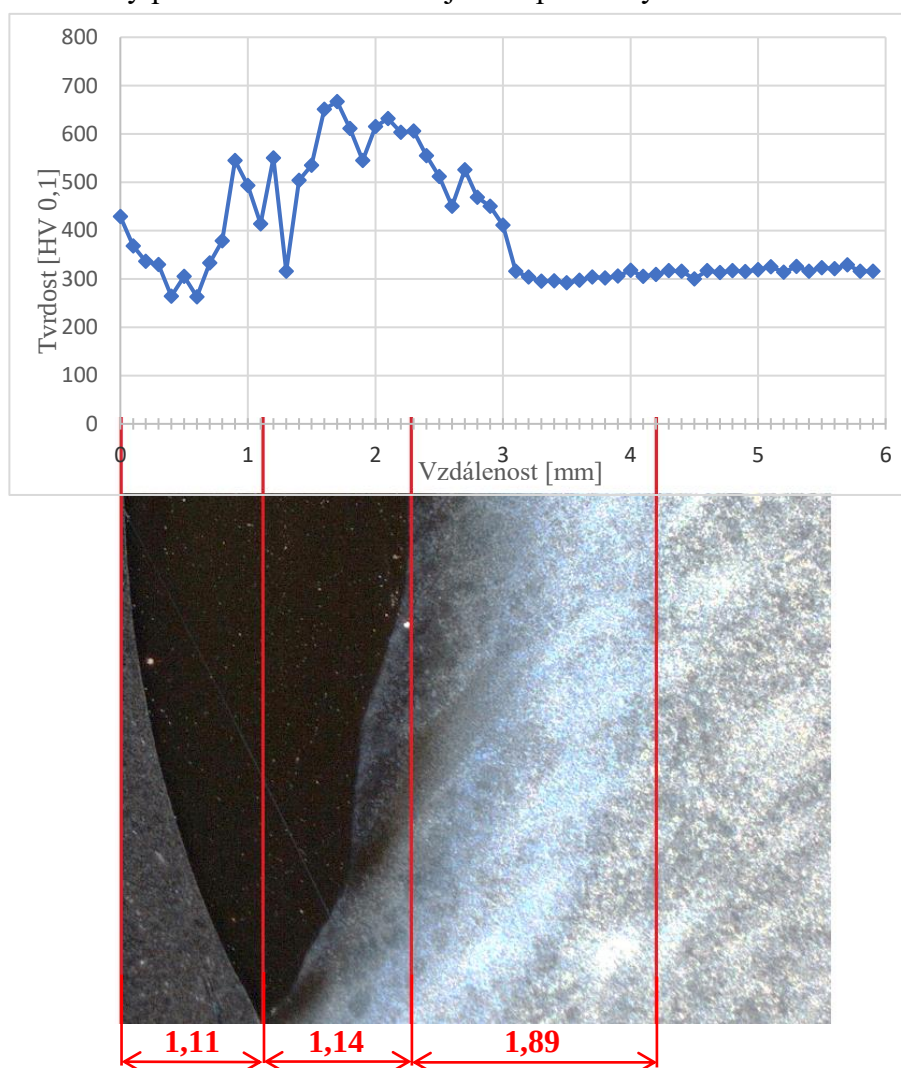
$$Z = \frac{1,14}{1,11 + 1,14} \cdot 100 = 50,67 \%$$

V tepelně ovlivněné oblasti dochází ke změnám mechanických vlastností. Mění se také struktura, která je v blízkosti svarového kovu hrubozrnná a směrem do základního materiálu přechází v jemnozrnnou. Tepelně ovlivněná oblast TIG návaru je zobrazena na obrázku 54.



Obr. 54: Tepelně ovlivněná oblast – návar TIG

Na obrázku 55 je znázorněn průběh mikrotvrdosti, která směrem od povrchu nejprve klesá z hodnoty 429 HV 0,1, a následně narůstá na maximální hodnotu 667 HV 0,1. V tepelně ovlivněné oblasti dochází k postupnému poklesu až na hodnotu odpovídající tvrdosti materiálu formy. Skokové změny průběhu mikrotvrdosti jsou zapříčiněny různorodostmi struktury.



Obr. 55: Průběh mikrotvrdosti – TIG návar

5.2.2 Navařování mikroplazmou

Pro navařování mikroplazmou bylo použito zařízení EWM Microplazma 50 a stejný přídavný materiál, jako v předchozím případě. Během navařování však docházelo k potížím s natavováním povrchu formy i tavením drátu. To mohlo být způsobeno příliš velkým průměrem použitého drátu. Podařilo se vytvořit pouze velmi krátký návar, který je znázorněn na obrázku 56.

Přídavný materiál: OK TIGROD 16.95

Parametry:

Svařovací proud 25 A

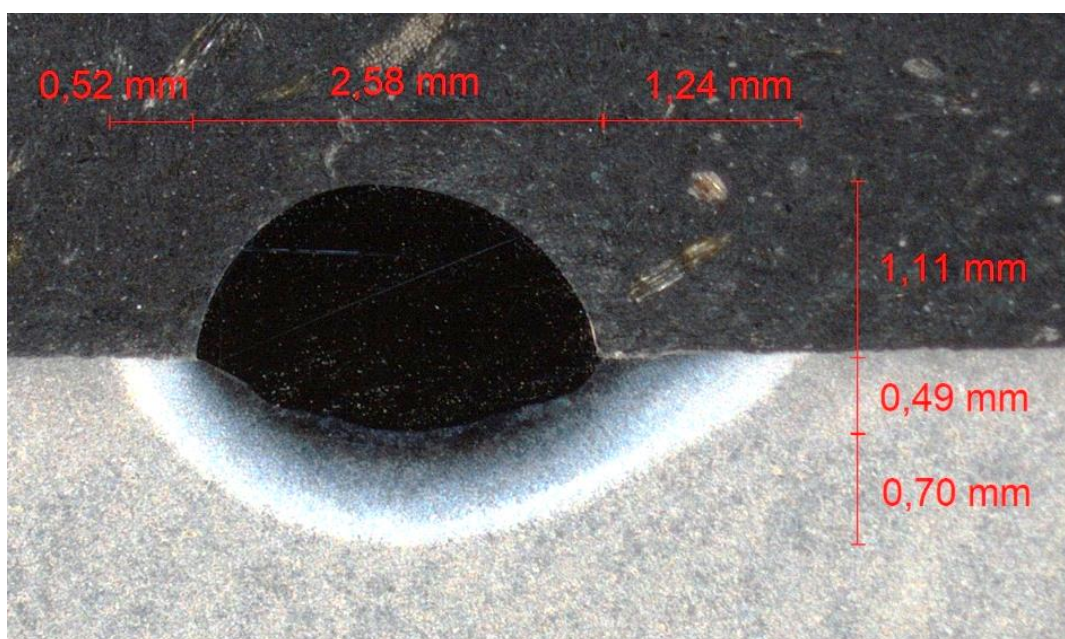
Ochranný plyn Ar_{4.6}

Plazmový plyn Ar + H (5 %)



Obr. 56: návar mikroplazmou

Na obrázku 57 je snímek makrostruktury vrstvy navařené mikroplazmou. Už na první pohled jsou patrné vizuální rozdíly v porovnání s předchozí technologií. Zatímco výška návaru nad základním materiálem je v tomto případě totožná, hloubka závaru je více než 2x menší a šířka návaru je 2,58 mm, což je téměř 3x méně. Oblast tepelného ovlivnění základního materiálu je na snímku dobře zřetelná a sahá do hloubky 1,19 mm od povrchu. Samotný návar je celistvý, bez žádných viditelných vad.



Obr. 57: Makrostruktura – návar mikroplazma

Výška návaru dosahuje 1,11 mm, hloubka závaru 0,49 mm. Z těchto hodnot bylo s využitím vztahu (4.1) určeno zředění:

$$Z = \frac{h}{v + h} \cdot 100 [\%]$$

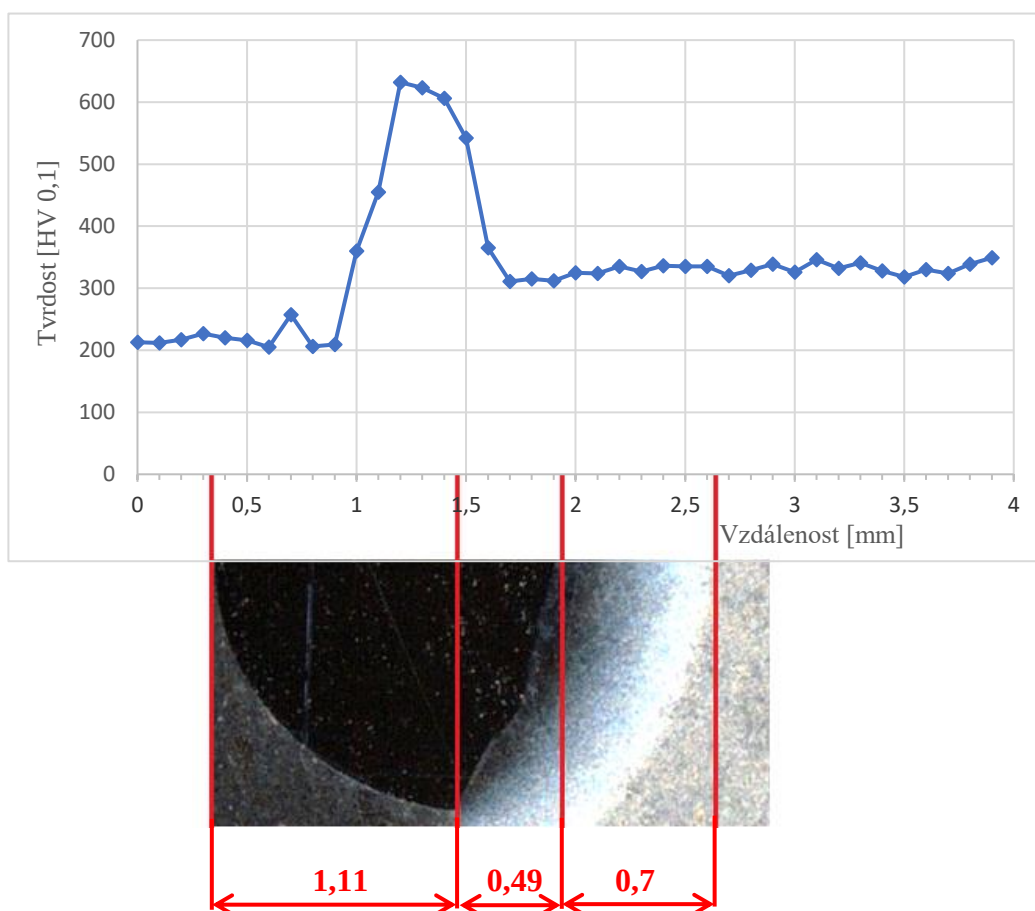
$$Z = \frac{0,49}{1,11 + 0,49} \cdot 100 = 30,63 \%$$

I přes špatnou viditelnost mikrostruktury svarového kovu, bylo i zde na počátku tepelně ovlivněné oblasti (obrázek 58) vyzorováno zhrubnutí struktury, která směrem do základního materiálu přechází v jemnozrnnou.



Obr. 58: Tepelně ovlivněná oblast – návar mikroplazma

Na obrázku 59 je znázorněn průběh mikrotvrdosti, ze kterého je patrné že povrch návaru je měkčí než materiál formy. V oblasti počátku promísení přídavného materiálu se substrátem lze pozorovat nárůst tvrdosti až na hodnotu 632 HV 0,1.



Obr. 59: Průběh mikrotvrdosti – návar mikroplazma

5.2.3 Laserové navařování drátu

Laserové navařování drátu bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Pracoviště (obrázek 60) je vybaveno vláknovým laserem IPG YLS 2000 o celkovém výkonu 2 kW a šestiosým robotickým ramenem ABB IRB240, které nese svařovací hlavu. Ohnisko laserového paprsku bylo zaostřeno 1 mm pod povrchem dílce. Použitý přídatný materiál byl stejný jako v případě navařování TIG a mikroplazmou. Do místa navařování byl přiváděn argon o průtoku 17 l.min⁻¹.

Přídavný materiál: OK TIGROD 16.95

Parametry:

Výkon 2 kW

Režim kontinuální

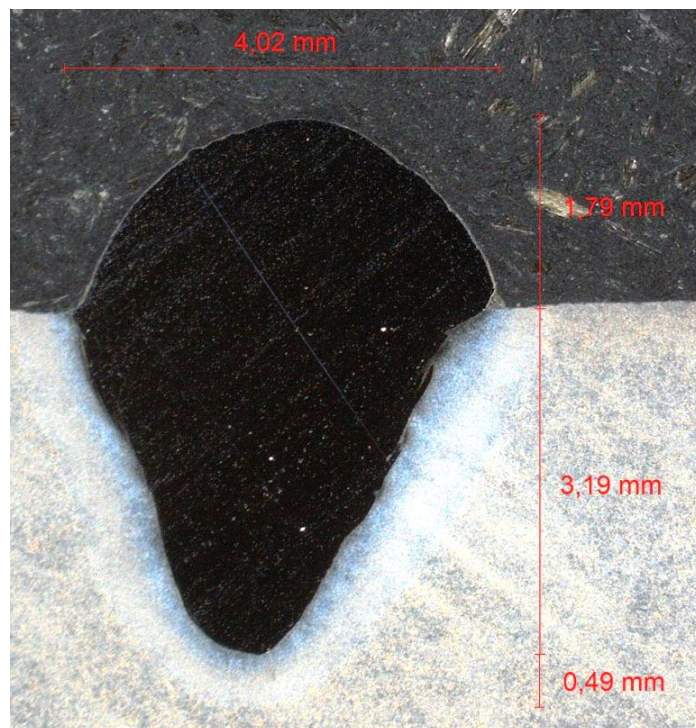
Ochranný plyn Ar

Průtok ochranného plynu 17 l.min⁻¹



Obr. 60: Laserové pracoviště
ÚPT AV ČR [73]

Na obrázku 61 je snímek makrostruktury laserového návaru. Tepelně ovlivněná oblast je méně výrazná, než v případě předchozích technologií a její šířka je přibližně 0,5 mm. Hodnota hloubky závaru je v tomto případě téměř 1,8x větší než převýšení návaru nad povrchem substrátu.



Obr. 61: Makrostruktura – laserové navařování drátu

Výška návaru dosahuje 1,79 mm, hloubka závaru 3,19 mm. Z těchto hodnot bylo s využitím vztahu (4.1) určeno zředění:

$$Z = \frac{h}{v + h} \cdot 100 [\%]$$

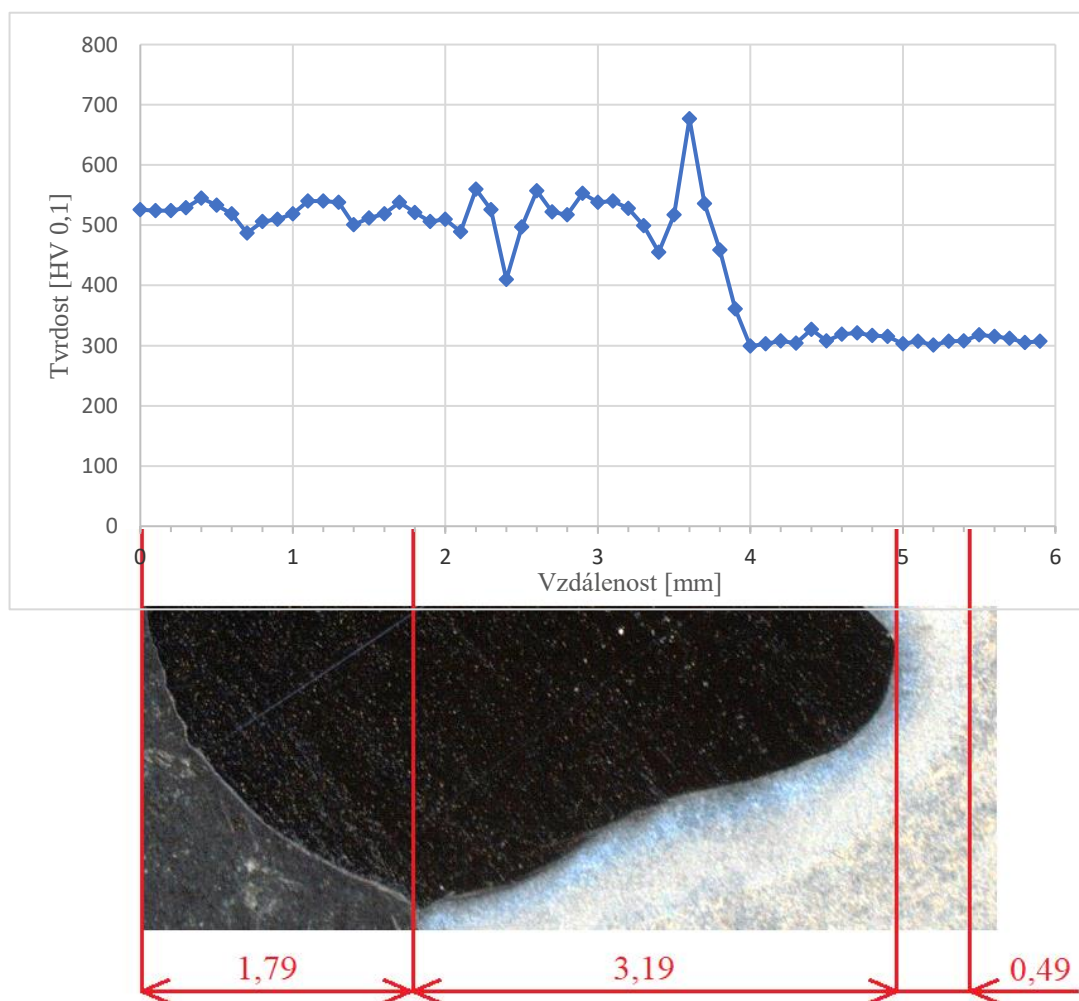
$$Z = \frac{3,19}{1,79 + 3,19} \cdot 100 = 64,06 \%$$

Při pozorování mikrostruktury byla v oblasti kořene návaru nalezena trhlina, která prochází od svarového kovu přes celou tepelně ovlivněnou oblast. Pravděpodobně se jedná o horkou trhlinu, jejíž příčinou byla tahová napětí vzniklá vlivem rozdílů tepelné roztažnosti. Část tepelně ovlivněné oblasti s trhlinou je zobrazena na obrázku 62. Na snímku je také patrné, že nedošlo ke vzniku hrubozrnné struktury, jak tomu bylo např. u navařování TIG. To je dáno kratší výdrží na teplotě tavení a rychlejším ochlazováním.



Obr. 62: Tepelně ovlivněná oblast a detail trhliny

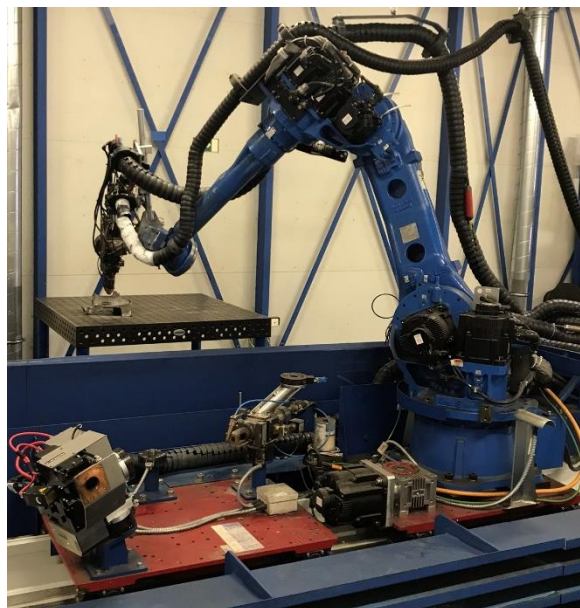
Průběh mikrotvrdosti, který je znázorněn na obrázku 63, je poměrně rovnoměrný. Mikrotvrdosti na povrchu návaru je 526 HV 0,1 a do vzdálenosti přibližně 3,5 mm se příliš nemění. Ve vzdálenosti mezi 3,6 až 4 mm od povrchu návaru pak dochází k poklesu mikrotvrdosti až na hodnoty odpovídající materiálu formy. Výkyvy v průběhu mohou být opět způsobeny různorodostí struktury materiálu.



Obr. 63: Průběh mikrotvrdosti – laserové navařování drátu

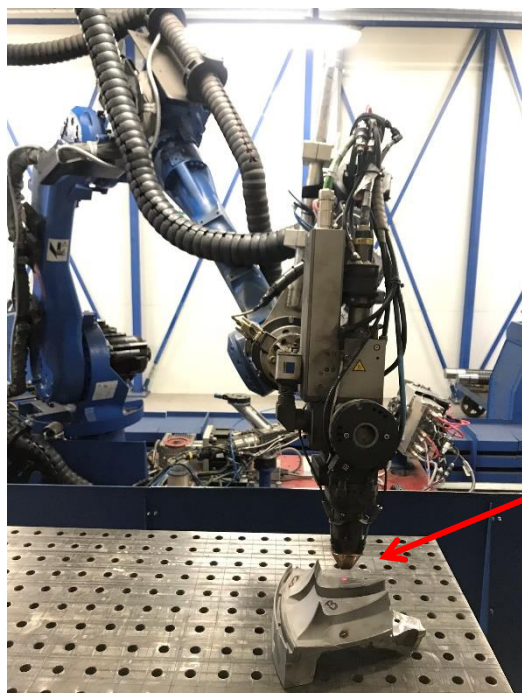
5.2.4 Laserové navařování prášku

Laserové navařování prášku bylo provedeno ve firmě KSK Precise Motion, která se zabývá především zakázkovou výrobou kuličkových šroubů. V roce 2014 zde bylo vybudováno laserové pracoviště (obrázek 64), které se kromě navařování prášku zabývá i laserovým svařováním a kalením. Výkonná část laserového pracoviště je z důvodu bezpečnosti umístěna ve dvouplášťové světlotěsné komoře. V komoře je na dvouosém pojezdu umístěn šestiosý robot firmy Yaskawa, součástí vybavení jsou také pomocná polohovadla. Pro každou z laserových technologií je potřebná vlastní laserová hlava, ty jsou umístěny na pomocném vozíku a jejich výměna je plně automatizována. Základem pracoviště je diskový laser Trudisk 6006 firmy Trumf o maximálním výkonu 6 kW a s účinností přibližně 30 %.



Obr. 64: Laserové pracoviště v KSK

V procesu navařování je využívána navařovací hlava vybavená radiálně symetrickou tryskou (obrázek 65), to znamená, že prášek je do místa natavení přiváděn třemi oddělenými tryskami. Jako ochranný plyn je využíván argon, nosným plynem je hélium.



Obr. 65: Navařovací hlava a detail zaostření paprsku laseru na povrch formy

Jako přídatný materiál byl pro experiment použit prášek Castolin 6225 PL, jehož chemické složení je uvedeno v tabulce 6.

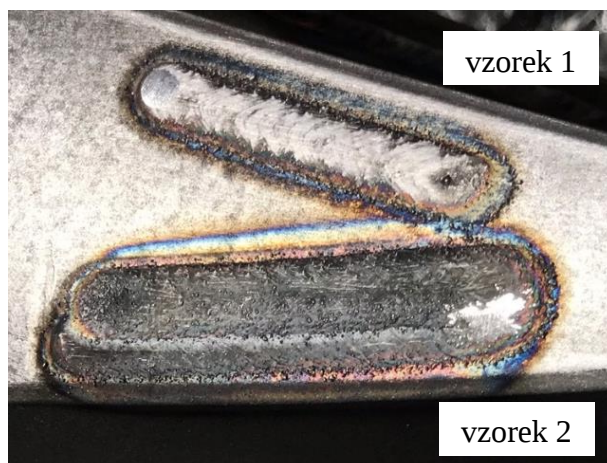
Tabulka 6: Chemické složení materiálu Castolin 6225 PL.

Chemické složení [hm. %]						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,44	0,21	0,90	<0,01	<0,02	1,00	0,21

Parametry:

Výkon	3800 W
Průměr paprsku	6 mm
Rychlost navařování	11 mm/s
Dávkování prášku	17,5 g/min
Ochranný plyn	Ar
Doprava prášku	He

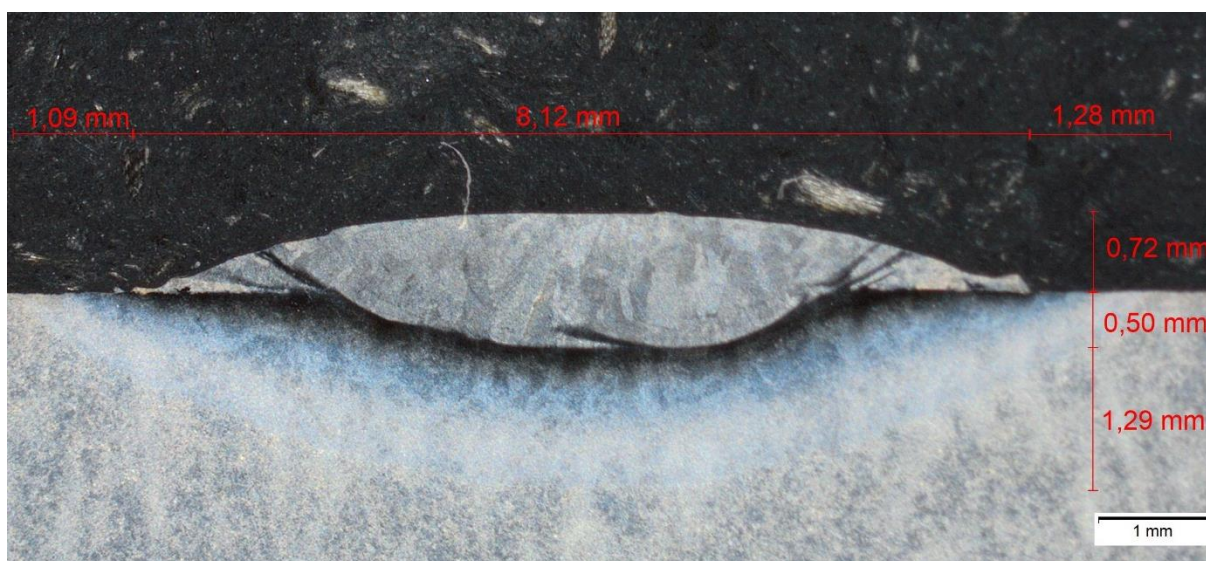
Na povrchu formy byly v KSK vytvořeny dva návary (obrázek 66): jedna samostatná housenka, dále bude označováno jako vzorek 1, a dvě housenky s překrytím 3 mm, dále značeno jako vzorek 2.



Obr. 66: Navařování prášku - vzorky

Nejprve bude proveden rozbor makrostruktury, výpočet zředění a následně i vyhodnocení mikrostruktury obou vzorků.

- Vzorek 1: Na obrázku 67 je snímek makrostruktury vzorku 1 s vyznačenými rozměry návaru i tepelně ovlivněné oblasti. Na snímku je patrný ostrý přechod mezi navařenou vrstvou a základním. Samotný návar je na první pohled v celém průřezu dobře spojen se substrátem, je celistvý a bez pórů. Tepelně ovlivněná oblast je v porovnání s laserovým navařováním drátu širší a zasahuje do hloubky 1,79 mm od povrchu základního materiálu.



Obr. 67: Makrostruktura – navařování prášku, vzorek 1

Výška návaru dosahuje 0,72 mm, hloubka závaru 0,5 mm. Z těchto hodnot je s využitím vztahu 4.1 určeno zředění:

$$Z = \frac{h}{v + h} \cdot 100 [\%]$$

$$Z = \frac{0,5}{0,72 + 0,5} \cdot 100 = 40,98 \%$$

V případě těchto návarů byla po naleptání jejich metalografických výbrusů dobře zviditelněna mikrostruktura materiálu formy i svarového kovu, a je tedy možné se jí detailněji

zabývat. Na obrázku 68 je znázorněna mikrostruktura návaru při zvětšení 10x. Lze zde pozorovat rovnoměrnou lící strukturu svarového kovu, která vznikla během tuhnutí.



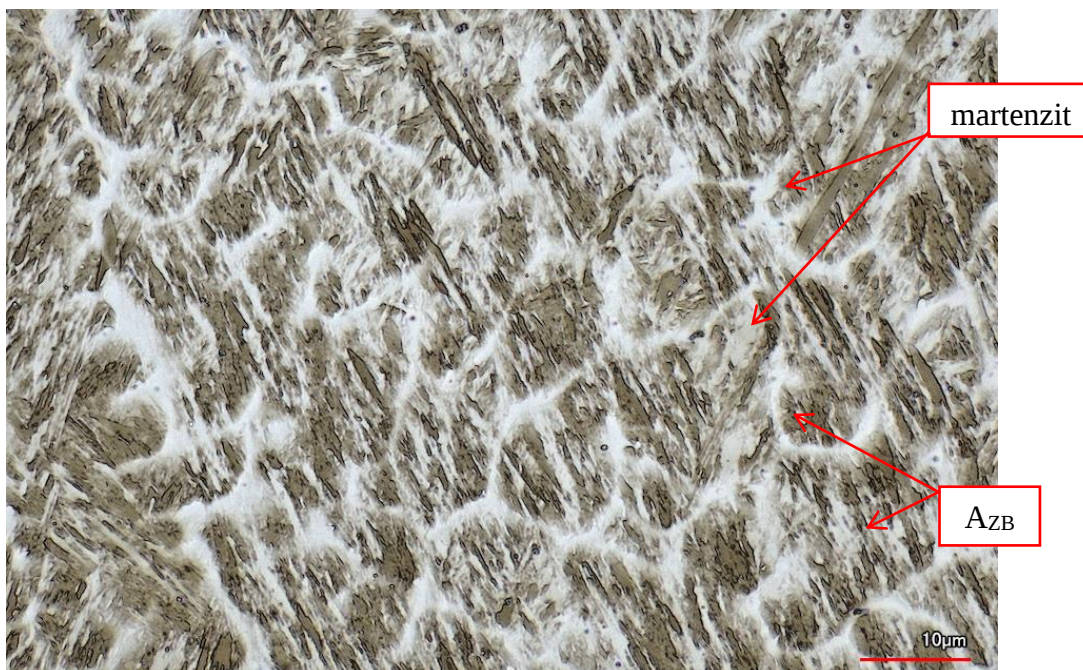
Obr. 68: Mikrostruktura – navařování prášku, vzorek 1

Při pozorování mikrostruktury byla ve svarovém kovu zjištěna trhlina (obrázek 69). Jedná se o horkou trhlinu nacházející se podél hranice jednotlivých dendritů, a lze předpokládat, že k jejímu vzniku došlo při tuhnutí návaru.



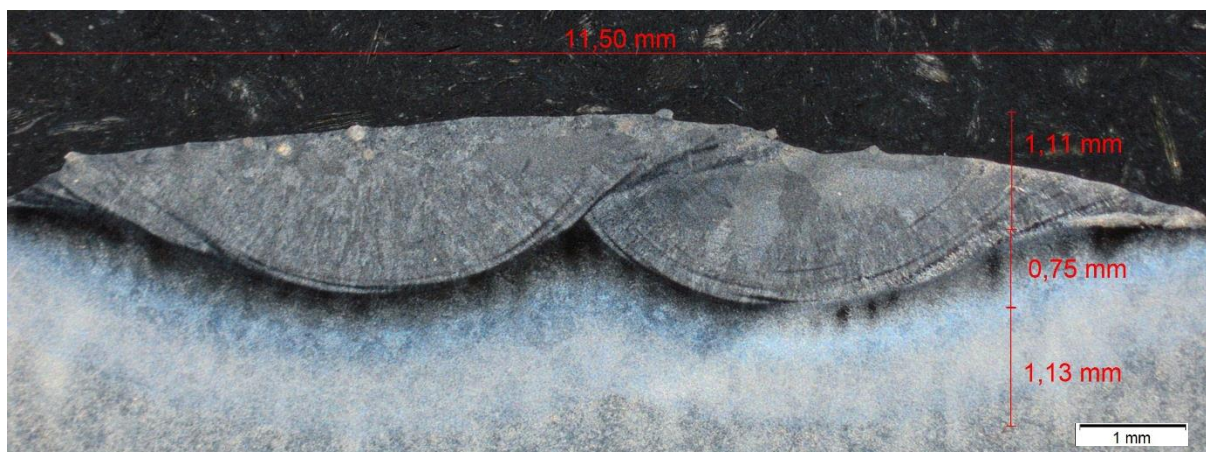
Obr. 69: Trhlina – vzorek 1

Na obrázku 70 je zobrazen snímek mikrostruktury vzorku 1 při zvětšení 150x. Jsou zde jasně zřetelná původní austenitická zrna. Struktura svarového kovu je tvořena martenzitem, na hranicích zrn je vyloučen zbytkový austenit.



Obr. 70: Mikrostruktura – vzorek 1, zv. 150x

- Vzorek 2: Na obrázku 71 je snímek makrostruktury dvou překrývajících se návarů. Stejně jako v případě vzorku 1 je zde ostrý přechod mezi oběma materiály. Na snímku nejsou patrné žádné trhliny ani póry ve svarovém kovu, rovněž se zde podobně jako u předchozího vzorku nevyskytují žádné nespojitosti mezi navařenou vrstvou a materiálem formy. Tepelně ovlivněná oblast sahá do hloubky 1,88 mm od povrchu základního materiálu.



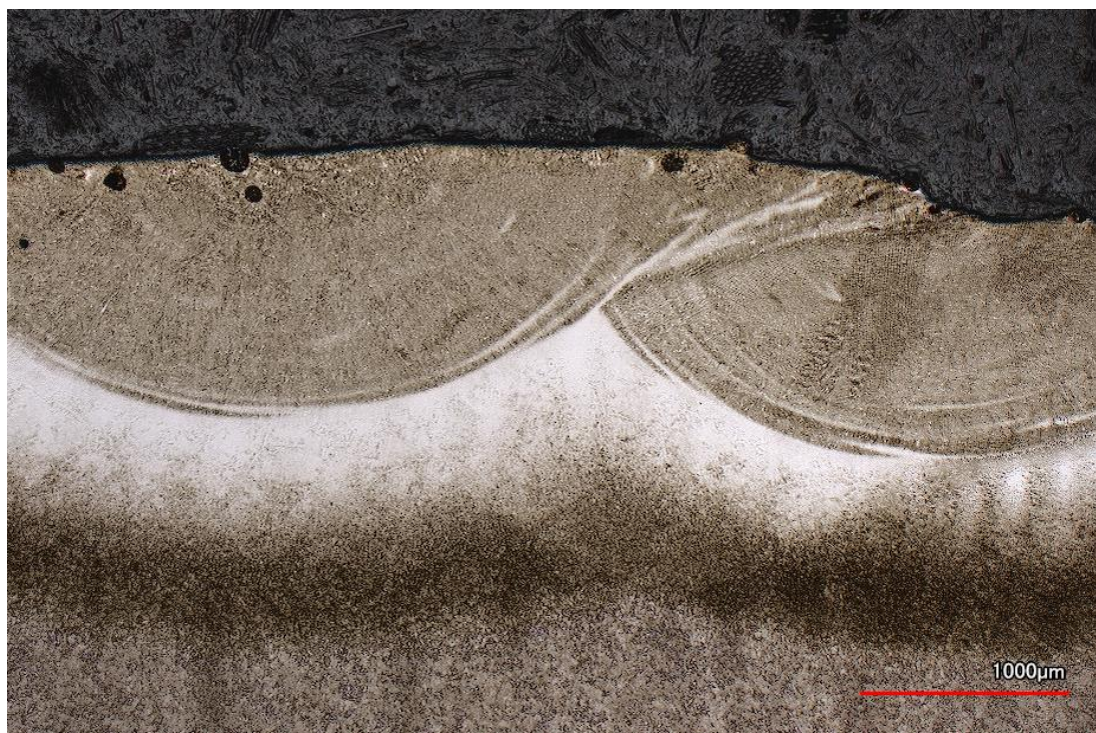
Obr. 71: Makrostruktura – navařování prášku, vzorek 2

Maximální výška navařené vrstvy dosahuje 1,11 mm, hloubka závaru 0,75 mm. Z těchto hodnotu je s využitím vztahu (4.1) určeno zředění:

$$Z = \frac{h}{v + h} \cdot 100 [\%]$$

$$Z = \frac{0,75}{1,11 + 0,75} \cdot 100 = 40,32 \%$$

Na snímku makrostruktury jsou na povrchu návaru patrné světlé útvary. Při pozorování na konfokálním mikroskopu při zvětšení 2,5x (obrázek 72) se zobrazují černě a na první pohled se jeví jako póry. Při zvětšení 50x však bylo zjištěno že se jedná o cizí vměstky. Snímek je na obrázku 73.



Obr. 72: Snímek z konfokálního mikroskopu - vzorek 2, zv. 2,5x

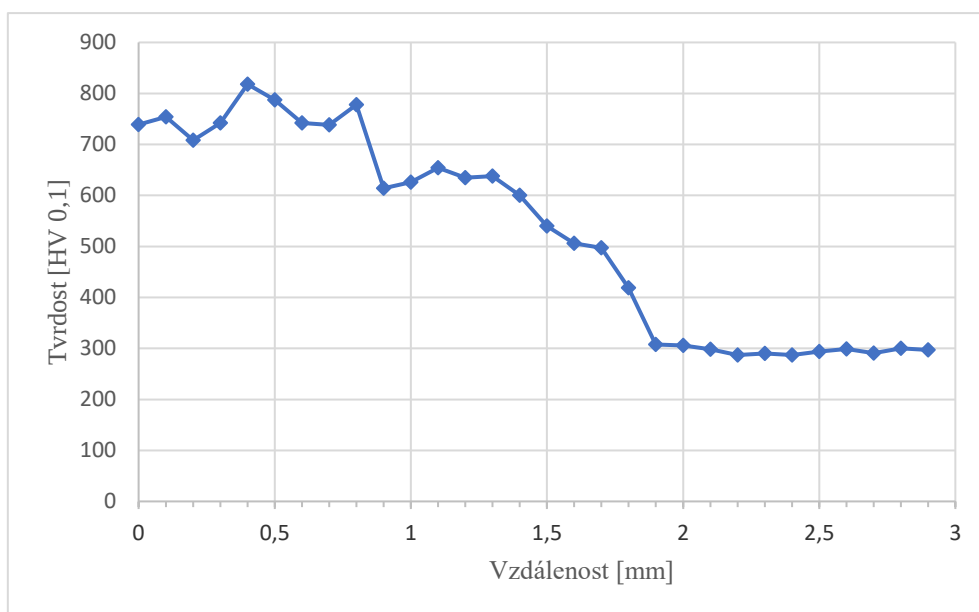


Obr. 73: Vměstek – vzorek 2, zv. 50x

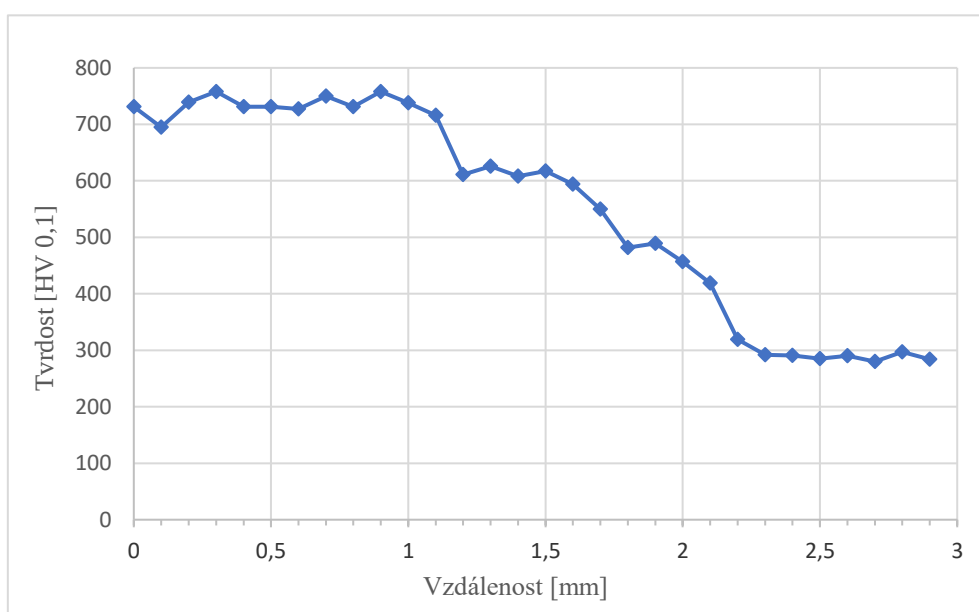
Po rozboru makrostruktury a mikrostruktury obou vzorků bylo provedeno měření mikrotvrdomosti.

Průběh mikrotvrdomosti vzorku 1 uvádí obrázek 74. Tvrdomost navařené vrstvy je několikanásobně vyšší než tvrdost materiálu formy. Hodnota naměřená na povrchu návaru je příliš vysoká (739 HV 0,1). Z hlediska toho, že je požadováno, aby pro finální opracování nebylo nutné používat speciální nástroje a brusné kotouče, je tato hodnota nepřijatelná.

Výsledky měření mikrotvrdomosti vzorku 2 znázorňuje obrázek 75. Hodnoty mikrotvrdomosti jsou velmi podobné jako u vzorku 1, ale její průběh a pokles je rovnoměrnější, protože měřený návar je po navaření druhé housenky částečně vyžíhaný. Hodnota mikrotvrdomosti na povrchu je téměř totožná jako v předchozím případě.



Obr. 74: Průběh mikrotvrdomosti - vzorek 1



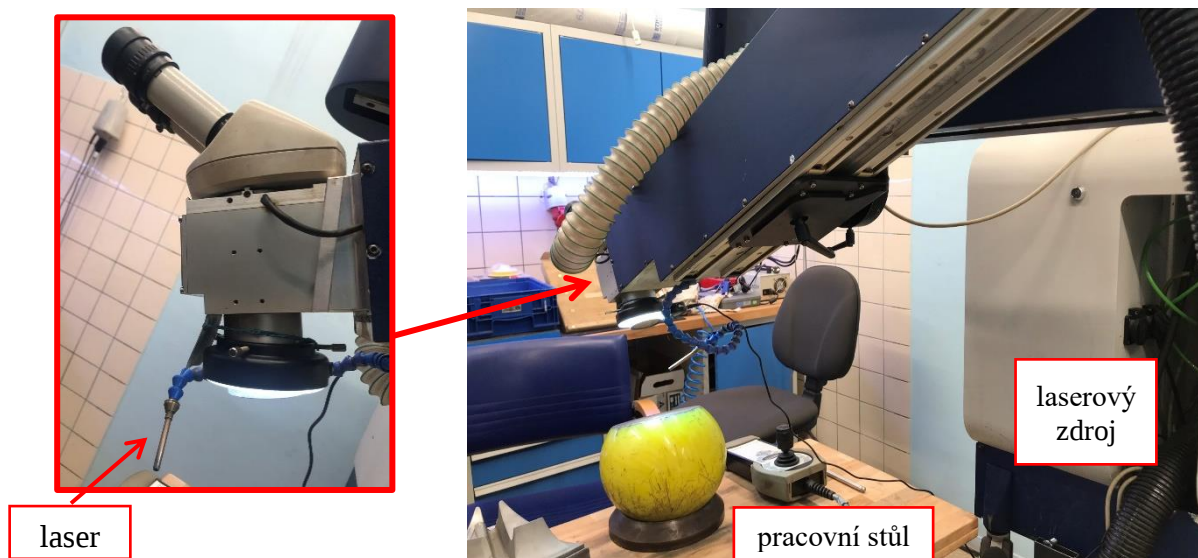
Obr. 75: Průběh mikrotvrdomosti - vzorek 2

5.2.5 Laserové pulzní mikronavařování [74]

Další z metod, která byla v rámci tohoto experimentu realizována, bylo laserové pulzní mikronavařování. Jedná se o technologii ručního navařování přídavného materiálu ve formě velmi tenkého drátu, který je podáván z boku do místa působení laserového svazku. Posuv laseru je poloautomatický. Prostřednictvím krátkých pulzů je současně realizováno tavení drátu a velmi tenké vrstvy substrátu. Jejich následným spojením vzniká tenká návarová vrstva.

Na obrázku 76 je laserové pracoviště, kde byl experiment prováděn. Byl použit pevnolátkový Nd:YAG laser, který má tyto parametry:

Vlnová délka	1064 nm
Max. střední výkon	160 W
Max. výkon pulzu	13 kW
Max. energie pulzu	120 J

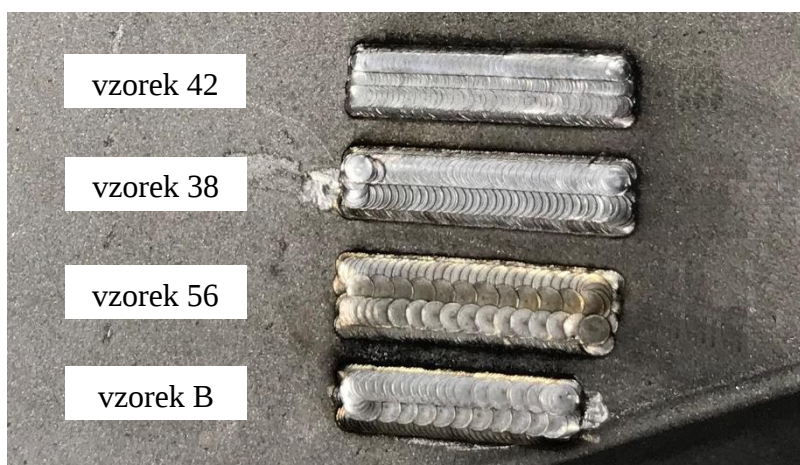


Obr. 76: Pracoviště laserového mikronavařování

Pro navařování byly použity dva typy přídavných materiálů:

- Laser Uni W o průměru 0,4 mm – Beriliova bronz AMPCO
- LS 10 M o průměru 0,5 mm – ekvivalent oceli 1.2343

Jako ochranný plyn byl použit argon. Celkem byly vytvořeny čtyři návary (obrázek 77), které budou postupně vyhodnoceny. Vzorky budou dále označovány: 38, 42, 56, B.



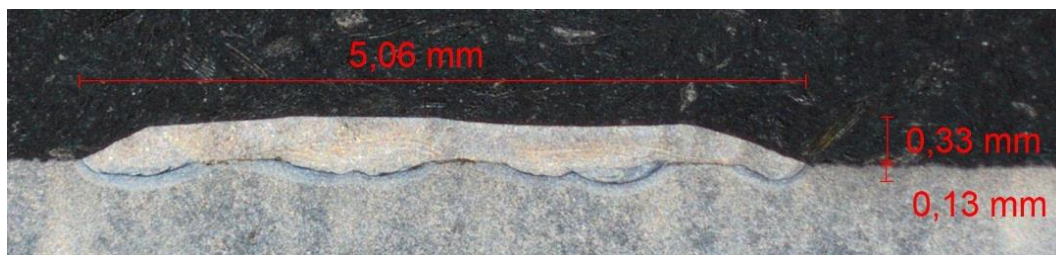
Obr. 77: Vzorky – pulzní mikronavařování

Nanášení přídatného materiálu je velmi přesné, avšak pracné. Každý ze vzorků je tvořen několika vrstvami. Velkou výhodou technologie je minimální tepelné ovlivnění základního materiálu. Velikost tepelně ovlivněné oblasti se u všech vzorků pohybuje v rozmezí setin až desetin milimetru.

Jak lze vidět na obrázku 77, všechny návary vypadají na první pohled velmi kvalitně. Jejich povrch je hladký, rovnoměrný a bez viditelných vad.

Při zkoumání metalografických výbrusů však byly u všech vzorků odhaleny vady jako trhliny, póry, a navíc také nespojitosti mezi navařenou vrstvou a základním materiálem. Tyto defekty degradují finální jakost a působí jako koncentrátoři napětí. Jejich vzniku může předcházet několik příčin a zpětně je obtížné je určit. Důvodem vzniku pórů mohou být například nečistoty na povrchu základního materiálu. Na vznik trhlin mají vliv jednak procesní parametry a samotné provedení návaru, dále také struktura použitých materiálů či způsob krystalizace a během ní vzniklá napětí.

- Vzorek 38: Byl použit přídatný materiál LS 10 M, předpokládaná tvrdost vrstvy 38 HRC. Na obrázku 78 je snímek makrostruktury, na kterém jsou vyznačeny rozměry návaru. Přechod do základního materiálu je nerovnoměrný a navařená vrstva je silná maximálně 0,46 mm.



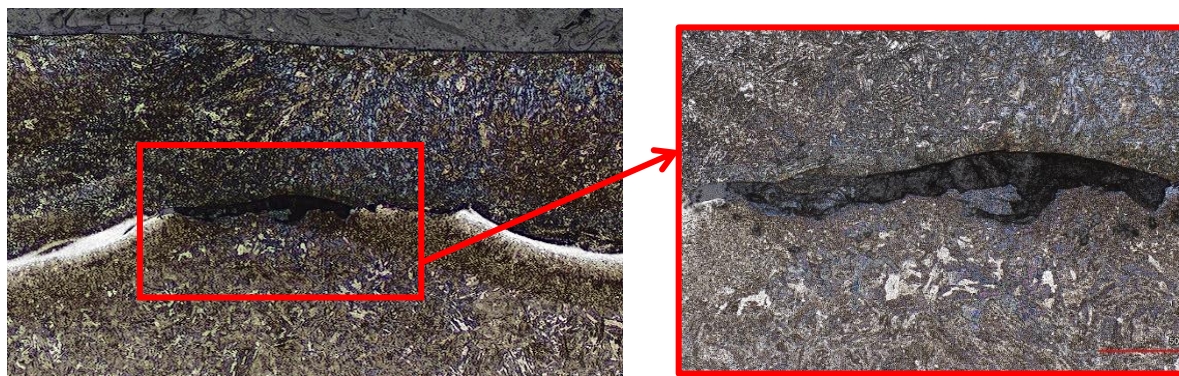
Obr. 78: Makrostruktura – vzorek 38

Maximální výška navařené vrstvy dosahuje 0,33 mm, hloubka závaru 0,13 mm. Z těchto hodnot je s využitím vztahu (4.1) určeno zředění:

$$Z = \frac{h}{v + h} \cdot 100 [\%]$$

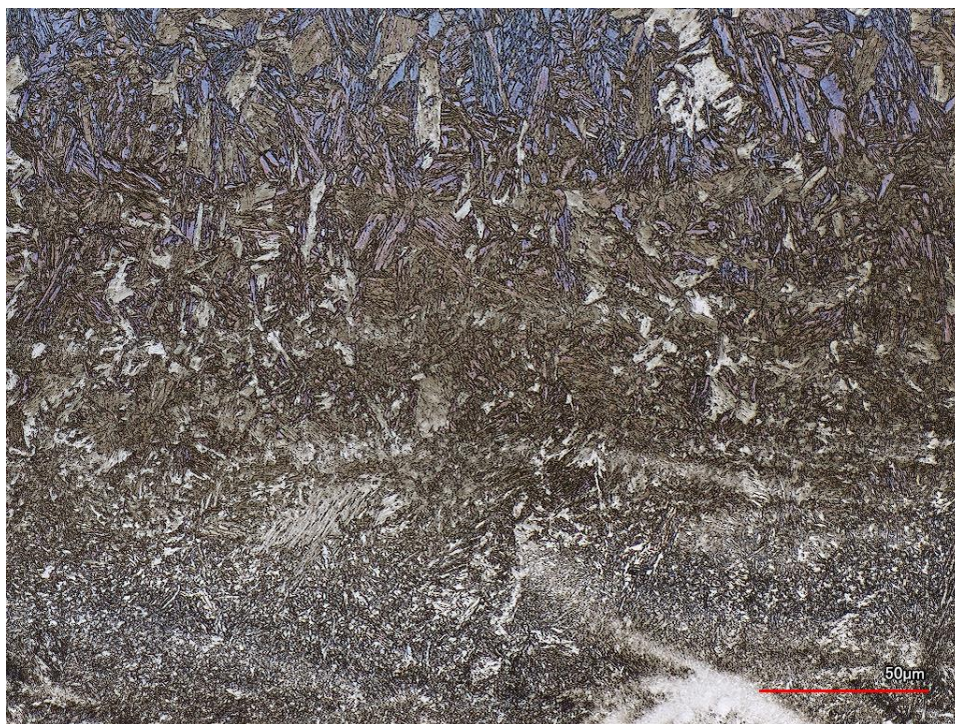
$$Z = \frac{0,13}{0,33 + 0,13} \cdot 100 = 28,26 \%$$

Při pozorování metalografického výbrusu na konfokálním mikroskopu byly zjištěny nespojitosti mezi navařenou vrstvou a materiálem formy. Snímek je na obrázku 79. Tyto vady by během provozu mohly vést k praskání a odlupování návaru.

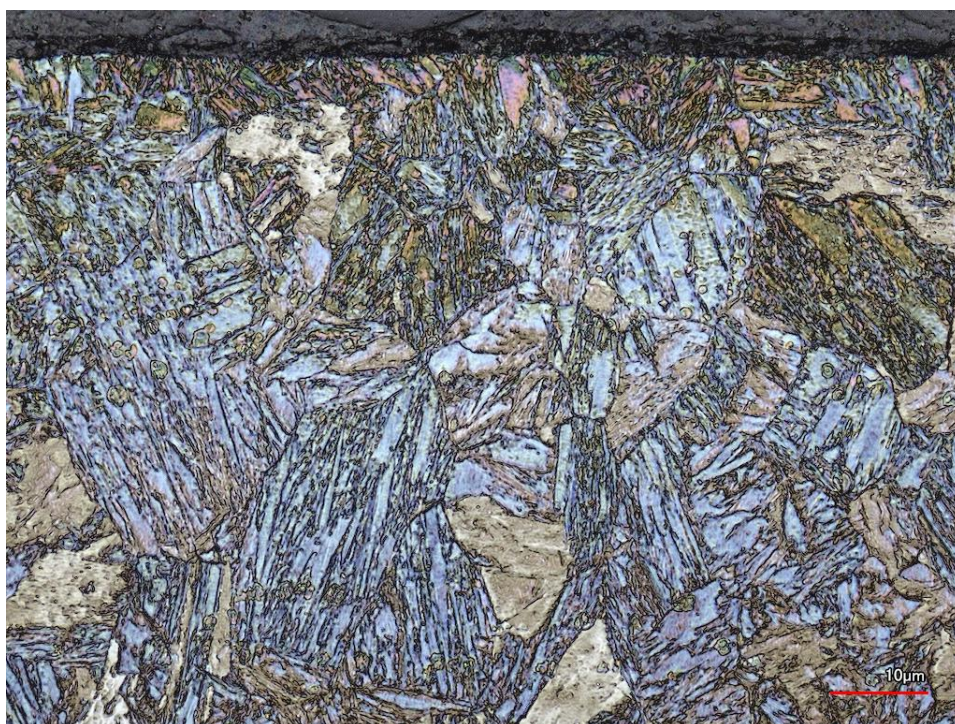


Obr. 79: Nespojitost mezi návarem a materiálem formy – vzorek 38

Ze sady návarů vytvořených pulzním mikronavařováním laserem je vzorek 38 jediným, u něž po naleptání došlo ke zviditelnění mikrostruktury svarového kovu. Na obrázku 80 je snímek mikrostruktury od povrchu návaru až po rozhraní se substrátem. Snímek mikrostruktury v povrchové vrstvě návaru je na obrázku 81. Struktura svarového kovu je martenzitická. V povrchové vrstvě je značně hrubší a lze rozeznat původní zrna austenitu. Směrem k základnímu materiálu struktura postupně zjemňuje, k čemuž dochází v důsledku vrstvení přídavného materiálu.

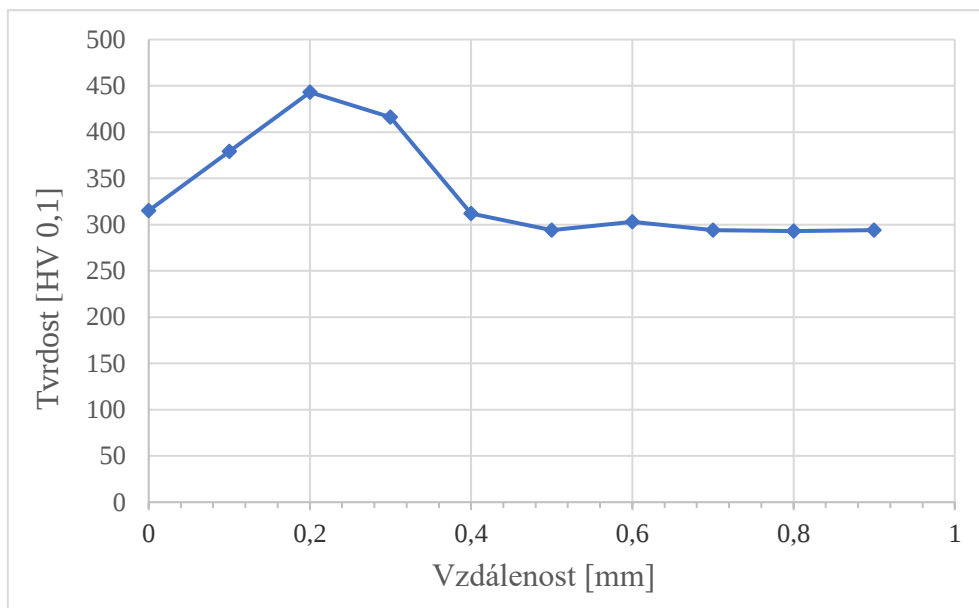


Obr. 80: Mikrostruktura – vzorek 38, zv. 50x



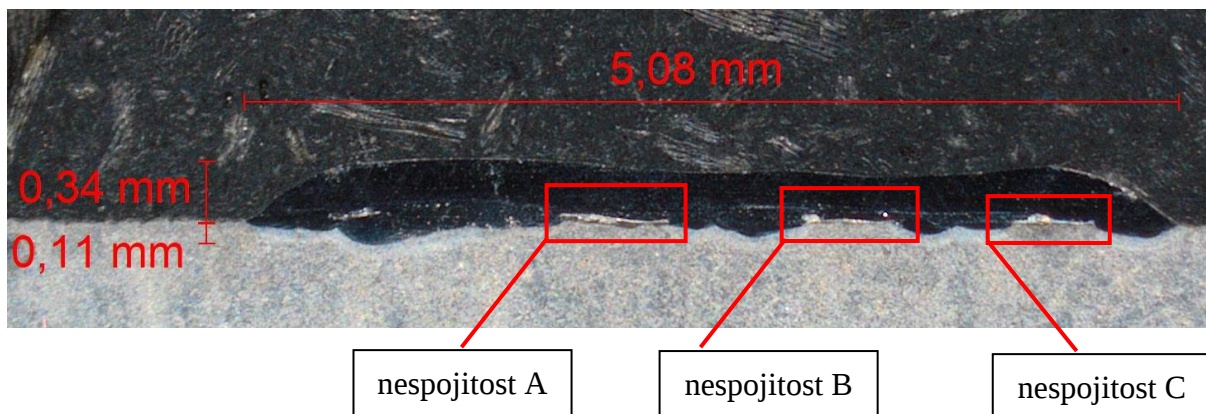
Obr. 81: Mikrostruktura – vzorek 38, zv. 150x

Na obrázku 82 je znázorněn průběh mikrotvrdosti vzorku 38. Hodnota naměřená na povrchu (315 HV 0,1) je srovnatelná s hodnotou mikrotvrdosti materiálu formy. Poté je patrný nárůst až do maxima ve vzdálenosti 0,2 mm.



Obr. 82: Průběh mikrotvrdosti – vzorek 38

- Vzorek 42: Byl použit přídavný materiál Laser Uni W, předpokládaná tvrdost vrstvy 42 HRC. Na obrázku 83 je snímek makrostruktury, na kterém jsou vyznačeny rozměry návaru. Přejít do základního materiálu je podobně jako u předchozího vzorku nerovnoměrný a navařená vrstva je silná maximálně 0,45 mm.



Obr. 83: Makrostruktura – vzorek 42

Maximální výška navařené vrstvy dosahuje 0,34 mm, hloubka závaru 0,11 mm. Z těchto hodnot je s využitím vztahu (4.1) určeno zředění:

$$Z = \frac{h}{v + h} \cdot 100 [\%]$$

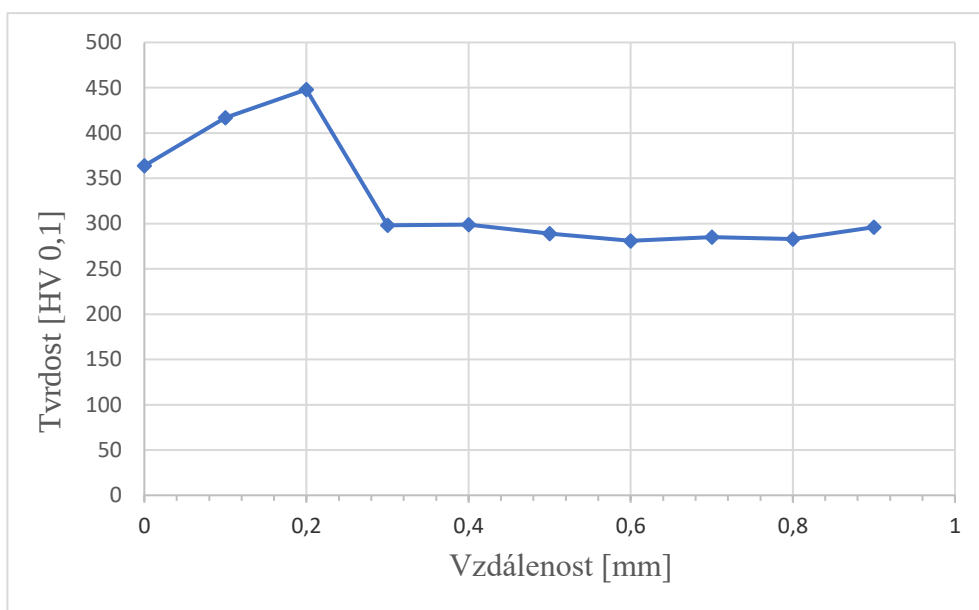
$$Z = \frac{0,11}{0,34 + 0,11} \cdot 100 = 24,44 \%$$

Už na snímku makrostruktury (obrázek 83) jsou patrné nespojitosti mezi navařenou vrstvou a základním materiálem. Na obrázku 84 je detail nespojitosti B, který byl zachycen na konfokálním mikroskopu při zvětšení 10x.



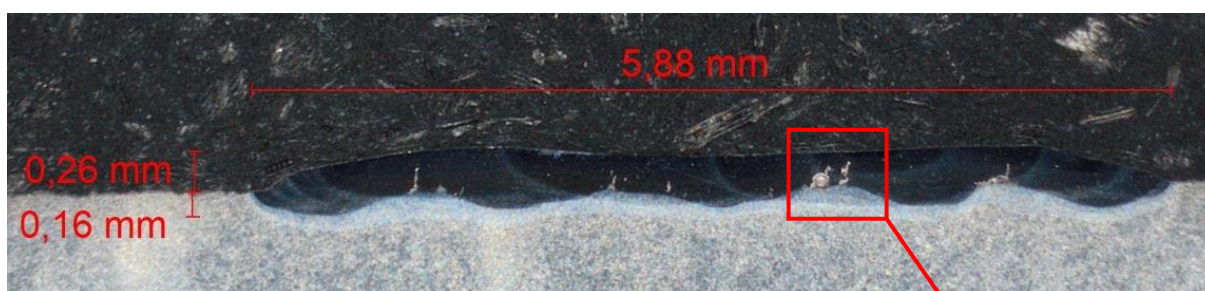
Obr. 84: Detail nespojitosti B – vzorek 42, zv. 10x

Na obrázku 85 je znázorněn průběh mikrotvrdosti vzorku 42. Hodnota naměřená na povrchu je v porovnání s hodnotou mikrotvrdosti materiálu formy vyšší, poté je patrný nárůst až do vzdálenosti 0,2 mm, kde dosahuje maxima, a následný pokles na hodnotu mikrotvrdosti základního materiálu



Obr. 85: Průběh mikrotvrdosti – vzorek 42

- Vzorek 56: Byl použit přídavný materiál Laser Uni W, předpokládaná tvrdost vrstvy 56 HRC. Na obrázku 86 je snímek makrostruktury, na kterém jsou vyznačeny rozměry návaru. Přejít do základního materiálu je opět nerovnoměrný a navařená vrstva je silná maximálně 0,42 mm.



Póry a trhliny

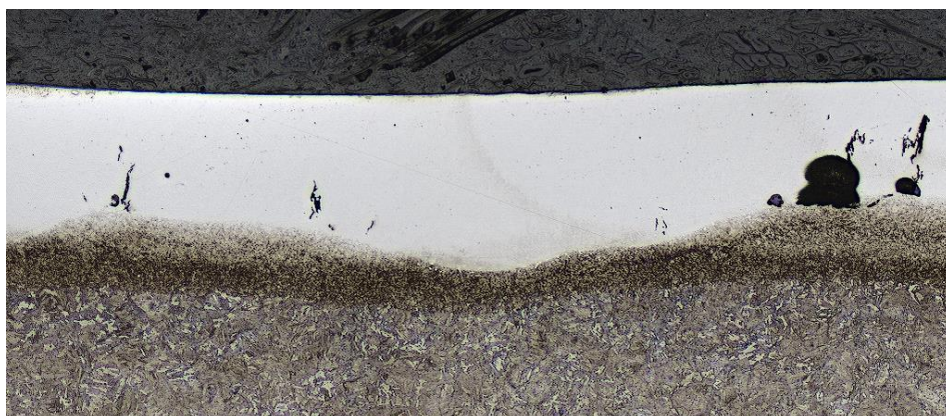
Obr. 86: Makrostruktura – vzorek 56

Maximální výška navařené vrstvy dosahuje 0,26 mm, hloubka závaru 0,16 mm. Z těchto hodnot je s využitím vztahu (4.1) určeno zředění:

$$Z = \frac{h}{v + h} \cdot 100 [\%]$$

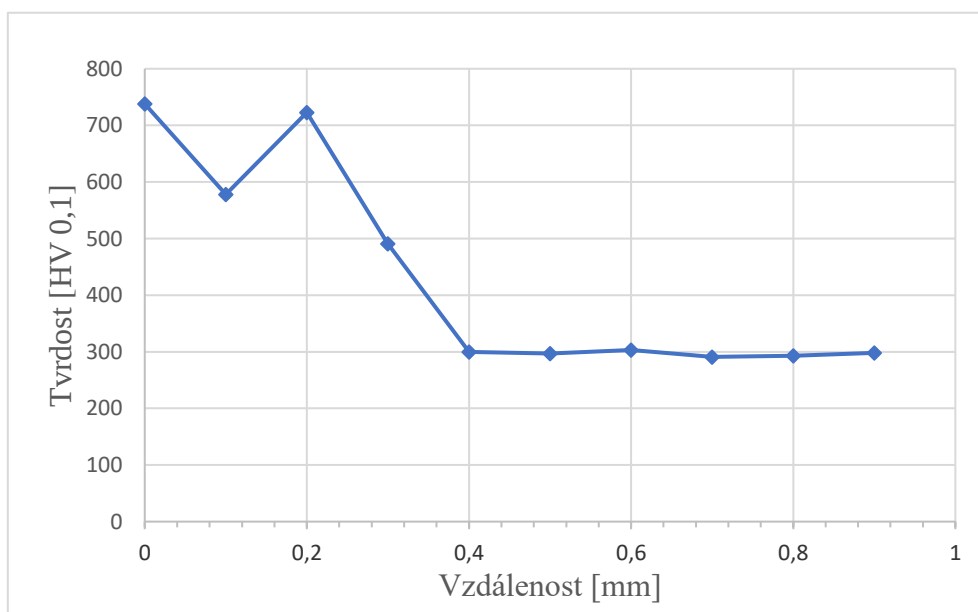
$$Z = \frac{0,16}{0,26 + 0,16} \cdot 100 = 38,10 \%$$

Už na obrázku 86 jsou návaru patrné póry a trhliny, které se snímku projevují jako světlá místa. Na obrázku 87 je detail těchto vad zachycen na konfokálním mikroskopu při zvětšení 10x. Defekty se nachází pouze ve svarovém kovu a nepřechází do tepelně ovlivněné zóny. Narozdíl od předchozích vzorků se na přechodu mezi navařenou vrstvou a základním materiálem nevyskytují žádné nespojitosti.



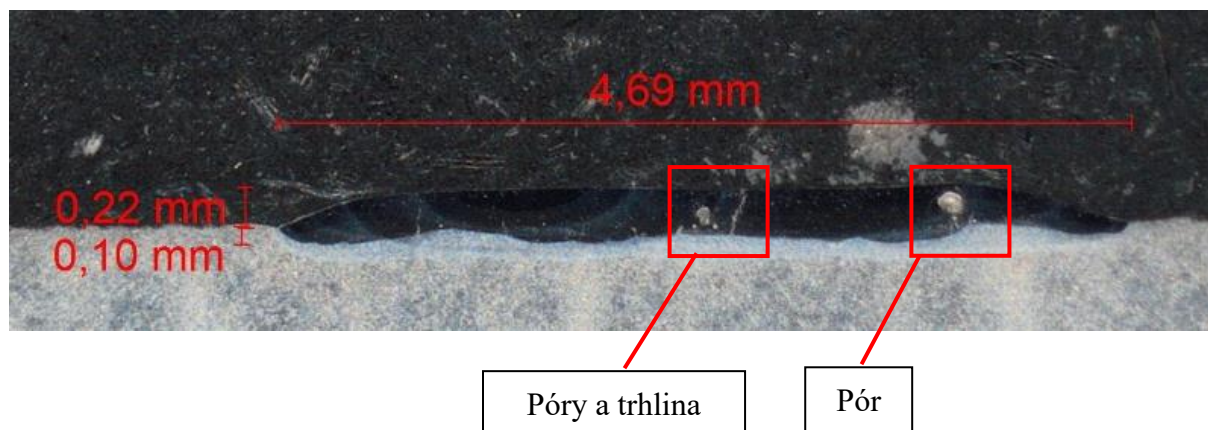
Obr. 87: Trhliny a póry – vzorek 56, zv. 10x

Na obrázku 88 je znázorněn průběh mikrotvrdosti vzorku 56, u nějž byla maximální hodnota naměřená na povrchu návaru. Nutno podotknout, že v porovnání s materiálem formy je mikrotvrdost návaru v horních vrstvách mnohem vyšší. To by opět mohlo působit problémy v případě konečného opracování návarů kdy jsou využívány konvenční nástroje.



Obr. 88: Průběh mikrotvrdosti – vzorek 56

- Vzorek B: Byl použit přídatný materiál Laser Uni W, předpokládaná tvrdost vrstvy 56 HRC. V tomto případě nebyl použit ochranný plyn a před navařováním bylo provedeno vybroušení povrchové vrstvy materiálu formy, a tím i odstranění případných nečistot nacházejících se na povrchu. Na obrázku 89 je snímek makrostruktury, na kterém jsou vyznačeny rozměry navařené vrstvy. Navařená vrstva je silná maximálně 0,32 mm



Obr. 89: Makrostruktura – vzorek B

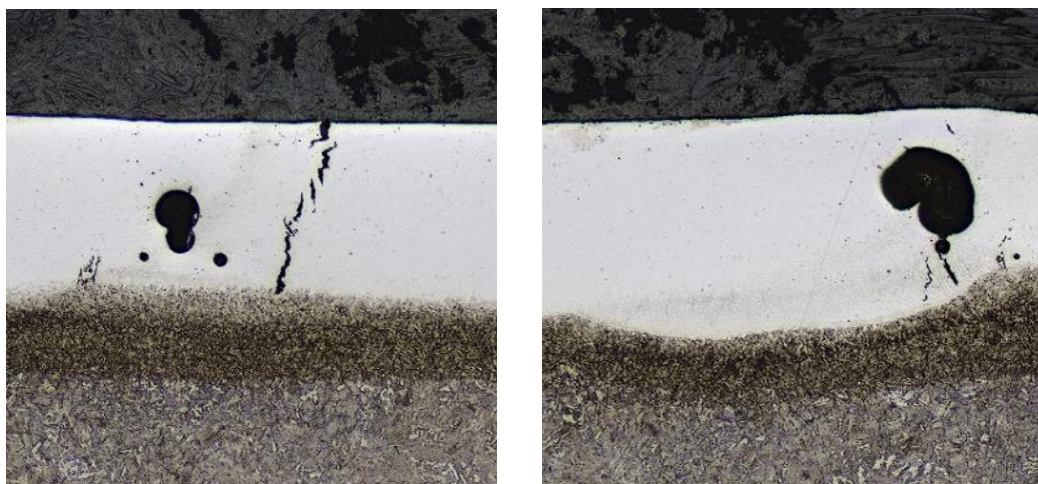
Maximální výška navařené vrstvy dosahuje 0,33 mm, hloubka závaru 0,13 mm. Z těchto hodnot je s využitím vztahu (4.1) určeno zředění:

$$Z = \frac{h}{v + h} \cdot 100 [\%]$$

$$Z = \frac{0,10}{0,22 + 0,10} \cdot 100 = 31,25 \%$$

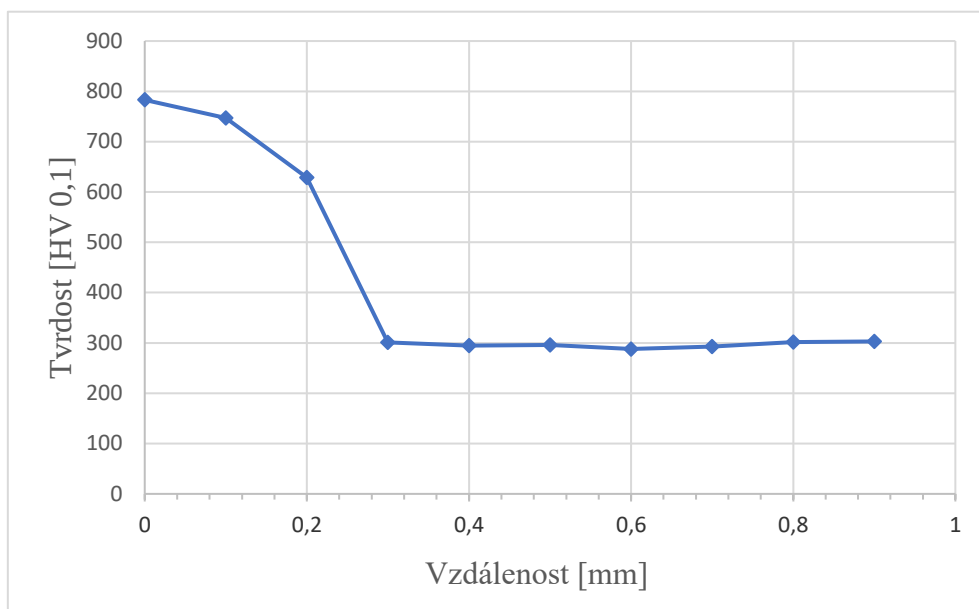
Přechod mezi návarem a základním materiálem je rovnoměrnější než v předchozích případech. Navíc se zde neobjevují nespojitosti jako u vzorků 38 a 42.

Přestože byl povrch formy před navařením řádně očištěn, jsou na obrázku 89 v návaru viditelná světlá místa, která indikují výskyt vad. Pomocí konfokálního mikroskopu bylo provedeno podrobnější zkoumání navařené vrstvy, kterým byla prokázána přítomnost pórů. Dalšími defekty, které se ve svarovém kovu vyskytují jsou trhliny. Na obrázku 90 je zobrazen detailnější snímek výše uvedených vad. Póry jsou v poměru k tloušťce návaru velké, trhlina prochází od povrchu navařené vrstvy až k tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 90: Póry a trhliny – vzorek B, zv. 10x

Na obrázku 91 je znázorněn průběh mikrotvrdosti vzorku B, ze kterého je jasně zřetelné, že mikrotvrdost návaru je v porovnání s materiálem formy podstatně vyšší. Nejvyšší hodnota byla naměřena u povrchu navařené vrstvy. Do hloubky 0,3 mm je patrný rovnoměrný pokles až na hodnotu mikrotvrdosti materiálu formy.



Obr. 91: Průběh mikrotvrdosti – vzorek B

6 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Při výběru technologie opravy je nutné prověřit řadu aspektů a také zvážit, zda je použití laserových technologií ekonomicky výhodné. V tabulce 7 jsou uvedeny základní geometrické charakteristiky, zředění a velikost tepelně ovlivněné oblasti jednotlivých provedených návarů. Z hodnot je zřejmé, že při navařování TIG dochází ke značnému tepelnému ovlivnění základního materiálu, což by při opakovaných opravách mohlo vést k nežádoucím strukturním změnám. Po těchto opravách by pak bylo vhodné zařadit dodatečné tepelné zpracování formy. U laserových technologií je velikost tepelně ovlivněné zóny menší, u mikronavařování pak maximálně v řádu desetin milimetru. Laserové navařování drátu se vyznačuje hlubokým závarem, což by mohlo být výhodné při opravě některých typů vad.

Tabulka 7: Souhrnná tabulka základních geometrických parametrů návarů.

Geometrické poměry		Výška návaru [mm]	Hloubka závaru [mm]	Šířka závaru [mm]	Zředění [%]	Šířka TOO [mm]
Laserové technologie	TIG	1,11	1,14	7,42	50,67	1,89
	Mikroplazma	1,11	0,49	2,58	30,63	0,70
	Navařování drátu	1,79	3,19	4,02	64,06	0,49
	Navařování prášku	vzorek 1	0,72	0,50	8,12	40,98
		vzorek 2	1,11	0,75	11,50	40,32
	Mikronavařování	vzorek 38	0,33	0,13	5,06	28,26
		vzorek 42	0,34	0,11	5,08	24,44
		vzorek 56	0,26	0,16	5,88	38,10
		vzorek B	0,22	0,10	4,69	31,25

Je nutné také důkladně uvážit ekonomické hledisko jednotlivých technologií. Cena návarů je závislá na různých aspektech. S uvážením parametrů, jako jsou například cena přídavných materiálů, spotřeba ochranného a dopravního plynu, dále také počáteční investice, náklady spojené s provozem stroje a režijní náklady, lze technologie z hlediska ceny návarů seřadit vzestupně takto:

1. Navařování TIG
2. Navařování mikroplazmou
3. Laserové pulzní mikronavařování
4. Laserové navařování drátu
5. Laserové navařování prášku

Z uvedených technologií jsou ceny TIG návarů nejnižší. V případě navařování mikroplazmou jsou náklady o něco vyšší, což je dáno mimo jiné vyšší cenou svařovacího zařízení.

V případě laserových technologií je cena návarů v porovnání s předchozími technologiemi vysoká a je ovlivněna mimo jiné vysokými investičními náklady na laserové zdroje a potřebné příslušenství. Zatímco mikronavařování se provádí ručně, laserové navařování drátů i prášků vyžaduje strojní vedení navařovací hlavy a provádí se na specializovaných pracovištích. Ta jsou vybavena řadou příslušenství, které zahrnuje mimo standartního vybavení (stůl, upínací přípravky nebo přidržovače) také robotická ramena a polohovačla. U těchto technologií je také mnohem vyšší spotřeba ochranného plynu. Laserové navařování prášků však stojí z hlediska nákladů nejvýše. To je dáno cenou práškových přídavných materiálů, která je mnohem vyšší než v případě drátů, výhodou je však mnohem širší sortiment dostupných materiálů. Nutno však podotknout, že díky plné automatizaci jsou časy navařování v porovnání s ručními technologiemi několikanásobně kratší.

7 ZÁVĚRY

Hlavním cílem diplomové práce byla studie laserového navařování a prověření možnosti jeho využití při opravách a renovacích forem pro odlévání hliníkových kol. Za tímto účelem byly navrženy a odzkoušeny dosud nepoužívané laserové technologie oprav, a také navařování mikroplazmou. Současně byl pro porovnání proveden i zkušební návar stávající technologií TIG. Výsledky dosažené v experimentální části ukazují, že opravy mohou být velmi komplikované a volba konkrétní metody závisí mimo jiné také na charakteru a rozsahu vad.

Návary je nutné hodnotit z více hledisek. Jedním z nich je zředění, které patří mezi základní kritéria kvality navařených vrstev. Nejmenší zředění bylo dosaženo při pulzním mikronavařování laserem, kdy se jeho hodnoty pohybují v rozsahu 24,44 až 38,1 %. Největší zředění bylo zjištěno při laserovém navařování drátu. Přesné hodnoty uvádí tabulka 7.

Zředění přímo souvisí s geometrií návaru. V případě laserového navařování drátu bylo dosaženo hlubokého průvaru. Využití této technologie by bylo vhodné právě při opravách vad nacházejících se hlouběji pod povrchem, bylo by však nutné sledovat promísení přídavného a základního materiálu. Naopak pro odstranění drobných povrchových vad, kdy není potřeba doplnění velkého množství materiálu, je vhodnější pulzní mikronavařování. Tepelně ovlivněná oblast je zde minimální a metoda je vhodná i pro opakované opravy, aniž by docházelo k nežádoucím změnám vlastností materiálu formy, což je v porovnání s navařováním TIG velmi výhodné.

Dalším vyhodnocovaným parametrem byla mikrotvrdost. Největší hodnoty byly naměřeny na vzorcích navařovaných práškem, podobných hodnot bylo dosaženo na vzorcích 56 a B provedených laserovým mikronavařováním. Tyto hodnoty jsou příliš vysoké, nesplňují zadané požadavky a pro dokončovací práce by nebylo možné použít konvenční nástroje z rychlořezné oceli.

Dalším aspektem, který je nutné brát v potaz je místo výskytu vad. V případě strojního laserového navařování drátu a prášku je také limitujícím faktorem velikost navařovacích hlav, kdy jsou opravy v těžko dostupných a tvarově složitých místech obtížné nebo dokonce nemožné. Pro tyto aplikace je tedy vhodnější volit jednu z ručních technologií.

Při metalografických šetřeních byly na některých vzorcích nalezeny vady typu trhlin, pórů nebo nespojitosti navařené vrstvy se základním materiálem. Z těchto výsledků je patrné, že nebylo dosaženo optimálních výsledků. Pro zajištění požadované kvality navařených vrstev je třeba zvolit vhodnou kombinaci vstupních procesních parametrů. Jejich nalezení však může být velmi složité, a navíc vyžaduje testování, které může být časově i finančně náročné. Je tedy nutné důkladně svázat ekonomická hlediska jednotlivých technologií a nutnost jejich využití.

Laserové navařování je velmi perspektivní technologie, která se neustále vyvíjí. I přes vysoké finanční náklady je pro své výhody a možnosti dosáhnout velmi kvalitních vrstev v oboru oprav a renovací stále více využívána.

Tabulka 8: Souhrnné porovnání použitých technologií navařování.

Metoda		Hloubka závaru	Šířka návaru	Tvrdost vrstvy	Technická náročnost	Ekonomická náročnost	Časová náročnost
LASER	TIG	střední	velká	střední	nízká	nízká	střední
	Mikroplazma	malá	střední	nízká	nízká	nízká	střední
	Navařování drátu	velká	střední	střední	vysoká	vysoká	nízká
	Navařování prášku	malá	velká	vysoká	vysoká	vysoká	nízká
	Mikronavařování	velmi malá	malá	střední až vysoká	střední	střední	vysoká

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. JHAVAR, Suyong, Christ P. PAUL a Neelesh K. JAIN. Causes of failure and repairing options for dies and molds: a review. In: *Engineering Failure Analysis* [online]. 2013 [cit. 2020-03-12]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.09.006>. ISSN 1350-6307. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630713002963?via%3Dihub#>
2. PEÇAS, Paulo, Elsa HENRIQUES, Bruno PEREIRA, Marco LINO a Marco SILVA. Fostering the Use of Welding Technology in the Mould Repair. In: *Conference: Rapid Prototyping Development* [online]. 2006 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/237837071_Fostering_the_Use_of_Welding_Technology_in_the_Mould_Repair
3. TOYSERKANI, Ehsan, Amir KHAJEPOUR a Stephen CORBIN. *Laser Cladding* [online]. 1. CRC Press, 2005 [cit. 2020-03-21]. ISBN 0-8493-2172-7. Dostupné z: <https://book.cc/book/602393/5f9bd0>
4. Laser Metal Deposition. *Laserline* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/laser-metal-deposition/>
5. MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPELA, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ. Encyklopedie hliníku. Děčín: Adin, s. r. o., Prešov, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
6. Monitoring chování forem. Ostrava: Maxion Wheels Czech s.r.o., 2019. Interní prezentace firmy Maxion Wheels Czech s.r.o. Ostrava
7. ZHANG, Bin, Steve L. COCKCROFT, Daan M. MAIJER, Andre B. PHILION a J.D. ZHU. Casting defects in low-pressure die-cast aluminum alloy wheels. *JOM* [online]. 2005, (57), 36-43 [cit. 2020-06-26]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0025-1>. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11837-005-0025-1>
8. Maxion Wheels plant in South Africa recognised as among the best in the group. In: <http://metalworkingnews.info/> [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <http://metalworkingnews.info/maxion-wheels-plant-in-south-africa-recognised-as-among-the-best-in-the-group/>
9. DADIĆ, Zvonimir, Dražen ŽIVKOVIĆ, Nikša ČATIPOVIĆ a Josip BILIĆ. High pressure die casting mould repair technologies. In: International Conference "Mechanical Technologies and Structural Materials 2017" [online]. Split, 2017 [cit. 2020-03-03]. ISSN 1847-7917. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/320036239>
10. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
11. BAJDA, Miroslav. Navařování kovů: 2. část. *Svět svaru*. Ostrava, 2005, 9(3), 5-6.
12. OK TIGROD 16.95. *ESAB* [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/products/filler-metals/tig-rods-gtaw/stainless-steel-rods/ok-tigrod-16-95.cfm>

13. BALEJ, Zdeněk, Vladimír KUDĚLKA a Jan OPLETAL. *Učebnice pro základní kurz svařování ZK 141 8: obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu vysokolegovaných austenitických ocelí : (TIG, WIG, GTAW)*. 3. aktualizované vydání. Ostrava: ZEROSS - svářečské nakladatelství, [2013]. Svařování. ISBN 978-80-85771-03-9.
14. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
15. TIG svařování II - AC nebo DC? In: *Svarweb: Svarinfo* [online]. 6. 2. 2009 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008122801>
16. KUBÍČEK, Jaroslav. Renovace a povrchové úpravy. In: *Odbor svařování a povrchových úprav FSI VUT v Brně* [online]. Brno, 2006 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hrp_renovace_a_povrchove_upravy_kubicek.pdf
17. Zkoušky tvrdosti. In: *Západočeská univerzita v Plzni: Oddělení povrchového inženýrství* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
18. VRTOCHOVÁ, Tatiana, Ladislav SCHWARZ, Koloman ULRICH a František KOLENIČ. Renovation of tools with laser cladding: off - axis powder injection. *Materials Science and Technology* [online]. 2010, **10**(1), 36-42 [cit. 2020-03-21]. ISSN 1335-9053. Dostupné z: https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/internetovy_casopis/2010/1/vrtochova.pdf
19. Coating. <https://www.deloro.com/> [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.deloro.com/products/engineered-components/coating/#!/cb61>
20. BRANDT, Milan. *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications* [online]. Woodhead Publishing, 2017 [cit. 2020-03-21]. ISBN 978-0-08-100433-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03891-9>
21. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. 1. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
22. VILLAR, Rui. Laser Cladding. *Journal of Laser Applications* [online]. 1999, **11**(2) [cit. 2020-03-21]. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.521888>. Dostupné z: <https://lia.scitation.org/doi/10.2351/1.521888>
23. KANNATEY-ASIBU, Elijah. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2009. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 04-701-7798-5.
24. MOSKOVSKÝ, Radek a Karel NETERDER. Efektivní aplikace laseru. In: *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2014, 9. 12. 2014 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-aplikace-laseru.html>
25. Laserové navařování. *Mepac* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mepac.cz/cz/lasery---sluzby/laserove-navarovani2>

26. Diffractive Optics: How ultrashort laser pulses influence beam-shaping optics. In: *Laser Focus World* [online]. 2017, 13 Sep 2017 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/optics/article/16548164/diffractive-optics-how-ultrashort-laser-pulses-influence-beamshaping-optics>
27. 1µm High-Power Direct-Diode Laser (HPDDL) Beam Integrators. In: *II-VI* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.ii-vi.com/product/1-micron-high-power-direct-diode-laser-hpddl-beam-integrators/>
28. GEDDA, Hans. *Laser surface cladding a literature survey*. Lulea Tekniska Universitet: Institutionen for Material, 2000. ISSN 1402-1536.
29. STANCIU, Elena Manuela, Catalin CROITORU, Ionut Claudiu ROATĂ, Julia Mirza ROSCA, Cimpoesu NICANOR, Mircea Horia TIEREAN a Cristina BOGATU. Pulsed Laser Cladding of NiCrBSiFeC Hardcoatings Using Single-Walled Carbon Nanotube Additives. *Hindawi* [online]. 2019, 2 Sep 2019 [cit. 2020-06-25]. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/2401295>. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2019/2401295/>
30. STEEN, William M. a Jyotirmoy MAZUMDER. *Laser Material Processing*. Fourth Edition. Springer, 2010. ISBN 978-1-84996-061-8.
31. LEYENS, Christoph a Eckhard BEYER. Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition. *Laser Surface Engineering: Processes and Applications* [online]. Woodhead Publishing, 2015, s. 181-192 [cit. 2020-03-21]. ISBN 978-1-78242-074-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-074-3.00008-8>
32. PAJUKOSKI, Henri, Jonne NÄKKI, Sebastian THIEME, Jari TUOMINEN, Steffen NOWOTNY a Petri VUORISTO. Laser cladding with coaxial wire feeding. In: *Journal of Laser Applications* [online]. 2012 [cit. 2020-03-21]. DOI: 10.2351/1.5062408. Dostupné z: <https://doi.org/10.2351/1.5062408>
33. MRŇA, Libor. Základy laserové techniky. In: *Odbor svařování a povrchových úprav FSI VUT v Brně* [online]. Brno [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf
34. OCYLOKA, Sörn, Mario LEICHNITZA, Sebastian THIEME a Steffen NOWOTNY. Investigations on laser metal deposition of stainless steel 316L with coaxial wire feeding. In: *9th International Conference on Photonic Technologies LANE 2016* [online]. 2016 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.lane-conference.org/industrial-contributions-2016/>
35. BRISCHETTO, Salvatore, Paolo MAGGIORE a Carlo Giovanni FERRO. *Additive Manufacturing Technologies and Applications* [online]. 2017 [cit. 2020-03-21]. ISBN 978-3-03842-549-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-549-6>
36. Powder Nozzles. In: *IXUN Lasertechnik* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.ixun-lasertechnik.de/produkte/nozzles>
37. SCHNEIDER, Marcel Frederik. *Laser cladding with powder: Effect of some machining parameters on clad properties*. Enschede: Print Partners Ipskamp, 1998. ISBN 90-365-1098-8.

38. LAWRENCE, Jonathan, Juan POUL, Ehsan TOYSERKANI a David K. Y. LOW, ed. *Advances in laser materials processing: Technology, research and applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010. ISBN 978-1-84569-474-6.
39. DOWDEN, John, ed. *The Theory of Laser Materials Processing: Heat and Mass Transfer in Modern Technology*. Dordrecht: Springer, 2009. ISBN 13-978-1-4020-9339-5.
40. GASSER, Andres. Výroba a opravy pomocí laseru. In: *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2015, 11. 3. 2015 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-a-opravy-pomoci-laseru.html>
41. RAMBOUSEK, Zdeněk, Tomáš VENCL, Aleš RICHTER, Ivo ČERVINKA, Vít KIRSCHNER a Romana KÚRKOVÁ. *Laserové stanice: zdroje, technologie, konstrukce*. Liberec: VÚTS, 2015. ISBN 978-80-87184-61-5.
42. Buyer's Guide: Understanding Laser Machines: How can I select the right laser source for my application? In: *Conrollaser* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.controllaser.com/articles/buyers-guide/how-can-i-select-the-right-laser-source-for-my-application/>
43. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. In: *Lao* [online]. 2013 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
44. NĚMEČEK, Stanislav. *Laserové technologie* [online]. Plzeň: Matex PM, 2013 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://adoc.tips/laserove-technologie.html>
45. RÜTERING, Marus. Co rozhoduje při volbě typu laseru. In: *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2011 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
46. LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. In: *Portál moderní fyziky* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
47. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Lasery využívající pevné látky. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 - 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/786-lasery-vyuzivajici-pevne-latky>
48. ČERNÝ, Václav. Laser - od objevu k průmyslovým aplikacím. *Elektro: Odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2005, (4) [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/laser-od-objevu-k-prumyslovym-aplikacim--13653>
49. Plynové lasery. *Optixs: Lasery a přístrojová technika* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/lasery-28k/plynove-lasery-50k>
50. NASIM, Hira a Yasir JAMIL. Diode lasers: From laboratory to industry. *Optics & Laser Technology* [online]. 2014, (56), 211-222 [cit. 2020-06-25]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.08.012>. ISSN 0030-3992. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399213003010?via%3Dihub>

51. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. In: *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2012 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
52. FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994.
53. FÜRBAACHER, Ivan, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity*. Svazek 3. Praha: Verlag Dashöfer, 2000. ISBN 80-86229-02-5.
54. FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Věra OLŠAROVÁ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.
55. *Materiály a jejich chování při svařování: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, Český svářečský ústav, 2016.
56. Svařitelnost kovových materiálů. In: *Studijní materiály nejen do strojírenství* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/03/3951-svaritelnost-kovovych-materialu.html>
57. Doplnující údaje a tabulky. In: *ESAB* [online]. ESAB Vamberk, s.r.o., 2017 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://esab.cz.uvirt66.active24.cz/images/PDF-1-Pridavne-2017/kapitola_M-9-2017.pdf
58. Příručka svařování: Opravy a údržba. In: *Stahlben* [online]. ESAB Vamberk, 2011 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://stahlben.cz/products/pdf/esab_repair_maintenance.pdf
59. Ochrana proti opotřebení a opravy svařováním, navařováním a pájením. In: *Stahlben* [online]. Böhler Welding Group [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://www.stahlben.cz/products/pdf/boehler_opravy_a_navary.pdf
60. Schweissen im Verkaufsbau. In: *Böhler Edelstahl* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.boehler-edelstahl.com/app/uploads/sites/92/2018/08/BW140D_Schweissbrosch.pdf
61. Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I: Hodnocení kvality svarového spoje. In: *Ústav strojírenské technologie ČVUT v Praze* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/104/def-kontrola-sv.pdf>
62. SIGMUND, Marian. *DT a NDT metody zkoušení svarů*. Odbor svařování a povrchových úprav FSI VUT v Brně, 2017.
63. JANKURA, Daniel, Janette BREZINOVÁ, Jarmila ŠEVČÍKOVÁ, Dagmar DRAGANOVSKÁ a Anna GUZANOVÁ. *Materiály v strojárskiej výrobe a technológíe ich finalizácie*. Technická univerzita v Košiciach, 2011. ISBN 978-80-553-0786-2.

64. BARTÁK, Jiří, Vladimír BUBENÍK, Jan BUREŠ, Jan BURKOVÍČ, Bohumil MÍŠEK a Heinz NEUMANN. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2000. Svařování. ISBN 80-857-7172-1.
65. Nedestruktivní testování, NDT zkoušky. In: *Dekra* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://dekra.cz/testovani/materialove-testovani/nedestruktivni-zkouseni-ndt-zkousky/>
66. ATG: *NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/>
67. Vizuální kontrola. In: *Gamalux Defektoskopie* [online]. 2017 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.gamalux.cz/pouzivane-metody/vizualni-kontrola/>
68. HALLBÄCK, Jonas. Nedestruktivní zkoušky v SKF. In: *Techmagazín* [online]. 2017 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/46493>
69. Zkoušky bez porušení materiálu – nedestruktivní zkoušky. In: *Střední průmyslová škola Ostrava-Vítkovice* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/KOM/KOM_3_5_SPU-zkousky_bez_poruseni_materialu.pdf
70. *Weldinspect: Nedestruktivní testování výrobků a inspekce svařování* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://weldinspect.cz/>
71. Zkoušení vířivými proudy. *Foerster* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.foerstergroup.cz/cs/cze/technologie/zkouseni-virivymi-proudy/>
72. Konfokální mikroskop s 3D laserovým skenováním. *Keyence* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/microscope/laser-microscope/>
73. MRŇA, Libor. Svařování laserem. In: *Odbor svařování a povrchových úprav FSI VUT v Brně* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf
74. SCHMIDOVÁ, Eva. *Metalurgické vady svarových spojů*. Vyd. 2. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra mechaniky, materiálů a částí [sic] strojů, 2014. ISBN 978-80-7395-851-0.

SEZNAM OBRÁZKŮ

	Str.
Obr. 1: Ukázky laserového navařování [73]	9
Obr. 2: Rozevřená forma na licím stroji	10
Obr. 3: Forma ve složeném stavu	10
Obr. 4: Průřez tvarovou dutinou [7]	10
Obr. 5: Spodní díl a čelisti [8]	11
Obr. 6: Horní díl formy	11
Obr. 7: Model spodního dílu [6]	11
Obr. 8: Eroze vtoku formy	11
Obr. 9: Kritická místa [6]	12
Obr. 10: Trhlina v kritickém místě	12
Obr. 11: Chybějící materiál – střed kola [6]	12
Obr. 12: Chybějící materiál – šroubový otvor [6]	12
Obr. 13: navařování TIG [11]	13
Obr. 14: TIG svařování DC [15]	13
Obr. 15: Navařování mikroplazmou [17]	14
Obr. 16: Povlakování [19]	15
Obr. 17: Opravy a renovace [25]	15
Obr. 18: 3D tisk	15
Obr. 19: flat-top módy [26]	15
Obr. 20: integrátor [27]	15
Obr. 21: Rozdíl mezi legováním, glazováním a navařováním [3]	16
Obr. 22: Dvoufázové navařování [29]	16
Obr. 23: Navařování pasty [3]	17
Obr. 24: Navařování drátem [33]	17
Obr. 25: Koaxiální podávání drátu [34]	18
Obr. 26: Princip navařování pomocí vstřikování prášku [20]	18
Obr. 27: Koaxiální tryska [36]	19
Obr. 28: Radiálně symetrická tryska [36]	19
Obr. 29: Geometrie návaru [3]	29
Obr. 30: Absorpce materiálu v závislosti na vlnové délce [42]	21
Obr. 31: Pevnolátkové lasery [43]	23
Obr. 32: Schéma DC RF CO ₂ laseru [43]	24
Obr. 33: Zkouška tvrdosti dle Rockwella [63]	28
Obr. 34: Princip zkoušky dle Brinella [63]	29
Obr. 35: Zkouška tvrdosti dle Vickerse [63]	29
Obr. 36: Vizuální kontrola pomocí posuvné měrky [67]	30
Obr. 37: Postup kapilární zkoušky [69]	31
Obr. 38: Princip magnetické práškové metody [66]	31
Obr. 39: Zkouška vířivými proudy [71]	32
Obr. 40: Radiografická zkouška [69]	32
Obr. 41: Odrazová metoda a záznam na defektoskopu [70]	33
Obr. 42: Průchodová metoda [69]	33
Obr. 43: Schéma přívodu chlazení [6]	34
Obr. 44: Trhliny na axiálním řezu	34
Obr. 45: Trhliny na radiálním řezu	34
Obr. 46: Část formy použité pro experiment	35
Obr. 47: Struers Secotom-60	35
Obr. 48: Struers CitoPress-1	35

Obr. 49: Struers Tegamin-20	35
Obr. 50: Konfokální mikroskop Keyence [72]	36
Obr. 51: Snímek mikrostruktury materiálu formy	36
Obr. 52: TIG návar	37
Obr. 53: Makrostruktura – návar TIG	37
Obr. 54: Tepelně ovlivněná oblast – návar TIG	38
Obr. 55: Průběh mikrotvrdosti – TIG návar	38
Obr. 56: Návar mikroplazmou	39
Obr. 57: Makrostruktura – návar mikroplazma	39
Obr. 58: Tepelně ovlivněná oblast – návar mikroplazma	40
Obr. 59: Průběh mikrotvrdosti – návar mikroplazma	40
Obr. 60: Laserové pracoviště ÚPT AV ČR [73]	41
Obr. 61: Makrostruktura – laserové navařování drátu	41
Obr. 62: Tepelně ovlivněná oblast a detail trhliny	42
Obr. 63: Průběh mikrotvrdosti – laserové navařování drátu	42
Obr. 64: Laserové pracoviště v KSK	43
Obr. 65: Navařovací hlava a detail zaostření paprsku laseru na povrch formy	43
Obr. 66: Navařování prášku – vzorky	44
Obr. 67: Makrostruktura – navařování prášku, vzorek 1	44
Obr. 68: Mikrostruktura – navařování prášku, vzorek 1	45
Obr. 69: Trhlina – vzorek 1	45
Obr. 70: Mikrostruktura – vzorek 1, zv. 150x	46
Obr. 71: Makrostruktura – navařování prášku, vzorek 2	46
Obr. 72: Snímek z konfokálního mikroskopu – vzorek 2, zv. 2,5x	47
Obr. 73: Vměstek – vzorek 2, zv. 50x	47
Obr. 74: Průběh mikrotvrdosti - vzorek 1	48
Obr. 75: Průběh mikrotvrdosti - vzorek 2	48
Obr. 76: Pracoviště laserového mikronavařování	49
Obr. 77: Vzorky – pulzní mikronavařování	49
Obr. 78: Makrostruktura – vzorek 38	50
Obr. 79: Nespojitost mezi návarem a materiálem formy – vzorek 38	50
Obr. 80: Mikrostruktura – vzorek 38, zv. 50x	51
Obr. 81: Mikrostruktura – vzorek 38, zv. 150x	51
Obr. 82: Průběh mikrotvrdosti – vzorek 38	52
Obr. 83: Makrostruktura – vzorek 42	52
Obr. 84: Detail nespojitosti B – vzorek 42, zv. 10x	53
Obr. 85: Průběh mikrotvrdosti – vzorek 42	53
Obr. 86: Makrostruktura – vzorek 56	53
Obr. 87: Trhliny a póry - vzorek 56, zv. 10x	54
Obr. 88: Průběh mikrotvrdosti – vzorek 56	54
Obr. 89: Makrostruktura – vzorek B	55
Obr. 90: Póry a trhliny - vzorek B, zv. 10x	55
Obr. 91: Průběh mikrotvrdosti – vzorek B	56

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

C_c	ekvivalentní uhlík	[%]
d	průměr vtisku (zkouška tvrdosti dle Brinella)	[mm]
D	průměr kuličky (zkouška tvrdosti dle Brinella)	[mm]
F	zatěžující síla (zkoušky tvrdosti)	[N]
h	hloubka závaru	[mm]
s	tloušťka svařovaného materiálu	[mm]
T_p	teplota přehřevu	[°C]
u	střední uhlopříčka vtisku (zkouška tvrdosti dle Vickerse)	[mm]
v	výška návaru	[mm]
w	šířka návaru	[mm]
Z	zředění	[%]
θ	úhel smáčivosti	[°]

SEZNAM TABULEK

	Str.
Tabulka 1: Chemické složení materiálu OK TIGROD 16.95 [12].	13
Tabulka 2: Základní vlastnosti navařených vrstev [3, 37].	20
Tabulka 3: Přehled základních typů laserů [43].	22
Tabulka 4: Rozdělení plynových laserů [21, 41].	23
Tabulka 5: Chemické složení oceli 1.2885 [53].	25
Tabulka 6: Chemické složení materiálu Castolin 6225 PL.	43
Tabulka 7: Souhrnná tabulka základních geometrických parametrů návarů.	57
Tabulka 8: Souhrnné porovnání použitých technologií navařování.	58

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Příručka pro volbu teploty přehřevu – BÖHLER Edelstahl GmbH [60]
Příloha 2: Protokoly z měření mikrotvrdosti.

Príloha 1: Příručka pro volbu teploty předehřevu – BÖHLER Edelstahl GmbH [60]

SCHWEISSEN IM
WERKZEUGBAU



BÖHLER Marke	Normbezeichnung	Werkzeugzustand	Schweißmethode	Schweißzusatzwerkstoff	Härte reines Schweißgutes	Vorwärmtemperatur	Abkühlung	Wärmebehandlung	Bemerkungen
BÖHLER W300 BÖHLER W302	1.2343 X38CrMoV5-1 1.2344 X40CrMoV5-1	Weichgeglüht	LHS ¹⁾	UTP 73 G2 UTP 73 G3 UTP 73 G4	55 HRc 45 HRc 40 HRc	350 – 400 °C	²⁾	Weichglühen	Unmittelbar nach dem Schweißen weichglühen bei 850 °C in geschützter Atmosphäre. Anschließend im Ofen abkühlen und 10 °C/h bis 650 °C dann an Luft legen.
BÖHLER W303	1.2367 X38CrMoV5-3	Weichgeglüht	LHS ¹⁾	UTP 73 G2 UTP 73 G3 UTP 73 G4	55 HRc 45 HRc 40 HRc	350 – 400 °C	²⁾	Weichglühen	Kurze Strichraupen (ca. 50 – 60 mm) schweißen und sofort abhämmern.
BÖHLER W400 VMR* BÖHLER W403 VMR*	~1.2343 ~X37CrMoV5-1 ~1.2367 ~X38CrMoV5-3	Weichgeglüht	LHS ¹⁾	UTP 73 G2 UTP 73 G3 UTP 73 G4	55 HRc 45 HRc 40 HRc	350 – 400 °C	²⁾	Weichglühen	
BÖHLER W320	1.2365 X32CrMoV3-3	Weichgeglüht	LHS ¹⁾	UTP 73 G2 UTP 73 G3 UTP 73 G4	55 HRc 45 HRc 40 HRc	350 – 400 °C	²⁾	Weichglühen	
BÖHLER W321	~1.2885 ~X32CrMoCoV3-3-3	Weichgeglüht	LHS ¹⁾	UTP 702 UTP 750	37 – 40 HRc 48 – 52 HRc	350 – 400 °C	²⁾	Weichglühen	Unmittelbar nach dem Schweißen weichglühen bei 850 °C in geschützter Atmosphäre. Anschließend im Ofen abkühlen und 10 °C/h bis 650 °C dann an Luft legen. UTP 702: 3–4h/480 °C ausgehärtet 50 – 54 HRc.
BÖHLER W360 ISOBLOC*	Patent	Weichgeglüht	LHS ¹⁾	UTP 702 UTP 73 G2 UTP 67S	37 – 40 HRc 55 – 58 HRc 55 – 58 HRc	350 – 400 °C	³⁾	Weichglühen	Unmittelbar nach dem Schweißen weichglühen bei 850 °C in geschützter Atmosphäre. Anschließend im Ofen abkühlen und 10 °C/h bis 600 °C dann an Luft legen. UTP 702: 3–4h/480 °C ausgehärtet 50 – 54 HRc.

¹⁾ Lichtbogenhandschweißen, ²⁾ Nach dem Schweißen langsam herunterkühlen: 10 – 20 °C/h für 2 h, dann 50 °C/h, ³⁾ 20 – 40 °C/h die ersten 2 h, dann 50 °C/h

BÖHLER Marke	Normbezeichnung	Werkzeugzustand	Schweißmethode	Schweißzusatzwerkstoff	Härte reines Schweißgutes	Vorwärmtemperatur	Abkühlung	Wärmebehandlung	Bemerkungen
BÖHLER W300 BÖHLER W302	1.2343 X38CrMoV5-1 1.2344 X40CrMoV5-1	vergütet ⁴⁾	LHS ¹⁾	UTP 73 G2 UTP 73 G3 UTP 73 G4	55 HRc 45 HRc 40 HRc	400 – 450 °C	²⁾	Spannungsarmglühen: 25 °C unter letzter Anlaßtemperatur, 2 h	Kurze Strichraupen (ca. 50 – 60 mm) schweißen und sofort abhämmern.
BÖHLER W303	1.2367 X38CrMoV5-3	vergütet ⁴⁾	LHS ¹⁾	UTP 73 G2 UTP 73 G3 UTP 73 G4	55 HRc 45 HRc 40 HRc	400 – 450 °C	²⁾		
BÖHLER W400 VMR* BÖHLER W403 VMR*	~1.2343 ~X37CrMoV5-1 ~1.2367 ~X38CrMoV5-3	vergütet ⁴⁾	LHS ¹⁾	UTP 73 G2 UTP 73 G3 UTP 73 G4	55 HRc 45 HRc 40 HRc	400 – 450 °C	²⁾		
BÖHLER W320	1.2365 X32CrMoV3-3	vergütet ⁴⁾	LHS ¹⁾	UTP 73 G2 UTP 73 G3 UTP 73 G4	55 HRc 45 HRc 40 HRc	400 – 450 °C	²⁾		
BÖHLER W321	~1.2885 ~X32CrMoCoV3-3-3	vergütet ⁴⁾	LHS ¹⁾	UTP 702 UTP 750	37 – 40 HRc 48 – 52 HRc	400 – 450 °C	²⁾	Spannungsarmglühen: 25 °C unter letzter Anlaßtemperatur, 2 h	Kurze Strichraupen (ca. 50 – 60 mm) schweißen und sofort abhämmern. UTP 702: 3–4h/480 °C ausgehärtet 50 – 54 HRc
BÖHLER W360 ISOBLOC*	Patent	vergütet ⁴⁾	LHS ¹⁾	UTP 702 UTP 73 G2 UTP 67S	37 – 40 HRc 55 – 58 HRc 55 – 58 HRc	400 – 450 °C	³⁾		

¹⁾ Lichtbogenhandschweißen, ²⁾ Nach dem Schweißen langsam herunterkühlen: 10 – 20 °C/h für 2 h, dann 50 °C/h, ³⁾ 20 – 40 °C/h die ersten 2 h, dann 50 °C/h,

⁴⁾ vergütet = gehärtet und angelassen

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v

Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a

Technická 198/2, 616 69

Vzorek : Návar TIG

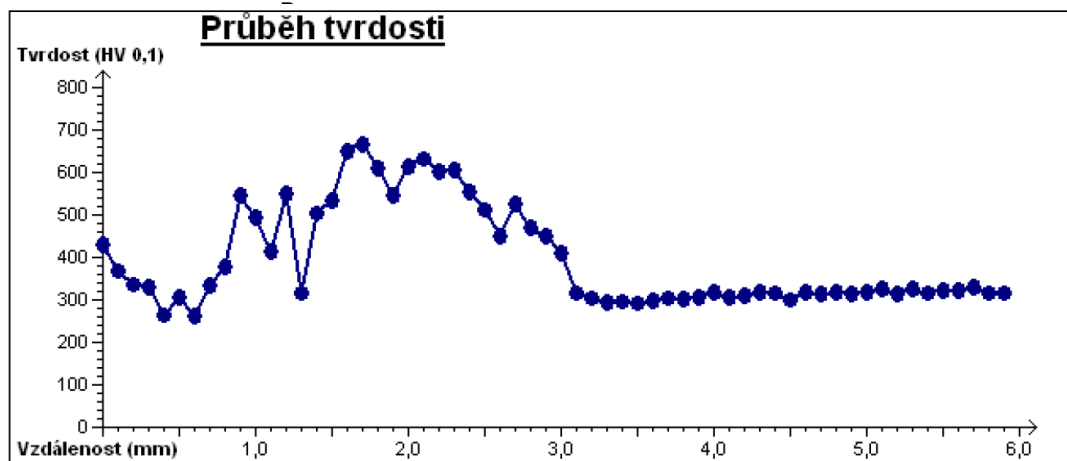
Datum : 4.6.2020

Objed. číslo :

Měřil :

Indentor : VICKERS Objektiv : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1



Řada 1							
Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1				
1	0.000	429 HV 0,1	-	22	2.100	632 HV 0,1	-
2	0.100	368 HV 0,1	-	23	2.200	603 HV 0,1	-
3	0.200	336 HV 0,1	-	24	2.300	606 HV 0,1	-
4	0.300	330 HV 0,1	-	25	2.400	555 HV 0,1	-
5	0.400	264 HV 0,1	-	26	2.500	512 HV 0,1	-
6	0.500	305 HV 0,1	-	27	2.600	450 HV 0,1	-
7	0.600	263 HV 0,1	-	28	2.700	526 HV 0,1	-
8	0.700	333 HV 0,1	-	29	2.800	469 HV 0,1	-
9	0.800	379 HV 0,1	-	30	2.900	450 HV 0,1	-
10	0.900	545 HV 0,1	-	31	3.000	411 HV 0,1	-
11	1.000	493 HV 0,1	-	32	3.100	316 HV 0,1	-
12	1.100	414 HV 0,1	-	33	3.200	304 HV 0,1	-
13	1.200	550 HV 0,1	-	34	3.300	295 HV 0,1	-
14	1.300	316 HV 0,1	-	35	3.400	296 HV 0,1	-
15	1.400	504 HV 0,1	-	36	3.500	292 HV 0,1	-
16	1.500	535 HV 0,1	-	37	3.600	297 HV 0,1	-
17	1.600	651 HV 0,1	-	38	3.700	304 HV 0,1	-
18	1.700	667 HV 0,1	-	39	3.800	302 HV 0,1	-
19	1.800	611 HV 0,1	-	40	3.900	306 HV 0,1	-
20	1.900	545 HV 0,1	-	41	4.000	318 HV 0,1	-
21	2.000	615 HV 0,1	-	42	4.100	305 HV 0,1	-
				43	4.200	309 HV 0,1	-
				44	4.300	317 HV 0,1	-
				45	4.400	316 HV 0,1	-
				46	4.500	300 HV 0,1	-
				47	4.600	317 HV 0,1	-
				48	4.700	313 HV 0,1	-
				49	4.800	317 HV 0,1	-
				50	4.900	315 HV 0,1	-
				51	5.000	319 HV 0,1	-
				52	5.100	325 HV 0,1	-
				53	5.200	314 HV 0,1	-
				54	5.300	326 HV 0,1	-
				55	5.400	316 HV 0,1	-
				56	5.500	323 HV 0,1	-
				57	5.600	321 HV 0,1	-
				58	5.700	329 HV 0,1	-
				59	5.800	316 HV 0,1	-
				60	5.900	316 HV 0,1	-

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v

Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a

Technická 198/2, 616 69

Vzorek : Návar mikroplazma

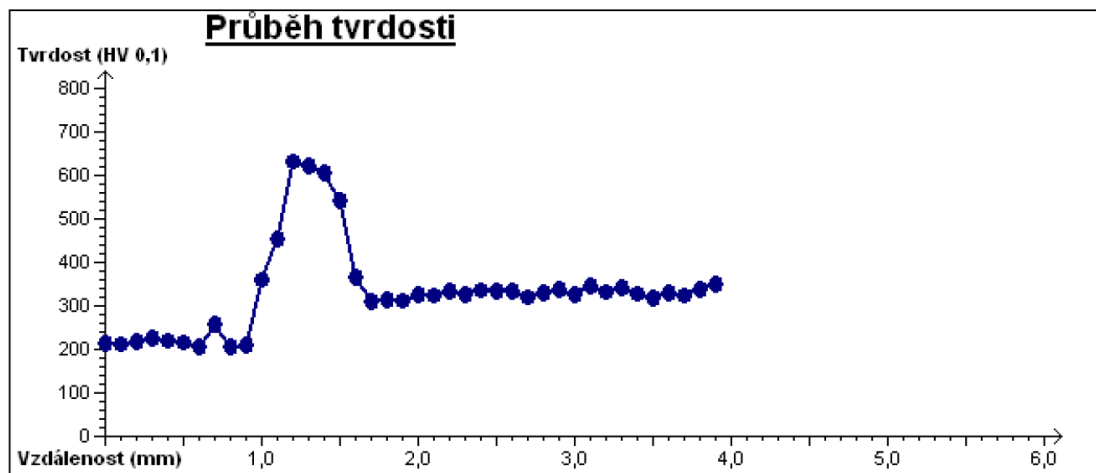
Datum : 4.6.2020

Objed. číslo :

Měřil :

Indentor : VICKERS Objektiv : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1



Řada 1							
Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1				
1	0.000	213 HV 0,1	-	22	2.100	324 HV 0,1	-
2	0.100	212 HV 0,1	-	23	2.200	335 HV 0,1	-
3	0.200	217 HV 0,1	-	24	2.300	327 HV 0,1	-
4	0.300	227 HV 0,1	-	25	2.400	336 HV 0,1	-
5	0.400	220 HV 0,1	-	26	2.500	335 HV 0,1	-
6	0.500	216 HV 0,1	-	27	2.600	335 HV 0,1	-
7	0.600	205 HV 0,1	-	28	2.700	320 HV 0,1	-
8	0.700	257 HV 0,1	-	29	2.800	329 HV 0,1	-
9	0.800	206 HV 0,1	-	30	2.900	339 HV 0,1	-
10	0.900	209 HV 0,1	-	31	3.000	326 HV 0,1	-
11	1.000	360 HV 0,1	-	32	3.100	346 HV 0,1	-
12	1.100	455 HV 0,1	-	33	3.200	332 HV 0,1	-
13	1.200	632 HV 0,1	-	34	3.300	341 HV 0,1	-
14	1.300	623 HV 0,1	-	35	3.400	328 HV 0,1	-
15	1.400	606 HV 0,1	-	36	3.500	318 HV 0,1	-
16	1.500	542 HV 0,1	-	37	3.600	330 HV 0,1	-
17	1.600	365 HV 0,1	-	38	3.700	324 HV 0,1	-
18	1.700	311 HV 0,1	-	39	3.800	339 HV 0,1	-
19	1.800	315 HV 0,1	-	40	3.900	349 HV 0,1	-
20	1.900	312 HV 0,1	-				
21	2.000	325 HV 0,1	-				

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v

Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a
Technická 198/2, 616 69

Vzorek : Laser - drát

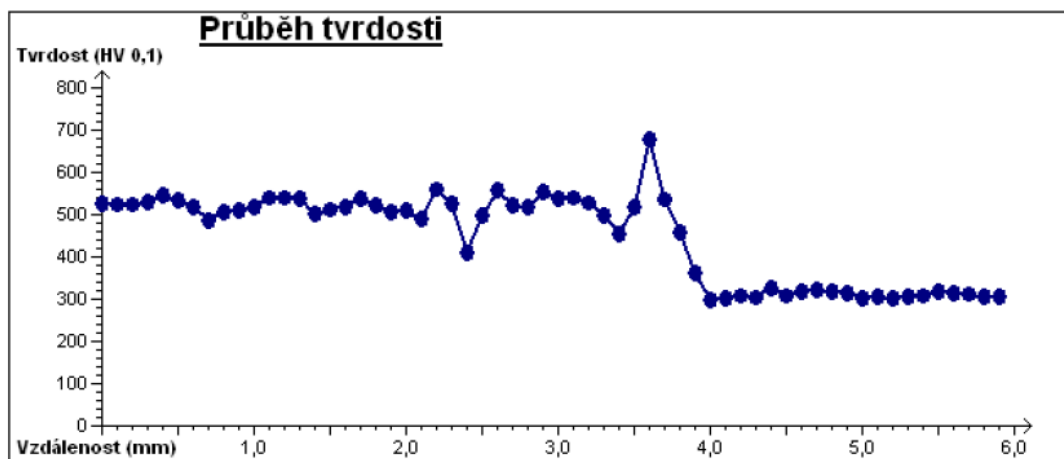
Datum : 4.6.2020

Objed. číslo :

Měřil :

Indentor : VICKERS Objektiv : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1



Řada 1

Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1
1	0.000	526 HV 0,1	-
2	0.100	524 HV 0,1	-
3	0.200	524 HV 0,1	-
4	0.300	529 HV 0,1	-
5	0.400	545 HV 0,1	-
6	0.500	533 HV 0,1	-
7	0.600	519 HV 0,1	-
8	0.700	487 HV 0,1	-
9	0.800	506 HV 0,1	-
10	0.900	510 HV 0,1	-
11	1.000	519 HV 0,1	-
12	1.100	540 HV 0,1	-
13	1.200	540 HV 0,1	-
14	1.300	538 HV 0,1	-
15	1.400	501 HV 0,1	-
16	1.500	512 HV 0,1	-
17	1.600	519 HV 0,1	-
18	1.700	538 HV 0,1	-
19	1.800	521 HV 0,1	-
20	1.900	506 HV 0,1	-
21	2.000	510 HV 0,1	-

22	2.100	489 HV 0,1	-
23	2.200	560 HV 0,1	-
24	2.300	526 HV 0,1	-
25	2.400	410 HV 0,1	-
26	2.500	497 HV 0,1	-
27	2.600	557 HV 0,1	-
28	2.700	522 HV 0,1	-
29	2.800	517 HV 0,1	-
30	2.900	553 HV 0,1	-
31	3.000	538 HV 0,1	-
32	3.100	540 HV 0,1	-
33	3.200	528 HV 0,1	-
34	3.300	499 HV 0,1	-
35	3.400	455 HV 0,1	-
36	3.500	517 HV 0,1	-
37	3.600	677 HV 0,1	-
38	3.700	536 HV 0,1	-
39	3.800	459 HV 0,1	-
40	3.900	361 HV 0,1	-
41	4.000	299 HV 0,1	-
42	4.100	303 HV 0,1	-
43	4.200	308 HV 0,1	-
44	4.300	304 HV 0,1	-
45	4.400	327 HV 0,1	-
46	4.500	308 HV 0,1	-
47	4.600	319 HV 0,1	-
48	4.700	321 HV 0,1	-
49	4.800	317 HV 0,1	-
50	4.900	315 HV 0,1	-
51	5.000	303 HV 0,1	-
52	5.100	307 HV 0,1	-
53	5.200	301 HV 0,1	-
54	5.300	307 HV 0,1	-
55	5.400	308 HV 0,1	-
56	5.500	318 HV 0,1	-
57	5.600	315 HV 0,1	-
58	5.700	312 HV 0,1	-
59	5.800	305 HV 0,1	-
60	5.900	307 HV 0,1	-

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v

Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a
Technická 198/2, 616 69

Vzorek : Laser prášek – vzorek 1

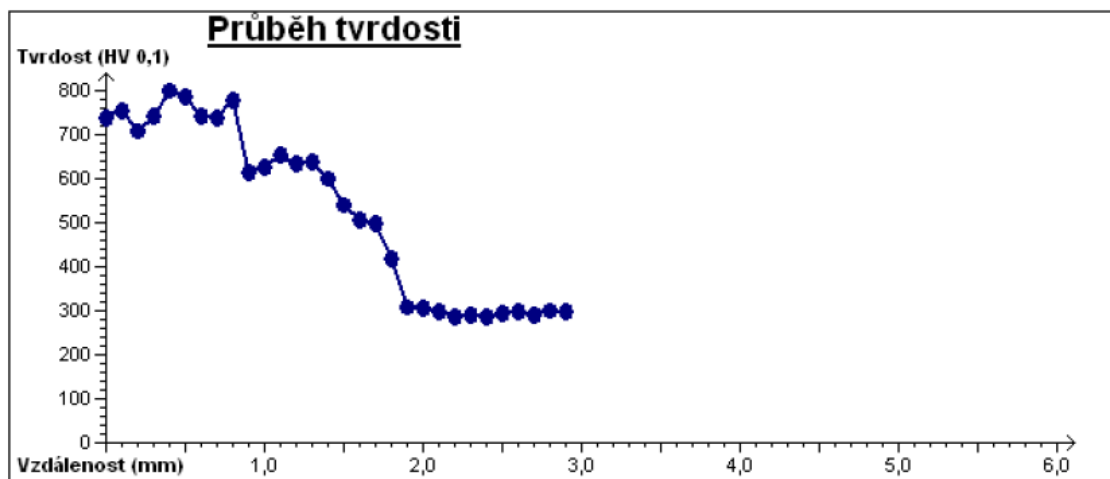
Datum : 4.6.2020

Objed. číslo :

Měřil :

Indentor : VICKERS Objektiv : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1



Řada 1

Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1
1	0.000	739 HV 0,1	-
2	0.100	754 HV 0,1	-
3	0.200	708 HV 0,1	-
4	0.300	742 HV 0,1	-
5	0.400	818 HV 0,1	-
6	0.500	787 HV 0,1	-
7	0.600	742 HV 0,1	-
8	0.700	738 HV 0,1	-
9	0.800	778 HV 0,1	-
10	0.900	614 HV 0,1	-
11	1.000	626 HV 0,1	-
12	1.100	654 HV 0,1	-
13	1.200	635 HV 0,1	-
14	1.300	638 HV 0,1	-
15	1.400	600 HV 0,1	-
16	1.500	540 HV 0,1	-
17	1.600	506 HV 0,1	-
18	1.700	497 HV 0,1	-
19	1.800	419 HV 0,1	-
20	1.900	308 HV 0,1	-
21	2.000	306 HV 0,1	-

22	2.100	298 HV 0,1	-
23	2.200	287 HV 0,1	-
24	2.300	290 HV 0,1	-
25	2.400	287 HV 0,1	-
26	2.500	294 HV 0,1	-
27	2.600	299 HV 0,1	-
28	2.700	291 HV 0,1	-
29	2.800	300 HV 0,1	-
30	2.900	297 HV 0,1	-

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a
Technická 198/2, 616 69

Vzorek : Laser prášek – vzorek 2

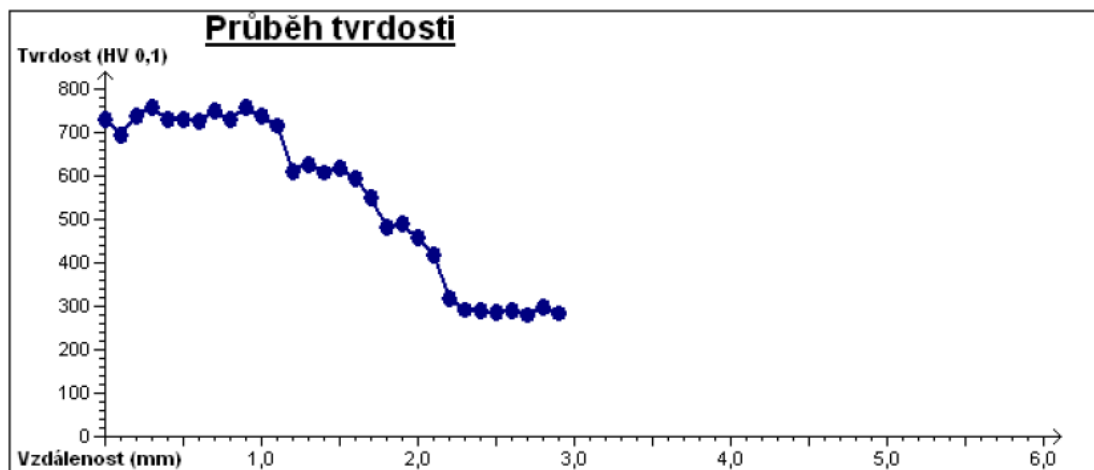
Datum : 4.6.2020

Objed. číslo :

Měřil :

Indentor : VICKERS Objektív : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1



Řada 1

Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1
1	0.000	731 HV 0,1	-
2	0.100	695 HV 0,1	-
3	0.200	739 HV 0,1	-
4	0.300	758 HV 0,1	-
5	0.400	731 HV 0,1	-
6	0.500	731 HV 0,1	-
7	0.600	727 HV 0,1	-
8	0.700	750 HV 0,1	-
9	0.800	731 HV 0,1	-
10	0.900	758 HV 0,1	-
11	1.000	738 HV 0,1	-
12	1.100	716 HV 0,1	-
13	1.200	611 HV 0,1	-
14	1.300	626 HV 0,1	-
15	1.400	608 HV 0,1	-
16	1.500	617 HV 0,1	-
17	1.600	594 HV 0,1	-
18	1.700	550 HV 0,1	-
19	1.800	482 HV 0,1	-
20	1.900	489 HV 0,1	-
21	2.000	457 HV 0,1	-

22	2.100	419 HV 0,1	-
23	2.200	319 HV 0,1	-
24	2.300	292 HV 0,1	-
25	2.400	291 HV 0,1	-
26	2.500	285 HV 0,1	-
27	2.600	290 HV 0,1	-
28	2.700	280 HV 0,1	-
29	2.800	297 HV 0,1	-
30	2.900	284 HV 0,1	-

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v

Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a

Technická 198/2, 616 69

Vzorek : Mikronavařování - vzorek 38

Datum : 4.6.2020

Objed. číslo :

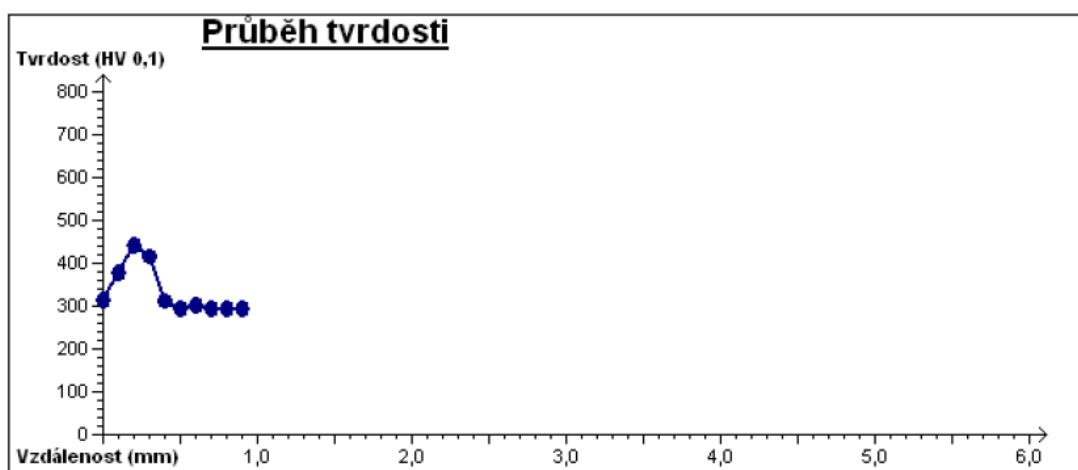
Měřil :

Indentor : VICKERS Objektiv : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1

Material:

Předpis:



Řada

1

Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1
1	0.000	315 HV 0,1	-
2	0.100	379 HV 0,1	-
3	0.200	443 HV 0,1	-
4	0.300	416 HV 0,1	-
5	0.400	312 HV 0,1	-
6	0.500	294 HV 0,1	-
7	0.600	303 HV 0,1	-
8	0.700	294 HV 0,1	-
9	0.800	293 HV 0,1	-
10	0.900	294 HV 0,1	-

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v

Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a

Technická 198/2, 616 69

Vzorek : Mikronavařování - vzorek 42

Datum : 4.6.2020

Objed. číslo :

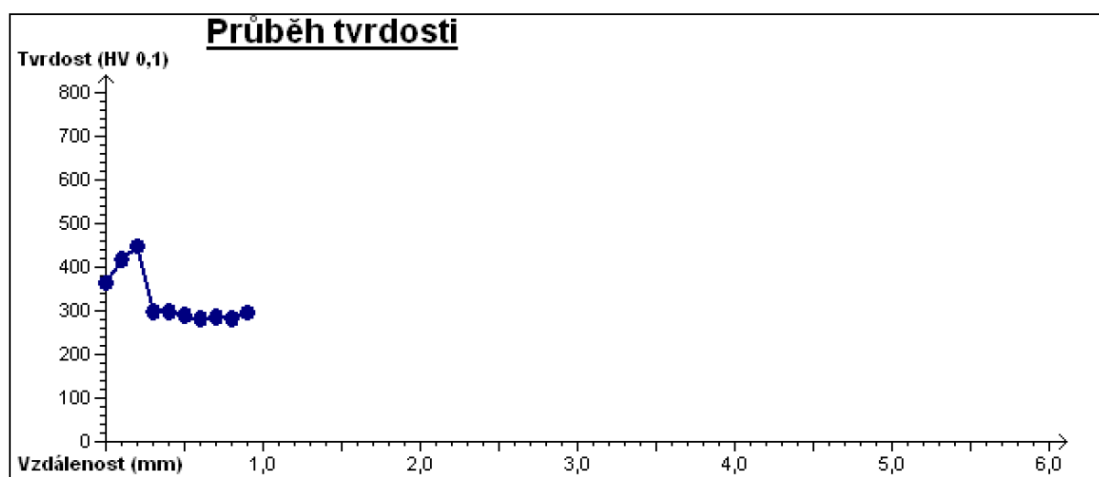
Měřil :

Indentor : VICKERS Objektiv : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1

Material:

Předpis:



Řada 1

Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1
1	0.000	364 HV 0,1	-
2	0.100	417 HV 0,1	-
3	0.200	448 HV 0,1	-
4	0.300	298 HV 0,1	-
5	0.400	299 HV 0,1	-
6	0.500	289 HV 0,1	-
7	0.600	281 HV 0,1	-
8	0.700	285 HV 0,1	-
9	0.800	283 HV 0,1	-
10	0.900	296 HV 0,1	-

PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v

Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a

Téchnická 198/2, 616 69

Vzorek : Mikronavařování - vzorek 56

Datum : 4.6.2020

Objed. číslo :

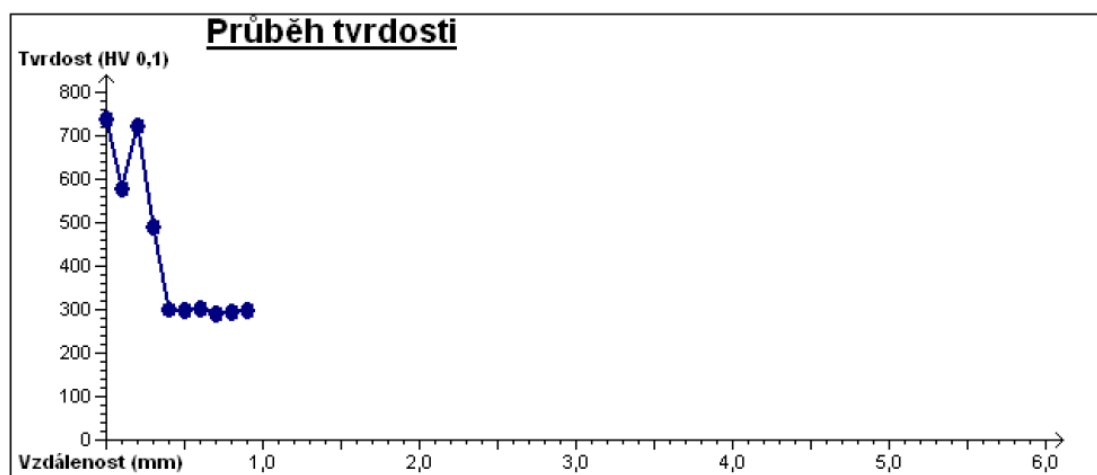
Měřil :

Indentor : VICKERS Objektív : X100

Čas : 10 Zatížení : 0,1

Material:

Předpis:



Řada

1

Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1
1	0.000	738 HV 0,1	-
2	0.100	578 HV 0,1	-
3	0.200	723 HV 0,1	-
4	0.300	491 HV 0,1	-
5	0.400	300 HV 0,1	-
6	0.500	297 HV 0,1	-
7	0.600	303 HV 0,1	-
8	0.700	291 HV 0,1	-
9	0.800	293 HV 0,1	-
10	0.900	298 HV 0,1	-

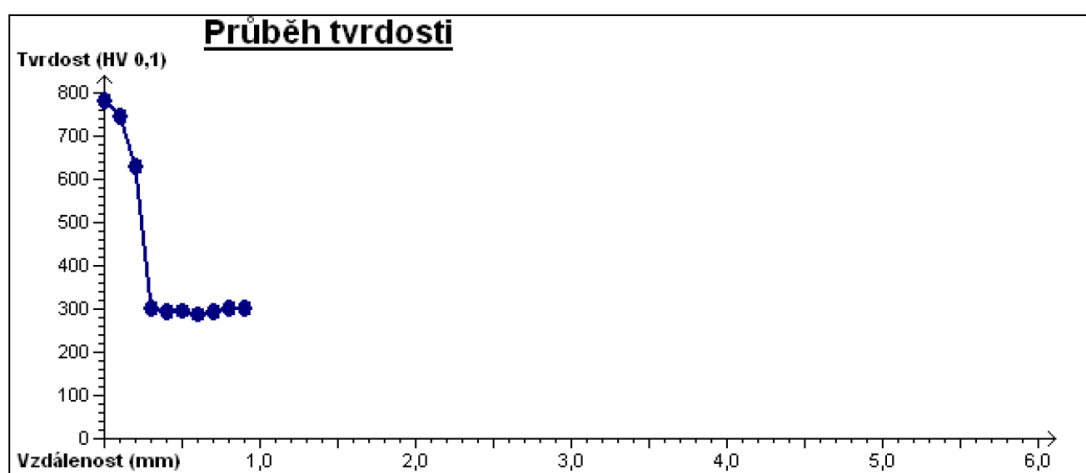
PROTOKOL MĚŘENÍ



Vysoké učení technické v
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a
Technická 198/2, 616 69

Vzorek : Mikronavařování - vzorek B
Datum : 4.6.2020
Objed. číslo :
Měřil :
Indentor : VICKERS Objektiv : X100
Čas : 10 Zatížení : 0,1

Material:
Předpis:



Řada 1			
Bod	Vzdálenost	Tvrdost	Přep. tvrdosti 1
1	0.000	783 HV 0,1	-
2	0.100	747 HV 0,1	-
3	0.200	629 HV 0,1	-
4	0.300	301 HV 0,1	-
5	0.400	295 HV 0,1	-
6	0.500	296 HV 0,1	-
7	0.600	288 HV 0,1	-
8	0.700	293 HV 0,1	-
9	0.800	302 HV 0,1	-
10	0.900	303 HV 0,1	-