

Využití diodového laseru pro povrchové kalení uhlíkové oceli

Bc. Zbyněk Macháček

Diplomová práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

| | |
|-------------------|---|
| Jméno a příjmení: | Bc. Zbyněk Macháček |
| Osobní číslo: | T21781 |
| Studijní program: | N3909 Procesní inženýrství |
| Studijní obor: | Výrobní inženýrství |
| Forma studia: | Prezenční |
| Téma práce: | Využití diodového laseru pro povrchové kalení uhlíkové oceli |

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše se zaměřením na povrchové tepelné zpracování.
2. Příprava zkušebních těles za využití diodového laseru při různých mírách jeho překrytí.
3. Měření vlastností povrchové vrstvy v závislosti na proměnných parametrech laseru.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků a jejich diskuze.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

STEEN, William M. a Jyotimoy MAZUMDER. Laser Material Processing [online]. 4th. London: Springer London, 2010. ISBN 978-1-84996-061-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-84996-062-5

TOTTEN, George E., ed. *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*. Second edition. Boca Raton: CRC, Taylor & Francis, Taylor & Francis Group, [2007], 833 s. ISBN 9780849384554.

KATAYAMA, Seiji. Fundamentals and Features of Laser Welding. In: KATAYAMA, Seiji. Fundamentals and Details of Laser Welding [online]. Singapore: Springer Singapore, 2020. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. ISBN 978-981-15-7932-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-15-7933-2_3

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Bednařík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce zkoumá vliv velikosti překrytí laserových drah při povrchovém kalení diodovým laserem na výsledné mechanické vlastnosti uhlíkové oceli EN C45. Teoretická část pojednává o využití laserových technologií v průmyslu a dále se zaměřuje na využití laseru v oblasti tepelného zpracování kovových materiálů. Poté se více zaměřuje na využití laseru při povrchovém kalení. V závěru teoretické části je popsána problematika kalení ocelí. V praktické části je popsána příprava zkušebních vzorků laserovým kalením a průběh jednotlivých zkoušek s následným vyhodnocením naměřených výsledků.

Klíčová slova: Laser, laserové technologie, kalení laserem, povrchové kalení, mikrotvrdość, uhlíková ocel, vliv překrytí

ABSTRACT

The thesis investigates the influence of the size of the overlap of the laser paths during diode laser surface hardening on the resulting mechanical properties of carbon steel EN C45. The theoretical part discusses the use of laser technology in industry and further focuses on the use of laser in the heat treatment of metallic materials. Afterwards, it focuses more on the use of laser in surface hardening. The theoretical part concludes with a description of the quenching of steels. The practical part describes the preparation of test samples by laser quenching and the procedure of individual tests with the following evaluation of the measured results.

Keywords: Laser, laser technology, laser quenching, surface quenching, microhardness, carbon steel, effect of overlap

Rád bych touto formou poděkoval mému vedoucímu Ing. Martinovi Bednaříkovi, Ph.D., za cenné rady a připomínky při tvorbě této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Martinovi Ovsíkovi, Ph.D. a prof. Dr.Ing. Vladimíru Patovi za ochotu a výpomoc při měření zkušebních vzorků.

Dále bych chtěl poděkovat Davidovi Viznarovi z firmy Kovomont Přerov za umožnění využití kalíčího centra.

Závěrem bych chtěl poděkovat své rodině a kamarádům, kteří mi byli oporou jak při psaní této práce, tak při celém mém studiu.

„Ještě mi řekněte, že tam měl být citát...“

Petr Novák

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD | 8 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 9 |
| 1 VYUŽITÍ LASERU V PRŮMYSLU | 10 |
| 1.1 LASEROVÉ ŘEZÁNÍ, VRTÁNÍ A DĚROVÁNÍ..... | 11 |
| 1.2 SVAŘOVÁNÍ LASEREM..... | 14 |
| 1.3 ČISTĚNÍ POVRCHU LASEREM | 18 |
| 1.4 LASEROVÉ VYKLEPÁVÁNÍ (LASER SHOCK PEEING) | 19 |
| 1.5 TEPelnÉ ZPRACOVÁNÍ POVRCHU | 22 |
| 1.6 POVRCHOVÉ LASEROVÉ KALENÍ..... | 28 |
| 2 TEPelnÉ ÚPRAVY OCELÍ | 35 |
| 2.1 AUSTENITIZACE | 35 |
| 2.2 KALENÍ..... | 36 |
| 2.3 STRUKTURY VZNIKLÉ KALENÍM | 38 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 42 |
| 3 CÍL PRÁCE | 43 |
| 4 TESTOVANÝ MATERIÁL A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ | 44 |
| 4.1 TESTOVANÝ MATERIÁL..... | 44 |
| 4.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ | 45 |
| 5 NALEZENÍ OPTIMÁLNÍHO NASTAVENÍ VÝKONU | 48 |
| 5.2 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE | 49 |
| 5.3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH NASTAVENÍ KALÍČÍHO PROCESU | 54 |
| 5.4 NALEZENÍ OPTIMÁLNÍHO NASTAVENÍ LASERU | 55 |
| 6 VLIV PŘEKRYTÍ LASEROVÝCH PAPRSKŮ | 58 |
| 6.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO ZKOUMÁNÍ VLIVU PŘEKRYTÍ | 58 |
| 6.2 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY | 58 |
| 6.3 ZMĚNA TOPOGRAFIE POVRCHU | 64 |
| 6.4 DISKUSE VÝSLEDKŮ | 68 |
| ZÁVĚR | 69 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 70 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 74 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 76 |
| SEZNAM TABULEK | 78 |

ÚVOD

V dnešním vysoko konkurenčním prostředí se firmy snaží optimalizovat pracovní postupy za účelem snížení výrobních nákladů nebo za účelem tvorby kvalitnějšího produktu. Jednou z možností, jak tohoto dosáhnout, je využívat nekonvenční technologie pro výrobu nebo zpracování součástí. Velmi široké uplatnění v rámci nekonvenčních technologií nachází laserový paprsek, jehož záření generované laserovým zdrojem může být absorbováno téměř všemi technickými materiály. Tento paprsek lze díky optickým členům velmi snadno tvarovat a zároveň řídit jeho výkon a délku působení. Díky tomu lze laserové technologie využít u velkého množství výrobních procesů, jako je řezání, vrtání, svařování, tepelné zpracování, texturování povrchu, značení, nanášení materiálu a aditivní výroba.

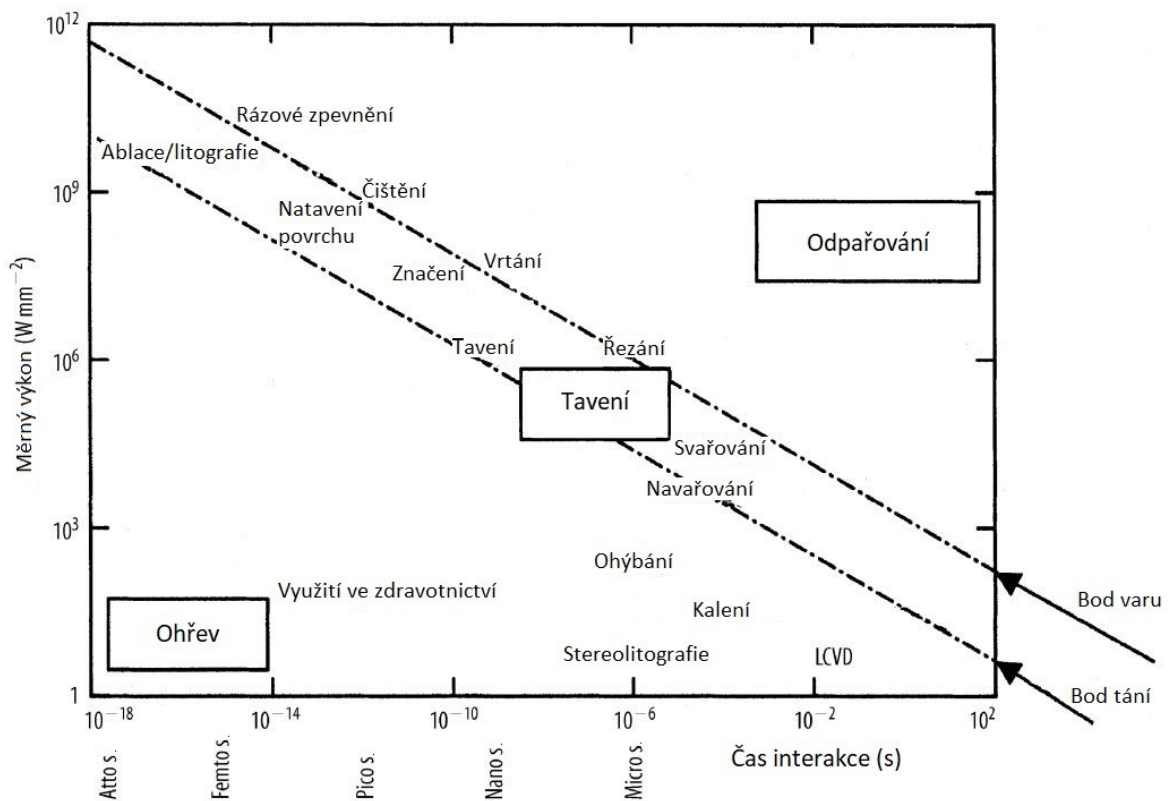
Tato práce je zaměřena na povrchové kalení laserem, kdy laserový paprsek byl použit k ohřevu kalené součásti. Jedná se o velmi moderní metodu umožňující ohřev pouze v požadovaných místech, takže nedochází k tepelnému ovlivnění součásti tam, kde to není nutné. Dále se zde na rozdíl od konvenčních metod kalení nevyužívá kalícího média, jelikož materiál je ochlazen odvodem tepla dovnitř zpracovávaného materiálu. Díky tomu se jedná o velmi efektivní a rychlou metodu povrchového kalení.

V praktické části byl zkoumán vliv velikosti překrytí kalících drah, neboť volba strategie pohybu kalící hlavičky má významný vliv na výsledné mechanické vlastnosti takto zpracovávaného materiálu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VYUŽITÍ LASERU V PRŮMYSLU

Mezi pokročilými metodami výroby nachází obrábění pomocí laserového paprsku uplatnění ve velké řadě aplikací, jelikož generované záření může být absorbováno téměř všemi technickými materiály. Laserový paprsek lze snadno tvarovat prostorově, ale i v délce jeho působení, díky čemuž je schopen s vhodným nastavením pokrýt velkou řadu výrobních procesů, jako je řezání, vrtání, svařování, tepelné zpracování, texturování povrchu, značení, nanášení materiálu a aditivní výroba. Díky možnosti soustředit energii paprsku do velmi omezené oblasti, čímž dochází pouze k lokální modifikaci vlastností materiálu jsou tyto procesy velmi vhodné a perspektivní pro materiály citlivé na změny teploty. Laserové obrábění lze upravit tak, aby bylo možné vyrábět makro i mikro výrobky. V následujícím obrázku (Obr. 1) jsou zobrazeny jednotlivé aplikace laserového paprsku dle hustoty energie působící v místě účinku v závislosti na době působení energie svazku. [1]



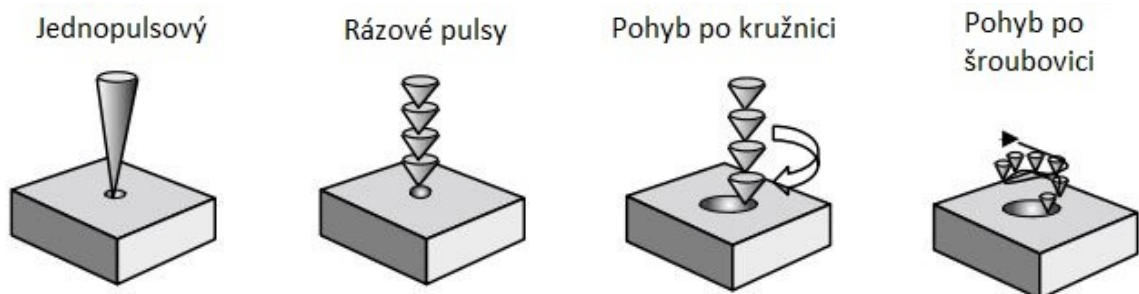
Obrázek 1. Rozložení aplikací laseru v závislosti hustoty energie na době působení. [2]

1.1 Laserové řezání, vrtání a děrování

Laserové řezání je jedním z nejrozšířenějších bezkontaktních typů řezání materiálů, jako jsou titan, nerezová ocel, hliník a jeho slitiny, a dále nekovových materiálů, například dřeva, skla, plastů, keramiky a kompozitů. Tato metoda nachází široké uplatnění, jelikož je v mnoha případech výhodnější i přesnější než konkurenční technologie. K řezu dochází pohybem zaostřeného laserového paprsku po obrobku. Jakmile je laserový paprsek absorbován, zahřívá materiál a lokálně vyvolává tavení a případně i odpařování samotného materiálu. Proud ochranného plynu, který může být inertní nebo reaktivní v závislosti na typu materiálu, je přiváděn souosým směrem s laserovým paprskem pomocí trysky. Hlavními cíli proudu plynu je vytlačit roztavený materiál za účelem vytvoření prořezu a omezit tepelné poškození obrobku nebo materiálu. Laserové řezání, vrtání a děrování využívají stejných principů a mechanismů [1-3].

1.1.1 Vrtání a děrování

Využívání laserového vrtání jako technologického procesu mělo za následek vznik čtyř hlavních metod vrtání, díky kterým je možno dosáhnout rychlé a kvalitní tvorby děr s dobrou opakovatelností celého procesu. Při jednopulsovém vrtání dochází k přímé tvorbě otvoru a zároveň i k jeho dokončení. Při rázovém vrtání dochází k vyslání více pulsů energie do stejné oblasti bez pohybu obrobku. Pokud je paprsek otáčen po obvodu otvoru, dochází k řezání obráběného materiálu. V případě pohybu paprsku po šroubovici dochází ke změně ohniska po základně otvoru směrem dolů, tedy je v tomto případě paprsek vždy dobře fokusován. V následujícím obrázku (Obr. 2) jsou znázorněny jednotlivé styly vrtání pomocí laserového paprsku [1,2].



Obrázek 2. Rozdílné metody vrtání pomocí laseru [2].

Mezi hlavní výhody tvorby děr pomocí laseru patří:

- vysoká rychlost vrtání,
- možnost do určité míry kontrolovat tvorbu otřepů,
- lze zpracovávat jakýkoliv materiál, který absorbuje záření bez ohledu na jeho tvrdost,
- lze vytvářet díry pod libovolným úhlem.

Problematika, se kterou se při optimalizace tvorby děr laserem nejčastěji setkáváme:

- zvýšení rychlosti,
- snížení kuželovitosti.
- odstranění nebo minimalizace zpevněné, tepelně ovlivněné vrstvy na stěně otvoru,
- vrtání skrze povlakovaný materiál,
- vrtání otvorů s vysokým poměrem hloubky ku průměru [2,3].

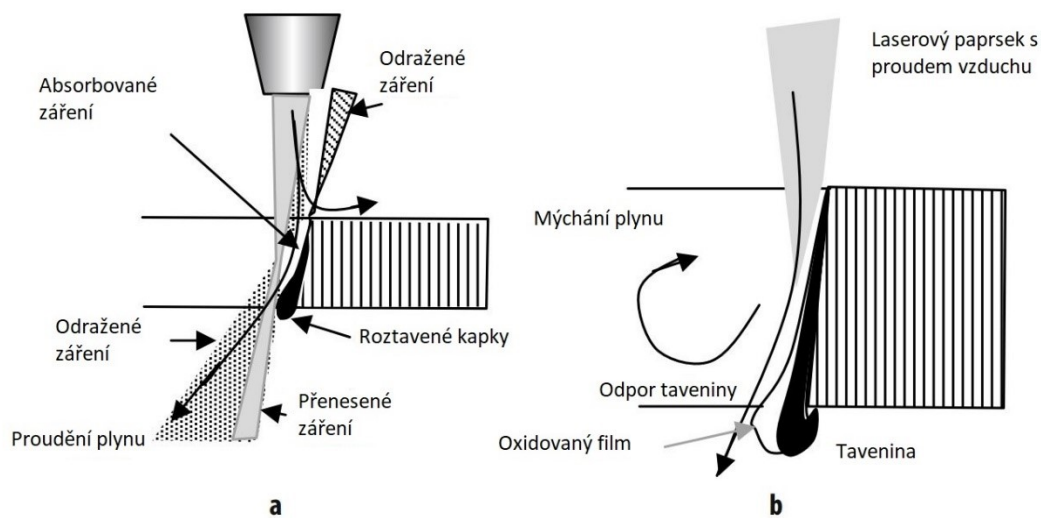
1.1.2 Řezání

Proces laserového řezání je v naprosté většině případů procesem nastavovacím a má pozoruhodný počet aplikací v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu, při stavbě lodí a při výrobě materiálů. Proces laserového řezání lze využít k dělení široké škály materiálů, tj. výrobků z kovů, plastů, keramiky a různých výrobků z kompozitních materiálů. Pro co nejlepší řezný účinek je vhodné spárovat správný laserový zdroj a opracováváný materiál. Každý typ laseru generuje laserový paprsek o určité vlnové délce; CO₂ laser má vlnovou délku 10,6 mm a Nd: YAG laser 1,06 mm [3].

Řezání laserovým paprskem lze rozdělit do tří základních skupin:

1. Sublimační – materiál je v důsledku působení laserové energie převeden do plynného stavu a dojde k jeho odpaření.
2. Tavné – materiál je roztaven a pomocí asistenčního plynu odfouknut z místa řezu. Tato metoda se zejména uplatňuje u nekovových materiálů.
3. Pálením – materiál se pomocí paprsku ohřeje na zápalnou teplotu. Po přivedení reaktivního plynu dojde k exotermické reakci a dojde k shoření odstraňovaného materiálu. Vzniklá struska je z místa řezu odstraněna pomocí asistenčního plynu [4].

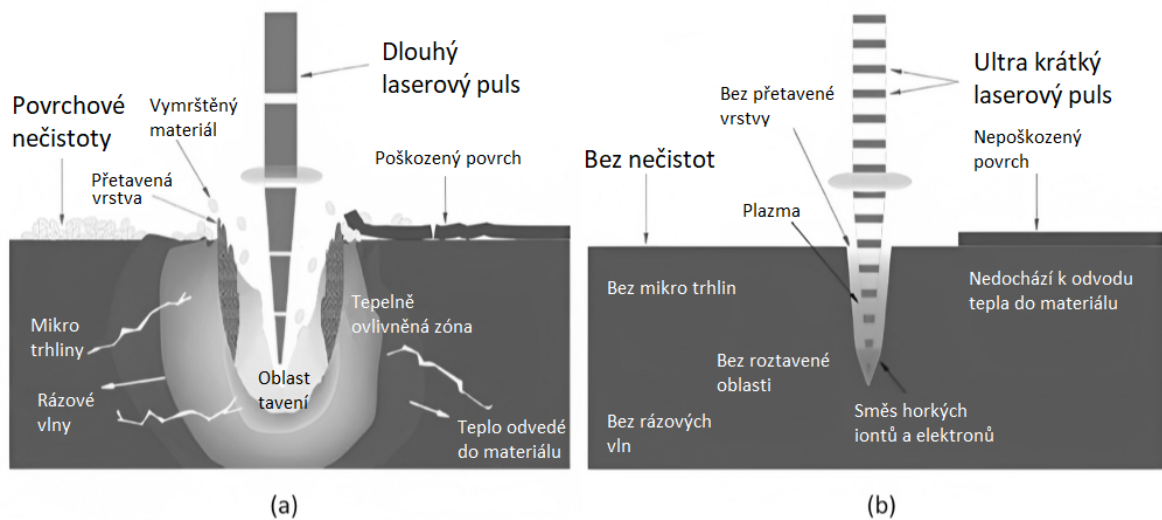
K samotnému řezu dochází tak, že paprsek dorazí na povrch a většina z něj projde do otvoru nebo prořezu. Část paprsku se může odrazit od neroztaveného povrchu a část je absorbována přímo do materiálu. V případě, že je opracovávaný materiál dostatečně tenký, tak při nízkých rychlostech dochází k tavení hranou paprsku a většina paprsku prochází skrze materiál prořezem, aniž by došlo ke kontaktu zbylého paprsku s opracovávaným materiálem. Na následujícím obrázku (Obr. 3) je zobrazen princip řezu v řezné rovině a samotný průběh řezání laserovým paprskem, kdy dochází k pohlcování části energie paprsku, díky čemuž dochází k tavení obráběného materiálu [2-4].



Obrázek 3. Interakce na čele řezu: a) optický přenos energie, b) přenos hmoty a pohybového momentu [2].

Řezání pomocí laseru nachází také uplatnění při výrobě makro a mikro součástí. Autoři Biffi et al. se ve své studii [1] zabývali tvorbou stentů z NiTi slitin s tvarovou pamětí pro vyztužení tepen v lidském těle s pomocí laserového řezání. NiTi slitiny s tvarovou pamětí jsou velmi citlivé na změny teploty, proto mohou nejdůležitější parametry procesu laserového řezání, jako je délka pulzu a vlnová délka záření, významně ovlivnit vedení tepla a následně kvalitu řezné hrany. Použitím ultrakrátkých laserových pulsů nebo hybridních procesů, jako je řezání laserovým paprskem vedeným vodním paprskem a řezáním pod kapalinou, lze výrazně zlepšit kvalitu výrobků. Na následujícím obrázku (Obr. 4) lze vidět rozdíly v použití dlouhého a krátkého laserového pulsu. Při využití dlouhého pulsu se materiál při zahřívání taví, což má za následek vznik tepelně ovlivněné zóny, trhlin, oxidace a dalších vad. Naopak vysoké výkony s velmi krátkými pulzy (v řádech femtosekund) mají za následek přímé odpařování materiálu bez jeho předchozího tavení. Tato výhoda je pro laserové zpracování klíčová, protože energie je natolik

koncentrovaná, že odstraní pouze malé části materiálu a vlivem krátkého působení pulze nedochází k odvádění tepla do materiálu v okolí obráběného dílu [1].



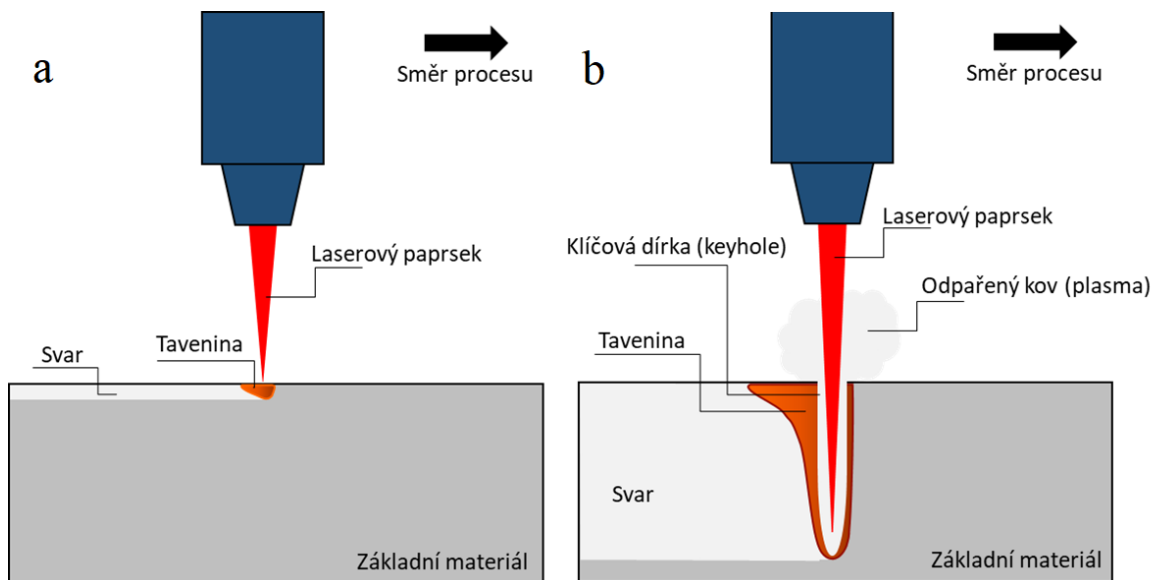
Obrázek 4. Tepelná interakce s materiálem: a) využití dlouhého laserového pulsu, b) využití krátkého laserového pulsu [1].

1.2 Svařování laserem

Laserové svařování patří mezi bezkontaktní metody svařování, což má obrovskou výhodu vůči klasickým metodám, jako jsou MIG a TIG, jelikož u nich dochází k opotřebení funkčních zařízení, jako jsou svařovací elektrody, trysky, hubice atd. Díky tomu je svařování laserem procesem s vysokou reprodukovatelností, což je velmi vhodné při velkosériových výrobách a při velmi přesné výrobě [5].

Při laserovém svařování jsou možné dva výrobní režimy v závislosti na hustotě výkonu laseru:

1. svařování v režimu klíčové dírky (hluboké svařování), které se provádí při vysokých hustotách výkonu (obvykle nad 10^6 W/cm^2) a vyznačuje se silným odpařováním a dutinou,
2. svařování v režimu kondukčního svařování s nízkými hustotami výkonu [6].



Obrázek 5. a) princip indukčního svařování, b) princip hlubokého svařování [7].

Konduktivní svařování

Při konduktivním svařování (svařování vedením tepla) dochází k natavení plechu podél spojované oblasti, promíchání roztaveného materiálu a jeho ochlazením za vzniku svaru. Při této metodě nedochází ke vzniku žádné velké tepelně ovlivněné zóny. Vytvořený svar je hladký a bez pórů a nevyžaduje žádnou následnou úpravu. Tato metoda se používá především pro svařování tenkostěnných plechů. Maximální hloubka svaru je 1 mm. Hloubka svaru je omezena tepelnou vodivostí materiálu. Pokud není odvod tepla dostatečný, teplota zpracování stoupne nad teplotu vypařování materiálu a kov se začne vypařovat, čímž se hloubka svařování mnohonásobně zvýší. Při takovém nárůstu hloubky svařování se již jedná o hluboké svařování.

Hluboké svařování

Laserový paprsek je nasměrován na povrch svařovaného předmětu, kde způsobí roztavení a odpaření kovu v místě dopadu. Roztavený materiál je výpary vytlačován ven, čímž vzniká úzký, hluboký otvor (tzv. klíčová díрка). Roztavený kov obtéká klíčovou dírkou a tuhne po stranách, čímž vzniká hluboký, úzký svar. Vznikající pára je ionizovaná a nazývá se plazma. Tato plazma absorbuje energii laseru, čímž zvyšuje účinnost zpracování materiálu. Hloubka svaru může dosahovat až desetinásobku šířky svaru [6,7].

1.2.1 Využití laserového svařování při tvorbě hybridních kovově-polymerních struktur

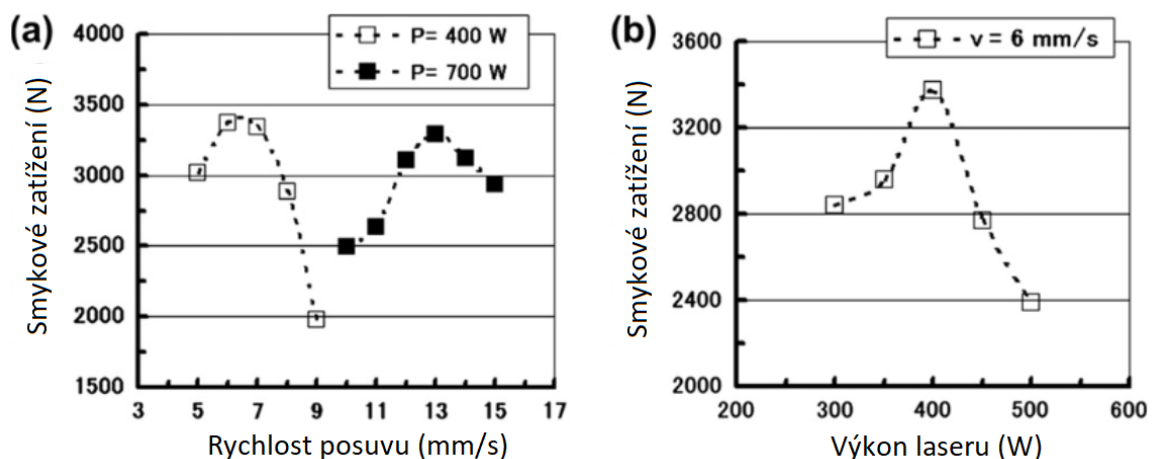
Při svařování plastů dochází ke vzniku nerozebíratelného spoje dvou nebo více dílů, během kterého dochází ke zániku nebo částečnému zániku povrchového rozhraní. Spoj vzniká

natavením stykových ploch s následným působením tlaku. Pro kvalitní svar je potřeba dosáhnout těsného kontaktu povrchu, aby se makromolekuly dostatečně přiblížily a tím se projevíly mezimolekulární síly. Pro rychlý nárůst pevnosti svaru je důležité vzájemné mísení mikroobjemů povrchových vrstev.

Obecně se laserové svařování v závislosti na schopnosti polymeru propouštět světlo a schopnosti kovu vést teplo dělí na dva typy:

- transmisivní laserové spojování (LTJ),
- kondukční laserové spojování (LCJ).

Pro použití metody LTJ musí být polymerní kompozit vysoce transparentní pro použitou vlnovou délku laseru, aby bylo možné oblast spoje přímo zaměřit a zahřát laserovým zářením skrze polymerní kompozit a vyvarovat se případnému poškození polymerního materiálu. Při metodě LCJ se laserovým zářením působí na netransparentní oblast, obvykle kovová součást a teplo se přenáší vedením přes objemový materiál až do místa spojení. U tohoto způsobu je účinnost celého procesu velmi závislá na tloušťce kovu a jeho schopnosti vést a pohlcovat teplo [8]. V této oblasti bylo v posledních letech publikováno několik zajímavých studií [9-14], které byly primárně zaměřeny na možnosti tvorby hybridních struktur za využití laserového svařování.



Obrázek 6. Výsledky tahových zkoušek spojů CFRP s pozinkovanou ocelí provedených za různých podmínek spojování [9].

Autoři Jung et al. se ve své práci [9] zabývali problematikou tvorby hybridních spojů polymerů s kovovými materiály. Přímé laserové svařování (LTJ) polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny s pozinkovanou ocelí bylo provedeno působením paprsku diodového laseru ve tvaru čáry přímo působícím na kov. Tímto způsobem vznikl plátovaný svarový spoj. Smyková zkouška prokázala vznik pevného plátového spoje s nosností přibližně

3300 N. V polymerní části došlo k vytvoření široké roztavené zóny, v níž nepravidelně vzniklo mnoho malých (menších než 1 mm) bublinek uvnitř celé zóny vlivem teploty nad tepelným rozkladem základního polymeru a také velkým množstvím tepla vedeným uhlíkovými vlákny. Roztavený polymer proudil drážkami, které vznikly částečným lomem pozinkované vrstvy, což naznačuje možnost vzniku silného mechanického spojení. Ke svaru došlo spojením na atomární nebo molekulové úrovni mezi roztaveným polymerem a nanometrovou vrstvou oxidu zinečnatého na povrchu pozinkované vrstvy. Navíc část zinku v roztaveném polymeru a malé množství uhlíku a kyslíku v pozinkované vrstvě naznačuje možnost vzniku chemické vazby mezi oxidem zinečnatým a oxidem uhlíku nebo hydridem. Toto potvrzuje, že lze vytvořit vysokopevnostní spoj polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny s pozinkovanou ocelí díky silné vazbě mezi roztaveným polymerem a oxidem zinečnatým pomocí přímého laserového svařování [9].

Autoři Cheon a Na ve své práci [10] zjistili, že krystalická struktura, primární struktura, chemické vazby a konformace polymerních řetězců mají významný vliv na pevnost spoje kovu a polymeru. V polymerním materiálu se během procesu spojování mohou tvořit bubliny. K jejich tvorbě dochází odpařováním zbytkových molekul monomeru nebo přísad. Tyto bubliny mohou zesílit nebo zeslabit spoje v závislosti na jejich velikosti. Pokud jsou dostatečně velké, tak do vzniklých „děr“ vteče roztavený kovový materiál a po zchladnutí dojde k vytvoření mechanického spoje [10].

Csizér et al. [11] s pomocí laserového svařování spojili celulózou vyztužené PMMA a ocel. Celulózová vlákna snižovala průhlednost PMMA i při nízkých hmotnostních procentech, což mělo za následek nárůst obtížnosti i časové náročnosti transmisivního svařování (tj. laserový paprsek prochází polymerním materiálem). Vzniklý svar byl tuhý, ale během svařování došlo k degradaci PMMA. Během přímého svařování (laserový paprsek neprochází polymerním materiálem) došlo ve většině případů ke vzplanutí polymeru. Takto vzniklý svar měl malou pevnost [11].

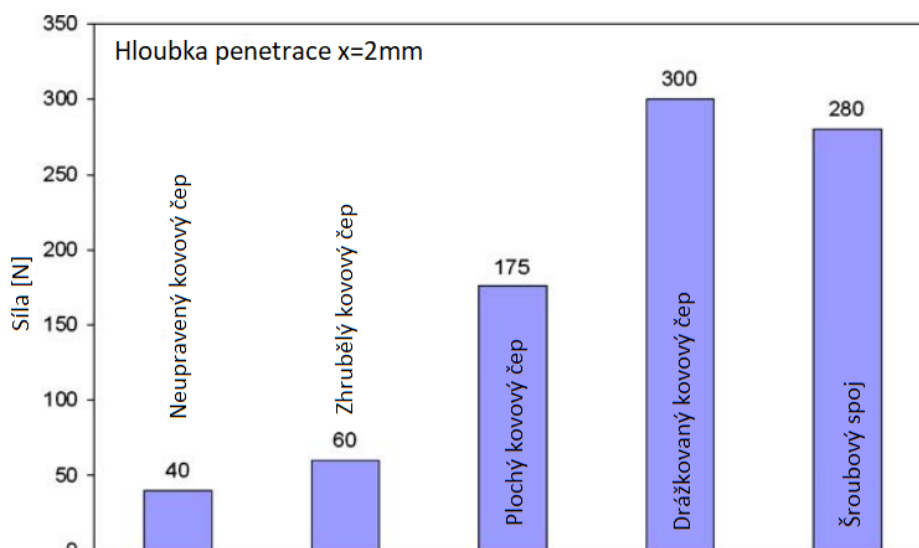
Autoři Huang et al. ve své studii [12] zaměřené na svařování PMMA s nerezovou ocelí došli k podobnému závěru, kdy ke vzniku nejpevnějšího hybridního spoje došlo pomocí chemických vazeb (M-O, M-C) a mechanického spojení vzniklým proděním roztaveného polymeru v pórech nerezové oceli [12].

Nově vyvinutý proces laserového svařování LIFTEC® (Laser-Induced Fusion TEChnology) slouží k vytvoření svaru mezi průhledným, nebo alespoň průsvitným polymerem s kovem nebo keramikou. Proces spočívá v ohřevu kovové nebo keramické součásti laserovým paprskem, který prochází přes polymerní část. Kovová (keramická)

součástka se poté lisuje do polymerního dílu, který zahřívá vedením tepla. Kovový díl pronikne do polymerní součásti poté, co polymerní díl dosáhne dostatečné plasticity.

Důležitým aspektem pro tuto technologii je, aby součástka spojovaná s polymerem měla podstatně vyšší bod tání. Výsledkem tohoto procesu je těsný a pevný spoj [13].

Práce autorů Holtkamp et al. [14] se zaměřila na testování technologie LIFTEC® při svařování nerezové oceli s POM, kde je podle článku hlavním parametrem procesu spojování teplota ohřevu. Výsledná mez pevnosti spoje závisí na geometrii kovové součásti. Podle druhu drážkování povrchu kovové součásti lze dosáhnout únosnosti 300 až 700 N v závislosti na hloubce drážek. Kromě toho pevnost a kvalita spoje závisí také na optické průhlednosti. Zatímco vysoké teploty vedou k bublinám nebo změně barvy, při nízkých teplotách může docházet k trhlinám. Při využití mikrostrukturovaných kovových vzorků vznikne při spojování i mechanický spoj a tím dojde ke vzniku spojení s dostatečnou pevností ve smyku [14].



Obrázek 7. Mez pevnosti v závislosti na povrchové úpravě kovu [14].

1.3 Čistění povrchu laserem

Tato metoda spočívá v rychlém ohřevu nečistot na povrchu materiálu. U nečistot (ve většině případů se jedná o korozi) dojde ke změně skupenství a dojde k jejich sublimaci. Laserové záření neproniká do hloubky matečního materiálu a tím nedochází k jeho teplotnímu ovlivňování. K odstranění nečistot dochází beze změn vnitřní struktury původního materiálu. Tato metoda nachází široké uplatnění, jelikož je velmi jednoduchá, šetrná, všestranná, snadná na údržbu a je poměrně levná [15].

Mechanismus čištění různých nečistot se liší. U nečistot typu povrchových částic dochází k jejich odstranění z povrchu vlivem jejich tepelné roztažnosti vyvolané působením laserového záření. V tomto případě čistící síla částic souvisí přímo s energií laseru a dobou trvání pulzu. Čím větší byl průměr částice, tím bylo jednodušší ji odstranit. U organických olejů a tuků bylo s pomocí vláknového laseru zjištěno, že tepelná energie laseru je absorbována především do základního materiálu. Následně tímto teplem vyvolaná rychlá expanze s odpařením části materiálu měla za následek vymrštění filmu nečistot do aerosolových kapiček nebo přímo do drobných částic, které bylo možné jednoduše zamést z povrchu pryč [16].

Touto technologií lze odstranit z povrchu nečistoty, ale i povrchové vrstvy. Pro odstranění povrchových vrstev s využitím jiných technologií je mnohdy potřeba využít kombinací dvou či více metod. Při působení laseru se z povrchu (obvykle kovového) odstraní také vrstva oxidu. Oproti konvenčním metodám čištění není potřeba využívat chemikálie a různá brusiva. Laserový systém je tedy šetrnější k životnímu prostředí než konvenční metody čištění [17].

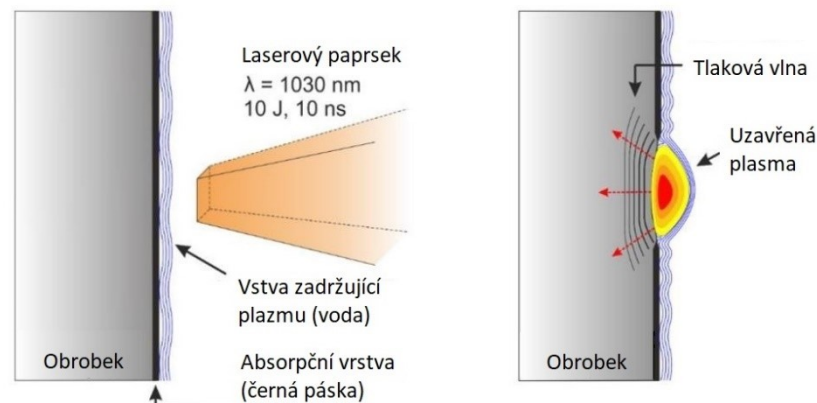


Obrázek 8. Princip laserového čištění [17].

1.4 Laserové vyklepávání (Laser shock peening)

Laser shock peening (LSP) neboli laserové vyklepávání je proces, který využívá vysokoenergetické nanosekundové laserové pulsy k vytvoření vnitřního tlakového zbytkového napětí v materiálech, a to s účinkem až do hloubky 2 mm. Před dopadem laserový puls pronikne tenkou vrstvou vody a dochází k ablaci absorpční vrstvy (ve většině případů se jedná o černou lepicí pásku) pokrývající povrch materiálu, u kterého tento proces probíhá. V místě působení laserového pulsu vzniká rychle expandující plazma. Díky krycímu efektu vodní vrstvy, která působí jako bariéra, dochází k posilujícímu účinku, čímž tlak, vzniklý expanzí plazmatu dosahuje velikosti až několika GPa.

Tlaková vlna proniká materiálem a způsobuje plastickou deformaci vrchní vrstvy materiálu, což má za následek vznik zbytkového tlakového napětí. Hloubka a velikost tlakového napětí závisí hlavně na hustotě výkonu laserového pulsu, typu materiálu a jeho tloušťce. Na následujícím obrázku (Obr. 9) je schematicky znázorněn princip vzniku rázové vlny působící na opracovávaný materiál. [18-21].



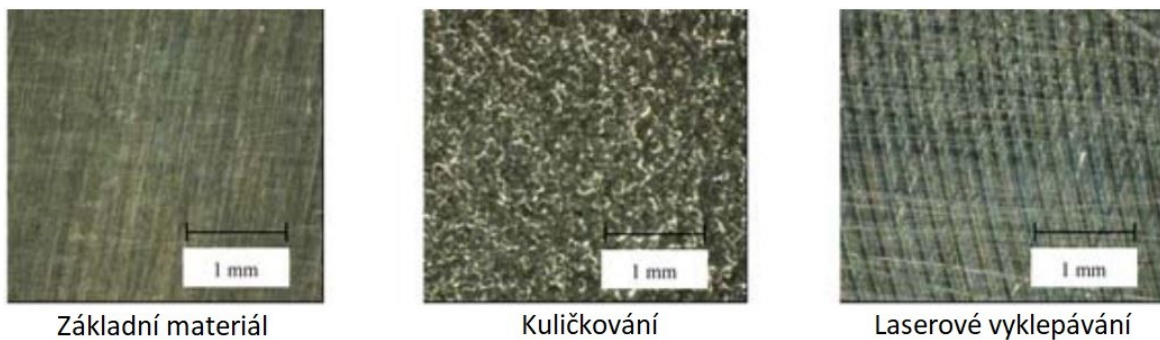
Obrázek 9. Princip laserového vyklepávání [22].

Laserové vyklepávání je technologie sloužící především ke zvýšení meze únavy materiálu. Jedná se o dokončovací metodu sloužící ke zvýšení životnosti součástek, které jsou cyklicky zatíženy, nebo jsou dlouhodobě vystaveny agresivnímu prostředí. Jedná se o moderní metodu nahrazující konvenční způsoby, jakými jsou například tryskání balotinou, kuličkování, válečkování a hlazení diamantem. Při využití klasických metod dochází ke zpevnění povrchu pouze do hloubky 0,2 mm, zatímco pomocí laserového vyklepávání se dosahuje hloubky větší než 1 mm. Povrch součásti se metodou LSP zpracovává pouze v předem vytipovaných místech, ve kterých je předpokládán vznik únavového lomu. Pokud by byla celá součást zpracována touto metodou, pak by působící zbytkové napětí způsobilo deformaci součásti. Větší tloušťka takto získané vrstvy brání lépe šíření mikrotrhlin, díky čemuž lze dosáhnout několikanásobného zvýšení životnosti materiálu než při využití běžných postupů zpevnění povrchu. [20,21].

Autoři Xinlei et al. ve své práci [23] zkoumali účinky využití metody laserového vyklepávání při nižší hodnotě hustoty výkonu laseru na únavové vlastnosti tenkostěnné součásti vyrobené z hliníkové slitiny AA7075. Zkušební vzorek měl tloušťku okolo 4 mm. Na základě měření mechanických vlastností a mikrostrukturních pozorování prokázali, že technologie LSP je schopna dosáhnout zlepšení i při nižší hustotě výkonu laseru ($1,8 \text{ GW/cm}^2$). U zkušebních vzorků z hliníkové slitiny s neporušeným povrchem bylo dosaženo nárůstu meze únavy při cyklickém namáhání o 20 %. U vzorků, které byly

opatřeny trhlinou došlo k nárustu o 37 %. Standartní nastavení hustoty výkonu laseru by sice mělo za následek mnohem výraznější zvýšení meze únavy při cyklickém namáhání, ale také by vedlo k deformaci tenkostěnných součástí [23].

Autoři Hatamleh et al. zkoumali rozdíly v povrchové drsnosti při využití kuličkování nebo laserového vyklepávání pro získání vyšší únavové odolnosti. Při využití metody LSP byla naměřená hodnota Ra více než 2,5krát nižší než v případě kuličkování (Obr. 10) [24].



Obrázek 10. Porovnání drsností při zpevnění povrchu [24].

Tabulka 1. Hodnoty drsnosti po zpevnění povrchu [24].

| Povrch | Ra [μm] | Rt [μm] |
|-------------|----------------------|----------------------|
| Neupraven | 0,38 | 5,94 |
| Kuličkování | 7,59 | 73,7 |
| LSP | 2,88 | 20,6 |

1.5 Tepelné zpracování povrchu

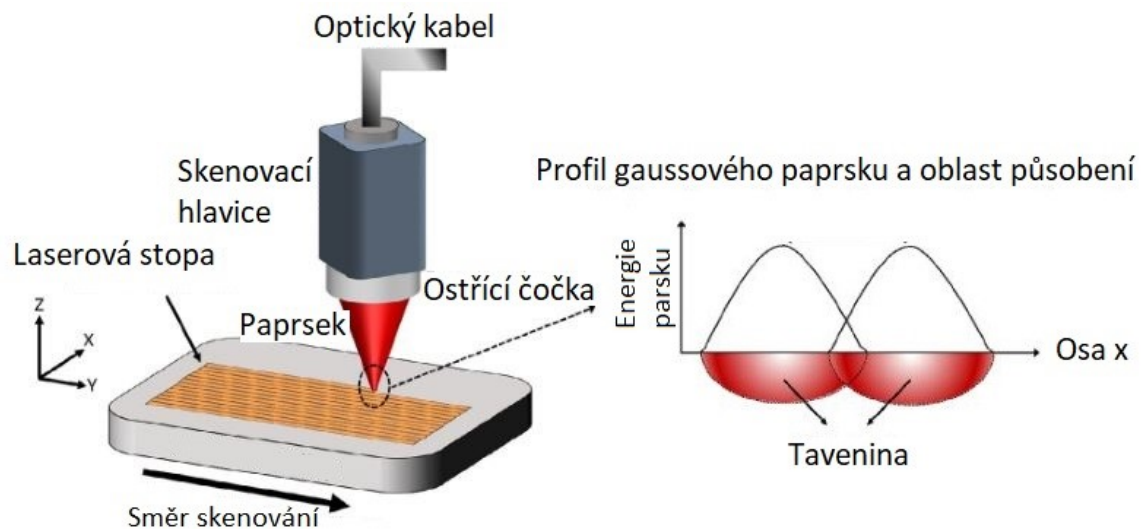
Cílem tepelného zpracování je dodat materiálu potřebné technologické, mechanické, nebo jiné vlastnosti, které způsobí nárůst životnosti výsledných součástí, a to beze změny tvaru výrobku. Vlastnosti získané tepelným zpracováním jsou zvýšení tvrdosti, odolnosti vůči teplotě, tažnosti a pevnosti. Tyto změny vlastností jsou dosaženy prostřednictvím řízené přeměny mikrostruktury materiálu v pevném skupenství. Proces tepelného zpracování se skládá z tří hlavních fází, a to ohřevu na požadovanou teplotu, výdrží na této teplotě a následným ochlazováním. Doba trvání a hodnoty teplot vyskytujících se během těchto tří fází mají velký vliv na výsledek tepelného zpracování. Dosažené změny vlastností materiálu jsou dále závislé na počátečním chemickém složení původního materiálu, popřípadě na chemickém složení jeho povrchové vrstvy [25,26].

Laserový paprsek je díky svým vlastnostem vhodný jako zdroj ohřevu povrchu materiálu. Elektromagnetické záření je u neprůhledných materiálů absorbováno v atomech povrchu materiálu. Díky této vlastnosti nedochází k rozptylování záření mimo opticky definovanou oblast působení paprsku. Energie laserového paprsku lze tedy aplikovat přesně na předem určené místo, tedy nedochází k ohřevu oblastí, kde není potřeba danou součást zakalit. Výhody laserového paprsku při tepelném zpracování obecně jsou:

- chemická čistota,
- teplo je dopraveno pouze do požadovaných míst,
- lze řídit hloubku ohřevu, a tedy i teplotní deformaci,
- lze kontrolovat tepelný profil, tedy i tvar a umístění tepelně ovlivněné zóny,
- bezkontaktní proces,
- snadná automatizace celého procesu [2].

1.5.1 Laserové natavování povrchu

Při této technologii dochází k tavení povrchu, který následně přejde opět do pevného skupenství. Při této fázové změně dojde uvnitř materiálu ke změnám morfologie i tvaru zpracovaného materiálu. Objemové zpracování a modifikace povrchu, lokální změny složení nebo fázová transformace, lze díky laserovému paprsku provádět s vysokou přesností a dobrou kontrolou celého procesu. Vysoká hustota energie dosažená laserovým paprskem, soustředěným na velmi malou plochu, umožňuje efektivní využití energie k modifikaci materiálu s krátkou dobou expozice. Na následujícím obrázku (Obr. 11) je znázorněn princip laserového natavování povrchu. Princip samotný je velmi podobný například laserovému kalení, kdy ale u kalení nedochází k natavení horní vrstvy materiálu [27,28].

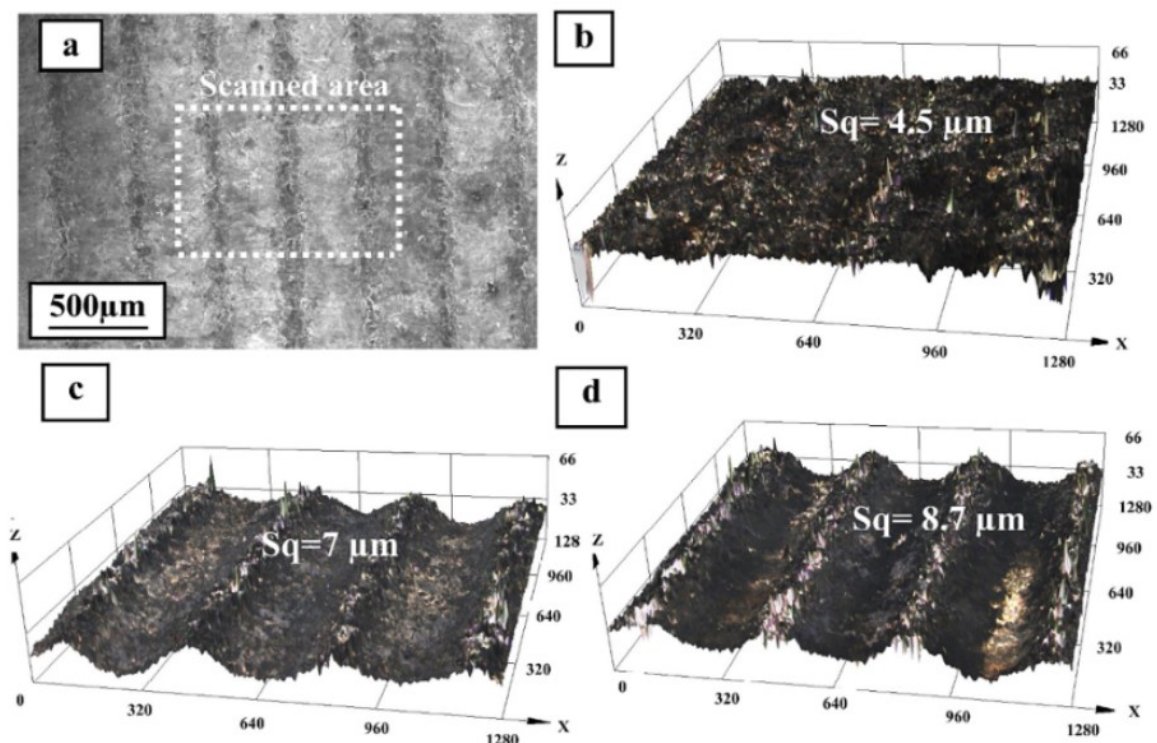


Obrázek 11. Princip laserového natavování povrchu [28].

Hlavní důvody, proč není tato metoda hojně využívána v klasickém průmyslu:

- Pokud je nutné využít povrchového natavení, je mnohem výhodnější využít metody povrchového legování, jelikož se jedná o velmi podobný proces, ale nabízí možnost dosažení výrazně vyšší tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a protikorozních vlastností.
- Velmi vysoká tvrdost dosažená využitím této metody u litin a nástrojových ocelí je spojena s drobnými změnami povrchu způsobenými vlivem vysoké teploty. Z tohoto důvodu je po použití této technologie nutné provést dodatečné povrchové úpravy. Samotné provedení dodatečné povrchové úpravy je komplikováno dosaženou tvrdostí materiálu [2].

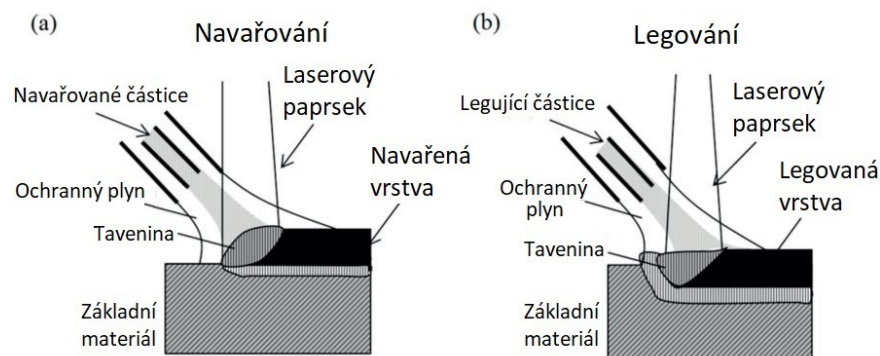
Aktuální výzkum v oblasti využití laserového tavení povrchu zkoumá především využití této technologie pro zpracování hořčíkových slitin sloužících převážně pro výrobu zdravotnických implantátů. Autoři Rakesh et al. [29] zkoumali vliv natavování povrchu slitiny Mg-Zn-Dy na výslednou smáčivost. V práci došli k závěru, že při využití laserového natavení povrchu došlo k nárůstu stupně homogenizace se zjemněním zrn v řádu mikrometrů v důsledku rychlého cyklu zahřívání a ochlazování. Zvýšení hustoty energie laseru mělo za následek jemnější mikrostrukturu a hloubka tavené oblasti se zvýšila z 98 μm na 150 μm . Došlo také k nárůstu smáčivosti díky zdrsnění povrchu pomocí natavení povrchu, změně složení a mikrostruktury v laserem modifikovaných zónách. S rostoucí hustotou energie se drsnost povrchu vzorků zvýšila ze 4,5 μm na 8,7 μm . Nárůst drsnosti povrchu ovlivňuje povrchovou energii a při nižší hustotě energie (12,5 J/mm^2) byla pozorována maximální povrchová energie 26 mN/m . V případě laserem natavených a vyleštěných vzorků zpracovaných při stejné hustotě energie (12,5 J/mm^2) však byla pozorována hodnota povrchové energie 36 mN/m . Dále díky zmenšení velikosti zrn v zóně taveniny došlo k nárůstu velikosti hranic zrn. Tato homogenita chemického složení měla také za následek zlepšení smáčivosti [29].



Obrázek 12. Morfologie povrchu laserem tavených vzorků: a) Snímaná oblast
b) 12,5 J/mm^2 c) 25 J/mm^2 d) 45 J/mm^2 [29].

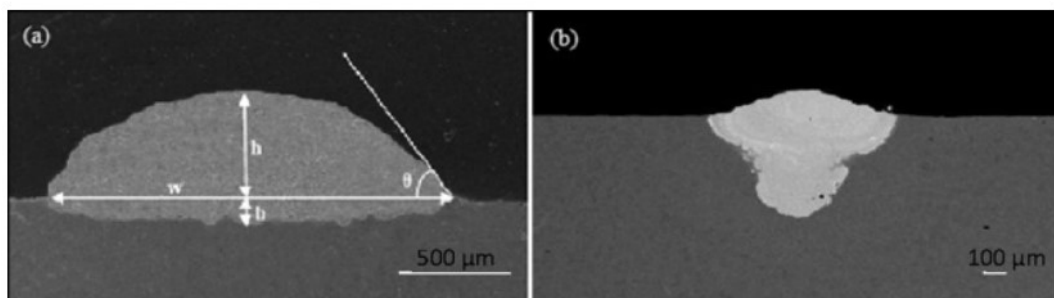
1.5.2 Laserové povrchové legování a navařování

Jedná se o technologie, které nacházejí své uplatnění v případě požadavku na úplnou změnu povrchových vlastností v porovnání se základním materiálem. Dále tyto metody nacházejí uplatnění při vývoji nových materiálů, materiálových kombinací nebo při opravách povrchových vad. Jedná se o technologie zpracování materiálu, při nichž se na povrch základního materiálu řízeným způsobem přidává další materiál (popřípadě více materiálů, slitin atd.) za účelem zlepšení nebo změny povrchových vlastností. Povrch substrátu může být povlakován nebo legován dvěma technikami, a to laserovým navařováním (LC) nebo laserovým legováním povrchu (LSA). Na následujícím obrázku (Obr. 13) lze vidět základní rozdíl v principu těchto dvou technologií, kdy při LC dochází k navaření vrstvy přídavného materiálu, což má za následek výrazné zvětšení rozměrů původní součásti, zatímco u technologie legování dochází k dodávání přísad pouze do povrchové vrstvy materiálu. Díky tomu dochází k menšímu ovlivnění tvaru součásti [30,31].



Obrázek 13. Základní princip metody a, laserového navařování
b, laserového legování [31].

Následující obrázek (Obr. 14) zobrazuje rozdíl v hloubce mísení přídavného materiálu s materiálem základním. Při LC je míchání substrátu a navařeného materiálu zanedbatelné, zatímco v případě LSA dochází k míchání substrátu a slitiny [30,31].



Obrázek 14. Snímek řezu: a) vrstvy vzniklé laserovým navařováním, b) laserem legované povrchové vrstvy [30].

Laserové povrchové legování (surface alloying)

Povrchové legování laserem je podobné laserovému povrchovému tavení s tím rozdílem, že je do taveniny přiváděn přídatný materiál. Povrchové legování laserem je také podobné povrchovému navařování v tom smyslu, že pokud je proces navařování prováděn s přebytkem výkonu, dojde během procesu i k povrchovému legování. Jedná se tedy o jeden z extrémů povrchového navařování.

Laserové legování povrchu umožňuje vyrábět širokou škálu povrchových slitin. Vysoká rychlost tuhnutí dokonce umožňuje vytvářet na povrchu některé metastabilní slitiny. To vše lze provést bezkontaktní metodou, kterou lze poměrně snadno automatizovat. Laser nabízí vysokou přesnost, dobrou přilnavost a výrazně vyšší rychlost zpracování než ostatní metody tepelně-chemické úpravy povrchů. Pokud je rychlost nižší než určitá hodnota (např. 70 mm/s pro výkon 2 kW), pak je míchání dobré a rovnoměrné. Některé slitiny při zpracování trpí praskáním a poměrně velkou pórovitostí [2].

Jedná se o velmi dobrou metodu povlakování různých tvarů a může prodloužit životnost dílu o šest až sedm let. Tato metoda může také minimalizovat množství základního materiálu rozpouštěného a míseného s přídatným materiálem během procesu, což umožňuje, aby si povlakové materiály zachovaly co nejvíce ze svých původních vlastností. Povlak lze nanášet různými způsoby, ale jako nejběžnější se k povlakování využívá vrstva o tloušťce přibližně 100 mikronů. Tato tloušťka totiž nevyžaduje příliš mnoho energie k roztavení. Přídatný materiál lze také nanášet ve formě prášku, který se průběžně přivádí na základní materiál před laserový paprsek [32].

Laserové navařování (laser cladding)

Laserové plátování využívá vysokou hustotu energie laseru k roztavení základního materiálu a přídatného materiálu ve formě prášku, drátu nebo pasty. Proces plátování vytváří úzkou oblast mezi aditivním materiálem a základním kovem, kde dochází k metalurgickému spojení obou materiálů. Cílem laserového plátování je vytvořit na výchozím substrátu povlak požadovaných vlastností a chemického složení, aniž by došlo k výraznému promíchání obou kovů (> 10 %). Míra promíchání ovlivňuje výsledné vlastnosti vytvořeného návaru [30].

Do procesu laserového navařování jsou zapojeny různé metody zpracování, které rozhodujícím způsobem ovlivňují kvalitu výsledného povlaku.

Existují čtyři různé metody laserového navařování:

1. souosé dávkování prášku,
2. předem umístěná vrstva prášku,
3. mimosové podávání prášku,
4. doprava materiálu v podobě drátu [30,33].

Při souosém dávkování prášku se materiál pro plátování posílá přímo na laserový paprsek. Dopravení prášku a proces navaření se dokončí ještě v atmosféře ochranného plynu. Využití metody s předem umístěnou vrstvou prášku vyžaduje předběžné umístění přídavného materiálu na povrch obrobku. Prášek a podkladová vrstva materiálu se poté roztaví pomocí působení laserového záření. Při využití metody mimosových systémů podávání prášku je prášek dodáván přímo na obrobek a mezi trubicí pro podávání prášku a osou laserového paprsku je předem stanovená vzdálenost. Metoda dopravy materiálu v podobě drátu využívá podávacího systému, v němž je prášek nahrazen drátem o průměru přibližně 1 mm. [33]

Hustota, tloušťka a rovnoměrnost dávkování přídavného materiálu mají významný vliv na vlastnosti vzniklého povlaku. Zvolená pojiva musí navíc během velmi krátké doby zaschnout, jinak jsou přídavné materiály ve formě prášku odfouknuty ochranným plynem. Kromě toho změna směru zpracování u mimoosých systémů podávání prášku a podávání drátu ovlivňuje množství uvolňovaného prášku/drátu, což má za následek snížení přesnosti této metody. Souosé podávání prášku je stabilnější a přesnější než ostatní metody, protože nedochází k přímému kontaktu s taveninou a laserový paprsek není tlumen částicemi prášku [33].

Přestože se jedná o velmi používanou technologii zejména při zpevňování povrchů a opravách mechanických dílů, je zde velké množství problémů, které mohou při využití této technologie vznikat. Z pohledu mikrostruktury dochází v důsledku různých faktorů, jako jsou nečistoty v materiálu nebo vlhkost v prášku, nadměrnému množství ochranného plynu, rychlého tuhnutí a ochlazování materiálů, snadno ke vzniku poréznicích defektů v materiálu. Trhliny se mohou objevit také u velkoplošných navařených částí v důsledku existence různých zbytkových napětí, např. tepelného napětí. Dále dochází k segregaci prvků v mikrostruktuře. Z hlediska makroskopické morfologie je třeba makroskopické rozměry a povrchovou úpravu laserových navařování vrstev ještě dále studovat a zlepšovat. Tato metoda se v praxi často používá ke zpevňování a opravám velkých, miniaturních a složitých zakřivených dílů [34].

1.6 Povrchové laserové kalení

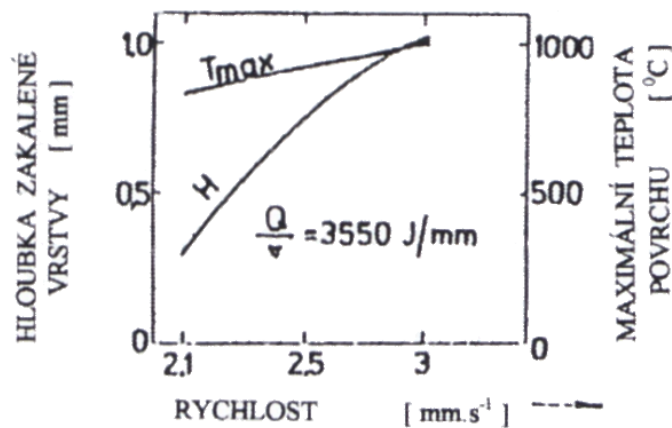
Původním účelem laserového tepelného zpracování bylo selektivní zakalení povrchu za účelem zvýšení jeho odolnosti proti opotřebení. V dnešní době nachází své uplatnění i pro změnu metalurgických a mechanických vlastností materiálu. Mezi praktické využití tepelného zpracování laserem například patří:

- zvýšení tvrdosti,
- zvýšení meze pevnosti,
- snížení třecího koeficientu,
- zvýšení otěruvzdornosti,
- zvýšení únavové životnosti,
- pomocí laserového paprsku je možné i popouštět [2,35].

Hlavní výhodou povrchového kalení pomocí laseru je skutečnost, že na rozdíl od klasických způsobů ohřevu není nutné během kalicího procesu využívat kalicí médium. Teplo je z místa kalení odvedeno dovnitř takto zpracovávaného materiálu tepelnou vodivostí. Díky tomu je tento proces velmi čistý a zakalená součást se nemusí dále čistit od chladicího média. Během působení paprsku o vysoké hustotě energie na poměrně malou plochu vzniká velký tepelný spád, který má za následek zakalení pouze malé povrchové vrstvy. Díky tomu zůstává jádro houževnaté a nedochází ke vzniku pnutí ani prasklin. Tloušťka takto vzniklé zakalené vrstvy je dále kromě hustoty toku energie záření závislá na těchto parametrech:

- měrné tepelné vodivosti kaleného materiálu,
- rychlosti skenování povrchu laserovým paprskem,
- velikosti plochy působení laserového svazku,
- pohltivosti a odrazivosti záření povrchem kaleného materiálu [25,35].

Na následujícím obrázku (Obr. 15) je popsán vliv změny rychlosti na hloubku zakalené vrstvy při konstantní hodnotě toku energie Q . Z grafu je patrné, že při růstu rychlosti posuvu dochází k nárůstu hloubky zakalené vrstvy. K tomuto jevu dochází, jelikož vlivem působení tepelné energie po kratší dobu nedochází ke vzniku tak velkého tepelného spádu v místě kalení, tudíž dochází k prokalení materiálu do větší hloubky. V okamžiku, kdy dojde k překročení určité rychlosti posuvu kalící hlavy, může dojít k natavení povrchu materiálu [25,35,36].



Obrázek 15. Hloubka zakalené vrstvy v závislosti na rychlosti skenování [25].

1.6.1 Porovnání zdrojů ohřevu povrchového kalení

K zajištění vysoké účinnosti kalícího procesu je nutné před samotným kalením zvolit vhodný zdroj ohřevu povrchu materiálu. Při výběru je nutné posoudit přesnost, rychlost, pořizovací cenu a provozní náklady daných technologií. V následující tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny charakteristiky vybraných zdrojů ohřevu využívaných pro kalení a dále jsou uvedeny hlavní výhody a nevýhody těchto technologií (Tab. 3) [2,25].

Tabulka 2. Charakteristika zdrojů ohřevu [25].

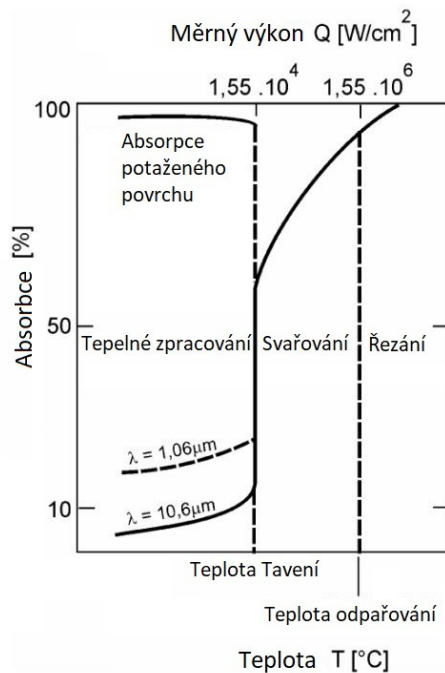
| Zdroj energie | Nejmenší plocha ohřevu (cm ²) | Maximální měrný výkon (W.cm ⁻²) |
|----------------------------|---|---|
| Sluneční světlo | 10 ⁻³ | 5 |
| Indukční ohřev | 1 | 10 ² |
| Kyslíko-acetylenový plamen | 10 ⁻² | 5.10 ² |
| Elektrický oblouk | 10 ⁻³ | 10 ³ |
| Laserové záření | 10 ⁻⁴ | 10 ⁸ |
| Elektronové záření | 10 ⁻⁷ | 5.10 ⁸ |

Tabulka 3. Výhody a nevýhod různých zdrojů ohřevu [2,35].

| Zdroj energie | Výhody | Nevýhody |
|----------------------------|--|--|
| Laser | Minimální rozměrové změny | Vysoká pořizovací cena |
| | Kalení pouze v požadovaném místě | Kalení probíhá pouze v malé oblasti |
| | Bez chladícího média | špatné pohlcování záření některými materiály/povrchy |
| | Bez popouštění | Nutná ochrana před laserovým zářením |
| | Prodloužení životnosti součásti | |
| | Univerzálnost | |
| Indukce | Rychlý průběh kalení | Nutné chladící médium |
| | Ve velkých sériích levnější než laser | Pro každou součást je nutné vyrobit novou cívku |
| | Lze dosáhnout velké hloubky zakalení | Vznik vnitřního pnutí |
| | Schopnost současně ohřát velkou plochu | Změna tvaru součásti po zakalení |
| Plamen | Levný, flexibilní a jednoduchý proces | Obtížná reprodukovatelnost |
| | | Velká šance na změnu tvaru součásti |
| Elektrický oblouk | Relativně levný | Vysokou hloubka teplotní penetrace |
| | Flexibilní proces | Dochází k ohřevu po celém povrchu součásti |
| Elektronový paprsek | Minimální rozměrové změny | Vysoká pořizovací cena |
| | Bez chladícího média | Nutnost využít vakuum |
| | Kalení pouze v požadovaném místě | Vysoká cena procesu |

1.6.2 Vliv absorpce

Množství energie, které je na povrch součásti dopraveno pomocí laserového paprsku je závislé na absorpci ozářeného materiálu. Pohltivost laserového paprsku s vlnovou délkou 10,6 μm se pohybuje v rozmezí řádově mezi 2 až 5 %, zatímco zbývající část energie se odráží. Tato odražená energie představuje vysokou energetickou ztrátu. Autoři Janez a Act ve svém článku [37] popisují absorptivitu materiálu v závislosti na jeho teplotě, kdy zahříváním kovů až k bodu tání se dosahuje mnohem vyšší absorptivity záření, a to až o 55 % a při dosažení teploty vypařování se absorpční schopnost zvýší až o 90 % vzhledem k hustotě energie působícího laserového paprsku [37].



Obrázek 16. Vliv teploty na pohlcování laserového záření [37].

Jedním ze způsobů, jak zvýšit absorpci je nanášení absorpčního materiálu na povrch součásti. Vhodný nátěr absorpčního přípravku by měl mít následující vlastnosti:

- vysoká schopnost pohlcovat laserové světlo,
- snadno aplikovatelný na kovové materiály, vysoká přilnavost,
- jednoduchá příprava a nízká pořizovací cena,
- schopnost být rovnoměrně rozprostřen se stabilní šířkou vrstvy,
- vysoká tepelná vodivost pro přenos tepla do základního materiálu,
- snadné odstranění zbytků povlaků po kalení.

Jako absorbenty se nejčastěji využívají práškové oxidy kovů, karbidy, grafit, fosforečnan zinečnatý a černá barva [37].

Absorpce dále silně závisí na drsnosti a povrchové úpravě součásti určené k zakalení. V tomto případě platí, že drsnější povrch lépe pohlcuje laserové záření, jelikož dopadající záření je vlivem nerovností zpětně odraženo do kaleného materiálu, zatímco u leštěných povrchů jsou tyto nerovnosti méně hluboké, tedy klesá i pravděpodobnost na zpětné odražení paprsků do materiálu. V následující tabulce (Tab. 4) je uvedena závislost pohltivosti na drsnosti povrchu součásti.

Tabulka 4. Pohltivost záření [35].

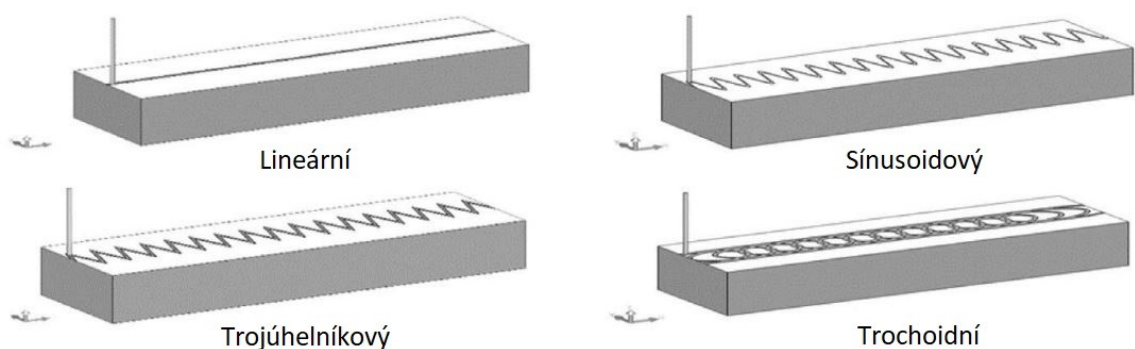
| Úprava povrchu | Průměrná drsnost povrchu Ra [μm] | Pohltivost [%] didodového laseru při $\lambda = 1064 \text{ nm}$ |
|----------------|---|--|
| Leštěno | 0,02 | ~30 |
| Broušeno | 0,21 | ~40 |
| Pískováno | 1,65 | ~68 |

1.6.3 Vliv strategie pohybu kalící hlavyce

Při povrchovém kalení laserovým paprskem se v závislosti na tvaru součásti a požadovaných výsledných vlastnostech volí různé strategie skenování povrchu materiálu. Jednou z hlavních překážek laserového kalení je řešení geometrických odlišností opracovávaných součástí. Problém vzniká při postupném kalení nepravidelných povrchů, jako jsou povrchy s otvory nebo ostrými hranami. Vzhledem k rozdílům v objemu okolního materiálu se v těchto případech často projevují problémy s přehříváním, což vede k nevhodným výsledkům opracování a degradaci materiálu.

U běžných procesů laserového kalení může být šířka dráhy laserového paprsku omezená, což vyžaduje použití překryvných zón mezi dráhami, zejména v oblastech, kde laserový paprsek nedosáhne do všech rohů při jednom průchodu. V tomto případě je efekt snížení tvrdosti v překryté oblasti nežádoucím jevem [38]. Z těchto důvodů se vývoj laserového kalení zaměřuje zejména na různé strategie skenování povrchu.

Autoři Baha et al. ve svém článku [39] popisujícím vliv jednotlivých parametrů nastavení kalícího procesu při kalení středně uhlíkové nízko legované oceli AISI 4340 porovnávali získané mechanické vlastnosti. K tomuto účelu byl zvolen laserový paprsek fokusován do tvaru kruhu o průměru 0.52 mm. Při kalení materiálu tímto paprskem byly využity 4 různé typy strategií skenování povrchu materiálu. Na následujícím obrázku (Obr. 17) jsou znázorněny jednotlivé strategie skenování.



Obrázek 17. Strategie kalení [39].

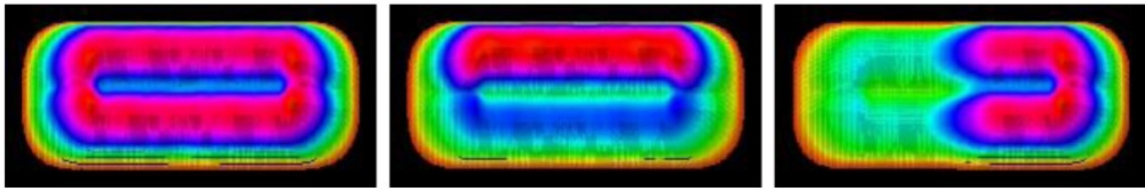
V práci při kalení byly využity různé nastavení výkonu laseru a rychlosti pohybu paprsku po povrchu součásti. Porovnáním výsledků došli k závěru, že výkon laseru pozitivně ovlivňuje zakalenou hloubku více než šířku zakalené oblasti, zatímco rychlost skenování snižuje hloubku prokalení, ale ještě výrazněji šířku zakalené oblasti. Výsledky porovnání jednotlivých strategií pohybu paprsku ukazují, že sinusový vzor dosahuje nejlepšího kompromisu mezi hloubkou prokalení, šířkou zakalené oblasti a rovnoměrností rozložení tvrdosti. Trochoidní vzor představuje relativně dobrý kompromis mezi zakalenou hloubkou a zakalenou šířkou, ale s nepravidelným rozložením tvrdosti. Trojúhelníkový vzor dosahuje dobré šířky i hloubky včetně rovnoměrné tvrdosti, ale celkově dosahuje horších výsledků než vzor sinusový. Lineární vzor dosahuje maximální hloubky zakalené vrstvy, ale dosahuje šířky prokalení pouze o něco větší, než je průměr paprsku [39].

Autoři Paula et al. se ve své studii [38] zaměřili na lepší kontrolu oblasti působení laserového paprsku, kdy pomocí dalšího optického členu (Raylase skeneru) umístěnému mezi kolimátorem a ostřicí čočkou byli schopni velmi rychle měnit parametry kalení (rychlost pohybu fokusovaného bodu a výkon laseru). V následujícím obrázku (Obr. 18) je znázorněn způsob rozložení statického obdélníkového pole působení laserového paprsku na řízený kruhový bod, který díky svému pohybu po křivce kopíruje původní obdélníkové pole.



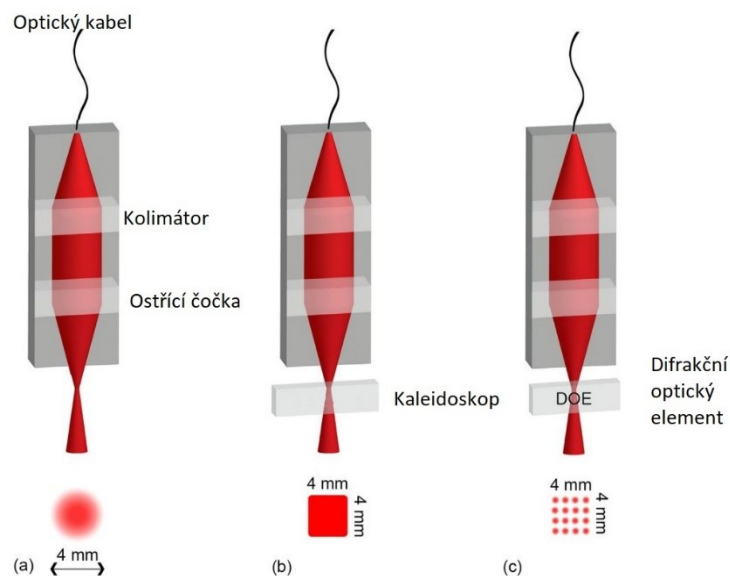
Obrázek 18. Rozložení obdélníkového pole na kruhové [38].

Pomocí tohoto řešení s příslušným softwarem byli schopni vytvořit přizpůsobitelné pole teplotního účinku laserového paprsku, což mělo za následek dosažení rovnoměrnější kalící teploty během kalení rozměrově složitých součástí a díky tomu zvýšit kvalitu samotné zakalené součásti. Dále toto řešení v podstatě umožňuje dynamicky měnit šířku paprsku, díky čemuž dochází k menšímu překrytí paprsků, které by jinak působily na již zakalenou část.



Obrázek 19. Přizpůsobení teplotního obdelníkového pole s využitím různých rychlostí pohybu kruhové paprsku [38].

Autoři Dewi et al. v článku [40] porovnávali vliv různých tvarů kalícího pole paprsků s využitím rozdílných optických členů v kalící hlavě. K testování byla použita lehce legovaná ocel 44MnSiVS6. V následujícím obrázku (Obr. 20) jsou znázorněny jednotlivé optické soustavy, kdy pouze s ostřicí čočkou bez přidavného optického členu vzniklo laserové pole s Gaussovým rozložením tepelného účinku, v druhém případě bylo díky použití kaleidoskopu jako optického členu dosaženo rovnoměrného energetického pole. V třetím případě byla jako optický člen využita difrakční mřížka, pomocí které došlo k rozložení paprsku na sérii bodů [40].



Obrázek 20. Optické soustavy s výslednou velikostí paprsku. a, Gaussovo rozložení b, čtvercové s homogenním rozložením tepelného účinku c, bodové pole získané pomocí difrakčního optického členu [40].

Využití rozdílných laserových polí při zachování stejných parametrů kalení při jednotlivých kalení mělo za následek změny ve výsledné tvrdosti a velikosti vnitřního zbytkového napětí. S využitím Gaussova rozložení paprsku bylo dosaženo největší hloubky prokalení. S využitím čtvercového pole byla získána povrchová mikrotvrdoost nejnižší. S využitím difrakčního optického členu bylo dosaženo nejvyšší povrchové mikrotvrdoosti, ale naopak nejnižší hloubky prokalení [40].

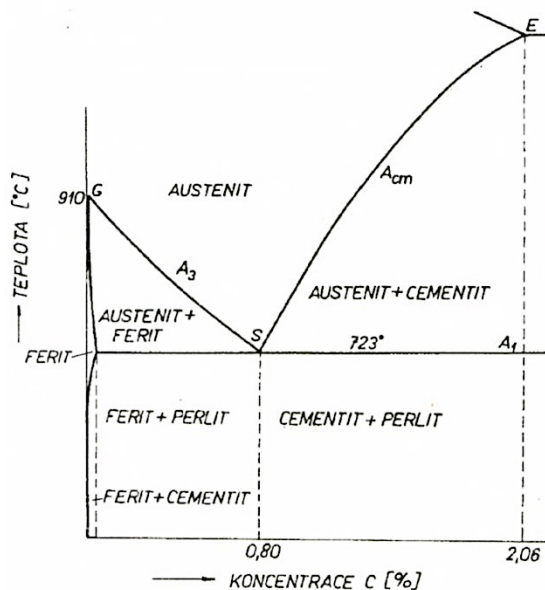
2 TEPELNÉ ÚPRAVY OCELÍ

Požadovaných technologických, mechanických, či jiných vlastností lze v mnohých případech dosáhnout pomocí tepelného zpracování. K těmto změnám dochází při zvýšené teplotě. Pomocí jednotlivých metod tepelného zpracování získáváme výrobek s lepšími vlastnostmi, ale za cenu nárůstu výrobních nákladů spojenými s přidáním dalších technologií a také zejména kvůli nákladům na energii potřebnou k ohřevu. Tepelné úpravy se obecně skládají z ohřevu materiálu, prohřevu a ochlazování.

Změna vlastností materiálu nastává na základě změny struktury (např. kalení, zušlechťování), dodáním částic dalších prvků (např. cementování, nitridování), nebo pomocí vyloučení částic látky (např. oduhličování) [25,26,41].

2.1 Austenitizace

Všechny metody tepelného zpracování, u nichž dochází k překrystalizaci, jsou založeny na procesu austenitizace. K tomuto procesu dochází při ohřevu nad kritickou teplotu s následnou přeměnou sekundární ferito-cementitické (perlitické) struktury na austenitickou. Na následujícím obrázku (Obr. 21) je znázorněna část rovnovážného diagramu Fe-Fe₃C. Z tohoto diagramu lze vyčíst, že u podeutektoidní oceli dochází k austenitizaci v rozmezí teplot A_{c1} až A_{c3} a u nadeutektoidní oceli v rozmezí teplot A_{c1} až A_{cm} .



Obrázek 21. Část diagramu Fe-Fe₃C [41].

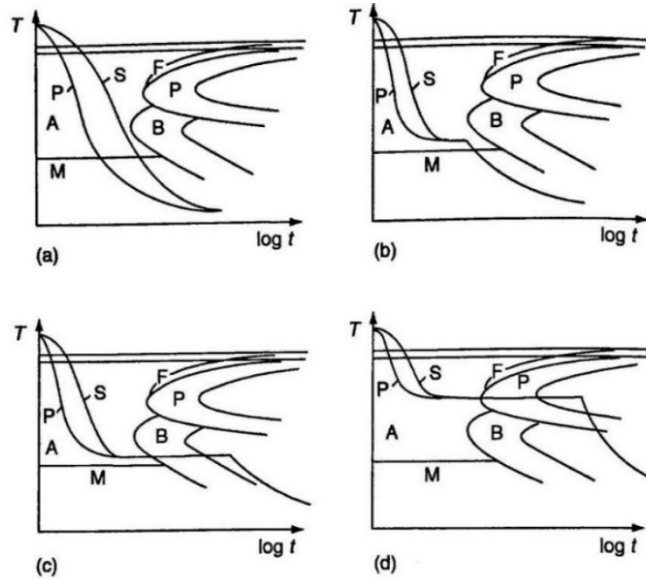
Při procesu austenitizace dochází při ohřevu nad teplotou A_{c1} k přeměně perlitu v austenit. Během této přeměny dochází také k postupnému rozpouštění feritu v případě podeutektoidní oceli nebo cementitu u nadeutektoidní oceli. K tomuto jevu dochází díky difúzní přeměně skládající se z tvorby zárodků s následným růstem. K tvorbě těchto zárodků dochází díky heterogenní nukleaci feritu na rozhraní feriticko-cementitické struktury nebo na strukturních poruchách v perlitickém feritu. Rychlost, kterou austenitizace probíhá je ovlivněna mimo podmínek ohřevu i chemickým složením a výchozí strukturou materiálu [25,26,41].

2.2 Kalení

Během procesu kalení dochází k ohřevu součásti na kalící teplotu s následným prudkým ochlazením. Kalící teplota se volí 30 až 50 °C nad teplotou A_{c3} u podeutektoidních ocelí a 30 až 50 °C nad teplotou A_{c1} u nadeutektoidních ocelí. Při ochlazování dochází ke vzniku nerovnovážné struktury materiálu. Změnou rychlosti ochlazování lze docílit rozdílných výsledných struktur materiálu po zakalení. Výslednými strukturami s vyšší tvrdostí vzniklými přeměnou austenitu jsou martenzit a bainit. Zakalením ocelí dojde kromě zvýšení tvrdosti i k nárustu pevnosti v tahu a současně také dojde i ke zvětšení objemu součásti. Toto zvětšení objemu může především u velkých součástí způsobit tvarové deformace [25,26,41].

2.2.1 Ochlazování

Volba rychlosti ochlazování závisí na chemickém složení oceli a velikosti jejího průřezu. Aby došlo ke snížení nežádoucích tepelných a transformačních napětí v důsledku objemových změn, je třeba obvykle využít pomalejší rychlosti ochlazování. Procesy ochlazování proto vyžadují vhodnou volbu rychlostí ochlazování, které jsou dostatečně rychlé, aby umožnily vznik požadované mikrostruktury, ale dostatečně pomalé, aby minimalizovaly zbytková napětí a deformace. Tato problematika vedla ke vzniku různých metod kalení, jako je přímé kalení, kalení rozprašováním média, kalení plynem a mlhou. Časově-teplotní cykly, kterých lze dosáhnout různými metodami kalení, jsou znázorněny na následujícím obrázku (Obr. 22) pro střed (S) a povrch (P) kalené součásti spolu s diagramem časové transformace teploty [25,26,41].



Obrázek 22. Křivky chladnutí ocelí pro střed (S) a povrch (P) kalených součástí s využitím více kalících metod v IRA diagramu (a – přímé, b – termální, c – izotermické, d – izotermické žíhání) [26].

Kalení základní (nepřetržité)

V obrázku 22a jsou vyobrazeny křivky chladnutí pro přímé kalení. Jedná se o nejběžnější metodu kalení, kdy se součásti z austenitizační teploty ochladí přímo na pokojovou teplotu ponořením do odpařitelného kapalného kalícího prostředí. K tomuto procesu se jako kalící prostředí nejčastěji využívá voda nebo olej. U dalších metod kalení dochází v průběhu kalení k přerušení ochlazování se setrváním na určité teplotě [25,26,41].

Přerušované kalení zahrnuje metody jako jsou termální kalení, izotermické kalení a izotermické žíhání. Jako kalící médium slouží solné lázně nebo speciální oleje, které umožňují setrvání na předem určené teplotě [25,26,41].

Termální kalení

Termální kalení spočívá v rychlém ochlazení oceli na teplotu těsně nad teplotou M_s , následuje udržování této teploty, aby došlo k jejímu vyrovnání v celém obrobku. Následuje vyjmutí obrobku z lázně před zahájením přeměny na bainit (obr. 22b). Struktura martenzitu vzniklá díky termálnímu kalení je stejná jako při přímém kalení, avšak zbytková napětí jsou minimalizována díky homogennějšímu rozložení teploty v celém dílu a pomalejší rychlosti ochlazování během tvorby martenzitu [25,26,41].

Izotermické kalení

Izotermické kalení je podobné termálnímu, protože ocel je rychle ochlazena z austenitické teploty na teplotu vyšší než M_s , ale liší se tím, že obrobek je udržován při dané teplotě po dostatečně dlouhou dobu, aby umožnil izotermickou přeměnu austenitu na bainit (obr.22 c). Ve srovnání s nepopouštěným martenzitem má bainit lepší houževnatost a pevnost než martenzit vzniklý termálním kalením. Martenzit vznikající při přímém kalení a termálním kalení se často následně popouští, protože popouštěný martenzit vykazuje homogennější rozložení prvků a lepší houževnatost a pevnost [25,26,41].

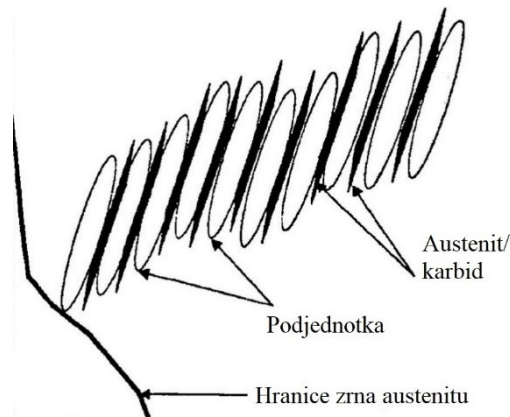
Izotermické žíhání

Izotermické žíhání se od termálního a izotermického kalení liší tím, že teplota lázně je dostatečně vysoká, aby došlo k izotermické přeměně na perlit (obr.22 d). Perlit vykazuje vysokou houževnatost a dostatečnou pevnost, díky čemuž je optimální strukturou pro díly jako jsou dráty, kabely a železniční kolejnice [25,26,41].

2.3 Struktury vzniklé kalením

2.3.1 Bainit

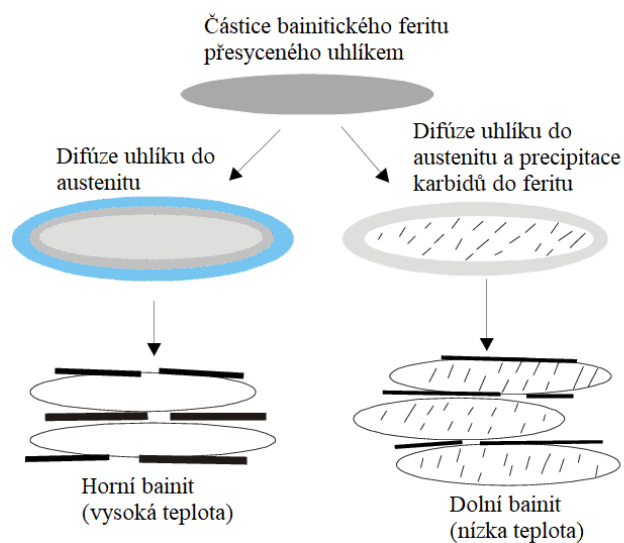
Mikrostruktura bainitu se skládá z agregátů feritových destiček oddělených tenkými vrstvami austenitu, martenzitu nebo cementitu. Tyto agregáty destiček se nazývají jehličky. Malé jehlicovité feritové destičky se někdy označují jako podjednotky. Při pozorování pod mikroskopem se jeví samostatnými při dvourozměrném řezu, ale často jsou navzájem spojeny specifickou třídimenzionální krystalografickou orientací (většinou v čočkovité či jehlicovité morfologii). První feritová podjednotka, která vzniká na hranici zrn austenit-austenit postupně roste do tvaru mikrostruktury znázorněná na obrázku 23. Desky jsou odděleny nepřeměněným austenitem, který by se přeměnil na martenzit, pokud by ochlazování dosáhlo kritické rychlosti pro martenzitickou přeměnu. Za určitých podmínek se tento austenit může rozkládat na cementit, čímž vzniká směs feritu a cementitu klasické bainitické mikrostruktury. Bainitické oceli se mohou vyskytovat ve dvou různých formách, horní bainit a dolní bainit. Horní bainit vzniká při teplotách vyšších, než je teplota počátku martenzitu (M_s). Vzhledem k smykovým napětím doprovázejícím bainitickou přeměnu, je v austenitu a feritu pozorováno velké množství dislokací. Tyto dislokace omezují růst každé podjednotky na určitou velikost [26,42].



Obrázek 23. Schématické znázornění mechanismu růstu pomocí podjednotkové nukleace a růstu [26].

U některých ocelí je většina karbidů přítomna uvnitř bainitu než mezi bainitovými podjednotkami a souhrnně se označují jako dolní bainit. Typicky se dolní bainit tvoří v ocelích s vysokým obsahem uhlíku, a to pod teplotou, při které se tvoří horní bainit, a nad teplotou M_s . Ačkoli je mikrostruktura dolního bainitu podobná mikrostruktuře temperovaného martenzitu, hlavním rozdílem je výskyt pouze jediné krystalografické varianty karbidu ve struktuře dolního bainitu.

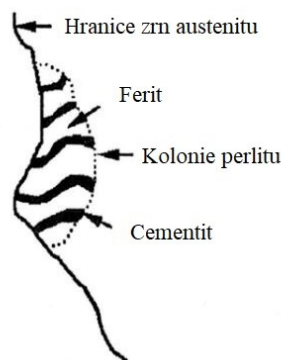
Horní i dolní bainity vznikají z austenitu bezdifúzně a to pouze pomocí přesunu atomů. Jediný rozdíl spočívá v tom, že v případě horního bainitu se uhlík z bainitické podjednotky rozdělí na austenit dříve, než se v podjednotce vysráží karbid. V případě dolního bainitu dochází k precipitaci karbidu uvnitř feritu dříve, než se veškerý uhlík zcela oddělí od feritu. Tento rozdíl mezi únikem uhlíku z přesycené feritové desky a srážením karbidu uvnitř feritové desky je schématicky znázorněna v následujícím obrázku (Obr. 24) [26,42].



Obrázek 24. Schématické znázornění mechanismu formace horního a dolního austenitu [42].

2.3.2 Perlit

Perlit je lamelární směs feritu a cementitu. Při pozorování optickým mikroskopem se může zdát, že každá kolonie perlitu je tvořena mnoha střídanými se krystaly feritu a cementitu, většinou se však jedná o vzájemně se prolínající trojrozměrné monokrystaly feritu a cementitu. Ferit a cementit uvnitř perlitové kolonie vykazují preferované krystalografické vztahy. Na následujícím obrázku (Obr. 25) je znázorněn růst perlitické kolonie na hranici austenitického zrna [26,41].



Obrázek 25. Schématické znázornění
růstu perlitické kolonie [26].

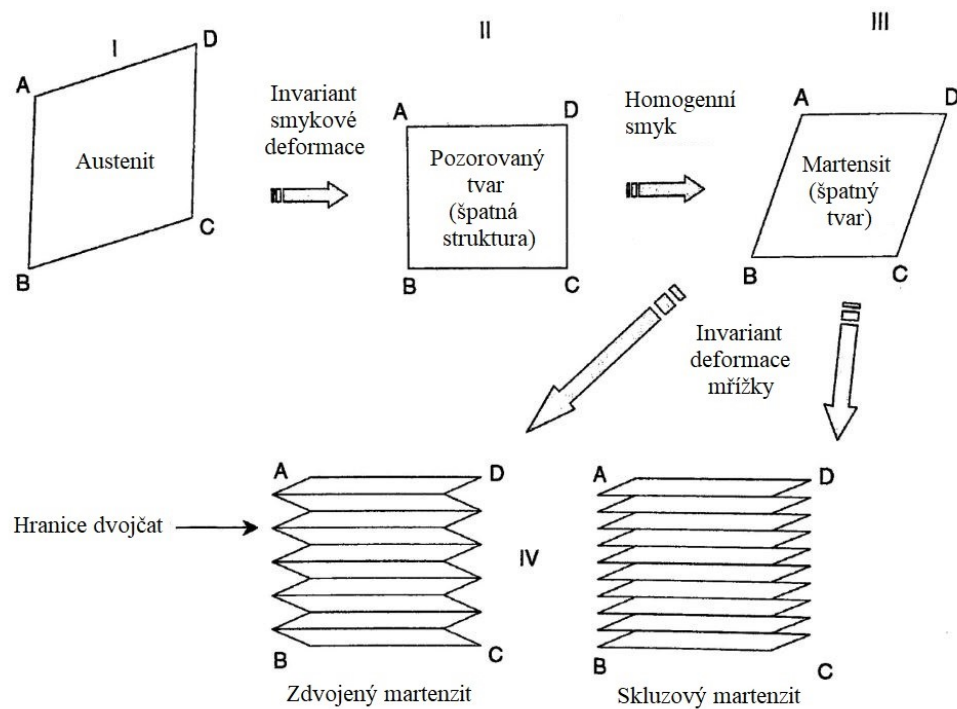
Perlit přerůstá v austenit kooperativním růstem feritu a cementitu. Ani ferit, ani perlit nevykazují žádnou preferovanou krystalografickou orientaci s austenitem, do kterého vrůstají. Kolonie se stýkají s austenitem v nekoherentním vysokoenergetickém rozhraní. Výsledkem je, že perlit, který nukleuje na již existujícím alotriomorfním feritu, si vždy vybírá stranu feritu (vysokoenergetické rozhraní), která nemá žádný krystalografický vztah se zrnem austenitu. Naproti tomu Windmanstatteův ferit a bainit vždy nukleují na rozhraní s nízkou energií. Rozteč lamel se zmenšuje s poklesem transformační teploty. Přeměna perlitu probíhá velmi blízko termodynamické rovnováhy. Dále také často probíhá při vyšších teplotách a vykazuje pomalou rychlost růstu ve srovnání s bainitem [26].

2.3.3 Martenzit

Martenzit je vysoce tvrdý a pevný přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α . Přeměna austenitu na martenzit probíhá atermicky pod teplotou M_s , rozsah přeměny austenitu na martenzit je závislý na velikosti podchlazení materiálu pod tuto teplotu a nezávisí na době, kterou je materiál vystaven těmto teplotám. K přeměně austenitu na martenzit dochází se snižováním teploty pod M_s až do ochlazení na teplotu M_f , kdy se očekává 100% přeměna austenitu na martenzit. Tato teplota bývá ve většině případů v záporných

hodnotách. Pokud není při ochlazování dosaženo teploty M_f , tak výsledná struktura obsahuje martenzit i zbytkový austenit. Jelikož se jedná o bezdifúzní stříhovou přeměnu, je martenzitická přeměna velmi citlivá na vnitřní a vnější pnutí materiálu [26,41].

Na následujícím obrázku (Obr. 26) je znázorněn vznik martenzitu dle teorie, která se shoduje s experimentálně zjištěným vztahem orientace i s makroskopickým tvarem martenzitových desek. Pokud je krystalická struktura austenitu reprezentována tvarovou hranicí ABCD (bod I), je při použití smykové deformace dosaženo pozorovaného tvaru martenzitu, jak je znázorněno v bodě II. To však vede k nesprávné krystalické mřížce. Při aplikování další homogenního smyku (bod III), dochází ke vzniku správné krystalové mřížce (prostorově středěné). Protože však tvar dosažený při aplikaci dalšího homogenního smyku (bod III) neodpovídá pozorované změně tvaru během martenzitické transformace, je třeba tvar dosažený po (III) obnovit na tvar (II) pomocí skluzu a dvojitých mřížkových invariantních deformací. Z tohoto důvodu v dalším kroku nehomogenní mřížkově invariantní deformace vytvoří skluzový nebo zdvojený martenzit (bod IV), který odpovídá pozorovanému tvaru. Lze tedy říci, že změny krystalové struktury z austenitu na martenzit se dosáhne prostřednictvím dvou invariantů prostého smyku a nehomogenní invariantní mřížkové deformace [26].



Obrázek 26. Schématické znázornění teorie transformace martenzitu z austenitu [26].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CÍL PRÁCE

Na základě literární rešerše bylo zjištěno, že laserový paprsek je vhodný jako zdroj tepelné energie pro povrchové úpravy materiálů. Jednou z oblastí využití této tepelné energie záření je povrchové kalení laserem. Použitelnost laseru pro povrchové kalení v reálném provozu je silně závislé na procesních parametrech a také na vhodné volbě strategie pohybu kalícího paprsku po povrchu kalené součásti. Z tohoto důvodu cílem této diplomové práce bylo porovnat vliv velikosti překrytí laserového paprsku na výsledné mechanické vlastnosti zkušebních vzorků při procesu kalení. Zkušební vzorky byly zhotoveny z materiálu C45 a následně pomocí různých parametrů zakaleny. Jako mezikrok bylo nutné nalézt optimální nastavení výkonu laseru. Nalezené optimální nastavení bylo využito při přípravě vzorků s různou mírou překrytí kalených oblastí. U zkušebních vzorků byla měřena mikrotvrdost a zkoumána změna topografie povrchu.

Cíle diplomové práce byly následující:

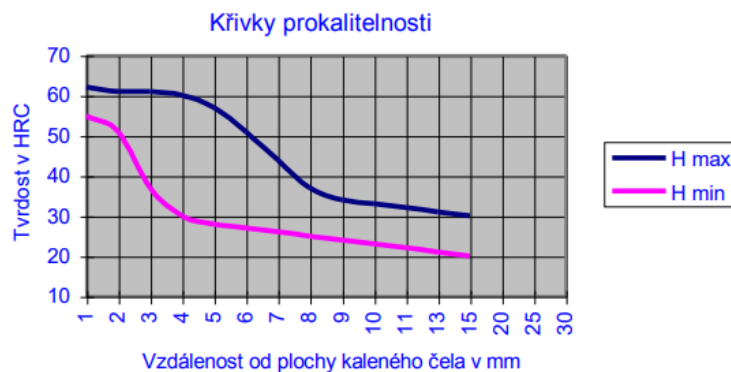
1. Vypracování literární rešerše na dané téma.
2. Příprava zkušebních vzorků za využití diodového laseru při různých velikostech překrytí paprsků.
3. Měření vlastností povrchové vrstvy v závislosti na proměnných parametrech laseru.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků a jejich diskuse.

4 TESTOVANÝ MATERIÁL A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

4.1 Testovaný materiál

K popisu vlivu překrytí na výsledné mechanické vlastnosti byl zvolen materiál EN C45. Jedná se o uhlíkovou ocel určenou k zušlechťování a povrchovému kalení. Tato ocel má zaručený obsah uhlíku ($C = 0,42-0,50 \%$), manganu ($Mn = 0,5-0,8\%$), křemíku ($Si = \max. 0,40\%$), chromu ($Cr = \max. 0,40\%$), molybdenu ($Mo = \max. 0,10\%$), niklu ($Ni = \max. 0,4\%$), fosforu ($P = \max. 0,045\%$) a síry ($S = 0,045\%$).

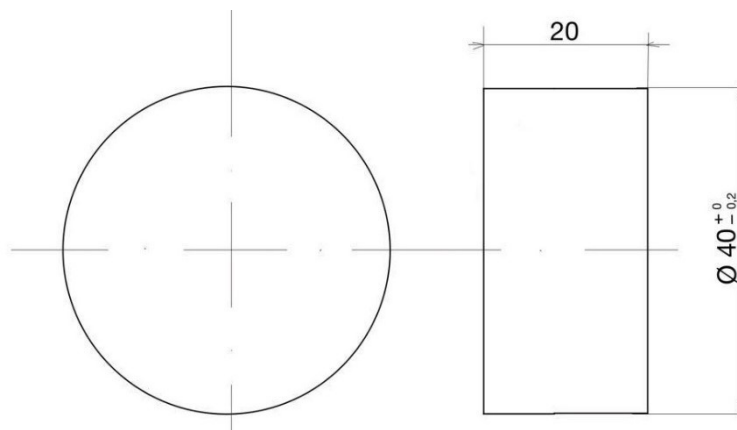
Po zušlechťování nebo normalizačním žhání se tato ocel využívá pro výrobu méně namáhaných strojních dílů. Po zakalení a následném popuštění dosahuje optimálních mechanických hodnot a je hojně využívána jako konstrukční materiál. Na následujícím obrázku (Obr. 27) je uvedena prokalitelnost této oceli [43].



Obrázek 27. Prokalitelnost oceli C45 [43].

Výkres testovacího vzorku

Na následujícím obrázku (Obr. 28) je výkres zvoleného zkušební vzorku z materiálu EN C45. Jedná se o kulatinu osoustruženou na požadovaný průměr s následným upíchnutím na rozměr. Povrch nebyl po obrábění broušen.



Obrázek 28. Výkres zkušební vzorku.

4.2 Příprava zkušebních vzorků

Jednotlivé vzorky byly připraveny ve firmě Kovomont Přerov a následně byly zakaleny v kalícím středisku LASKAL, které se v této firmě také nachází. Na následujícím obrázku (Obr. 29) lze vidět kalící hlavici upevněnou na rameni průmyslového robota.



Obrázek 29. Kalící středisko LASKAL.

4.2.1 Diodový laserový zdroj

Pro vznik tepelného paprsku byl využit zdroj laserového záření LaserLine LDM 5000-100 (Obr. 30).



Obrázek 30. Laserový zdroj LaserLine [44].

Díky malým rozměrům a vysoké spolehlivosti lze tento zdroj lehce začlenit do výrobního procesu. Tento zdroj je vhodný jak pro laserové kalení, tak i pro laserové navařování. V následující tabulce (Tab. 5) jsou uvedeny základní technické parametry tohoto diodového laserového zdroje.

Tabulka 5. Vybrané parametry laserového zdroje [44].

| | |
|----------------------------------|---------------------|
| Maximální výstupní výkon | 5000 W |
| Minimální kvalita paprsku | 60 mm · mrad |
| Průměr optického vlákna | 600 μm |
| Stabilita výkonu | <+/- 2% za 2 hodiny |
| Vlnová délka záření | 900 – 1080 nm |
| Příkon | 14 kW |

4.2.2 Průmyslový robot

Pro řízenou a přesnou manipulaci s kalící hlavicí v kalícím centru LASKAL byl použit průmyslový robot FANUC M-20iA/35M (Obr. 31). Tento průmyslový robot je vhodný pro různé aplikace od manipulace s materiálem po montáž.



Obrázek 31. Průmyslový robot FANUC M-20iA/35M [45].

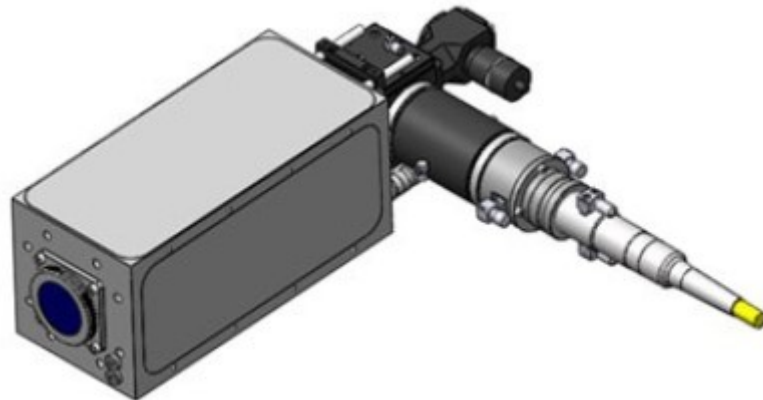
Výhodou tohoto robotického ramena je možnost umístění potřebných kabelů v dutém horním ramenu. Toto umístění je vhodné zejména v případě, kdy by kabeláž umístěná na ramenu omezovala robota v pohybu. V následující tabulce (Tab. 6) jsou uvedeny základní technické parametry.

Tabulka 6. Technické parametry FANUC M-20iA/35M [45].

| | |
|------------------------------|---------------|
| Nosnost | 35 kg |
| Maximální dosah | 1811 mm |
| Opakovatelná přesnost | ± 0.08 mm |
| Stupňů volnosti | 6 |
| Hmotnost | 252 kg |

4.2.3 Kalící hlavice

Jako optický člen k fokusaci paprsku byla využita kalící hlavice LaserLine (Obr. 32), která umožňuje nastavení kalící stopy v osách x a y. Rozměry kalící stopy lze průběžně měnit v průběhu kalení. Pomocí optiky je vytvořeno statické obdélníkové pole, které má v celé oblasti rovnoměrnou distribuci tepelné energie. Hlavice je vybavena pyrometrem a termokamerou.



Obrázek 32. Kalící hlavice LaserLine [46].

5 NALEZENÍ OPTIMÁLNÍHO NASTAVENÍ VÝKONU

Pro zkoumání vlivu překrytí svazku laserového paprsku bylo nutné nejprve nalézt optimální nastavení výkonu laseru. Na nalezení optima se zaměříme v první fázi praktické části.

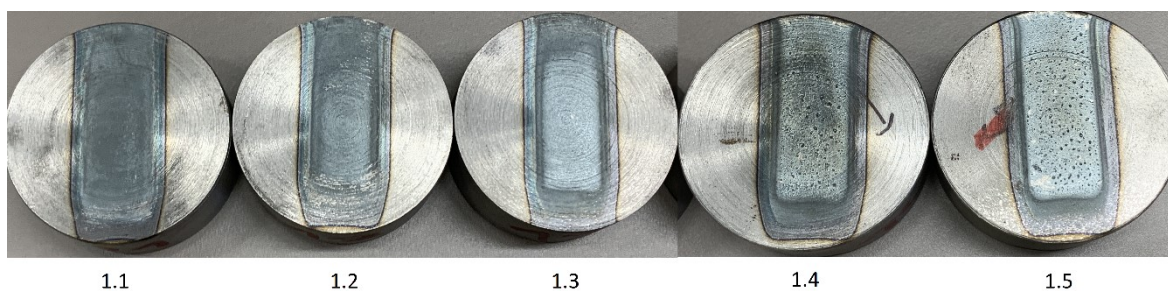
Pomocí diodového laseru došlo k zakalení zkušebních vzorků, kdy se u jednotlivých nastavení měnil pouze výkon laseru, ostatní parametry zůstaly u všech vzorků stejné. V následující tabulce (Tab. 7) jsou uvedeny jednotlivé parametry kalení.

Tabulka 7. Nastavení kalícího procesu.

| Vzorek | Výkon laseru [W] | Šířka x délka paprsku [mm] | Rychlost posuvu [cm/min] | Vzdálenost kalící hlavy od vzorku [cm] | Úhel dopadu paprsku [°] |
|--------|------------------|----------------------------|--------------------------|--|-------------------------|
| 1.1 | 3100 | 12 x 7,5 | 45 | 24 | 25 |
| 1.2 | 3200 | | | | |
| 1.3 | 3300 | | | | |
| 1.4 | 3400 | | | | |
| 1.5 | 3500 | | | | |

5.1.1 Nalezení optimálního nastavení – vzorky

Na zakalených vzorcích (Obr. 33) lze u vzorků 4 a 5 okem pozorovat změnu povrchu, kdy došlo k „vystoupenutí materiálu“. Tato změna nám předpovídá, že u těchto vzorků nejspíše došlo k přehřátí materiálu během procesu kalení.



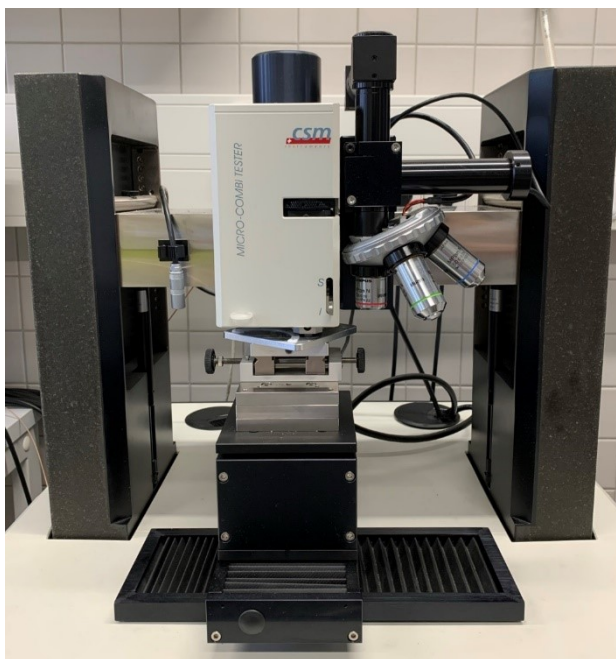
Obrázek 33. Zakalené vzorky, seřazené postupně 1.1 až 1.5.

5.2 Naměřené výsledky a jejich diskuze

U jednotlivých vzorků byla po zakalení provedena instrumentovaná zkouška mikrotvrdoti, která slouží k popisu mechanických materiálových vlastností, a to zejména tvrdosti a modulu pružnosti. K měření mikrotvrdoti povrchu zakalených vzorků byl použit Micro-Combi tester nacházející se v Laboratorním centru U15 Univerzity Tomáše Bati.

Mikrotvrdoměr

Mikrotvrdoměr Micro-Combi Tester od firmy CSM Instruments (Obr. 34) je zařízení sloužící pro velmi přesné měření tvrdosti a modulu pružnosti povlaků a povrchu v makro, mikro i nano měřících. Data získaná z mikrotvrdoměru mohou sloužit pro výběr vhodného materiálu pro dané použití, ale také pro zkoumání nových druhů materiálů a povlaků. Široký rozsah zkušebního zatížení umožňuje stanovit přilnavost, odolnost proti poškrábání, tvrdost, modul pružnosti a deformační práci testovaných materiálů. [47].

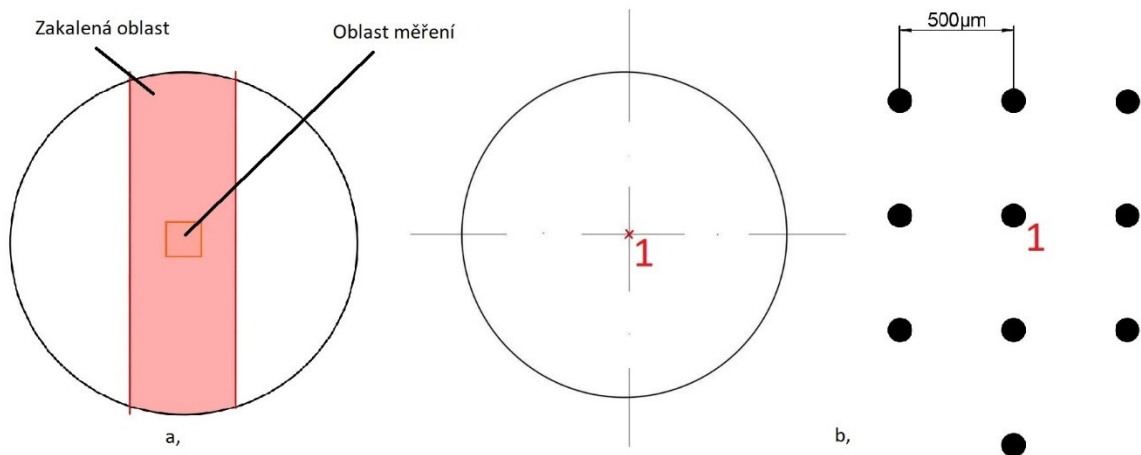


Obrázek 34. Micro-combi tester.

5.2.1 Mikrotvrdot

Měření mikrotvrdoti proběhlo pomocí přístroje Micro-Combi Tester od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Pro měření mikrotvrdoti byl použit diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Zkušební zatížení působí na indentoru bylo 1 N a toto zatížení bylo aplikováno s výdrží 12 s. Na obrázku (Obr. 35) je znázorněna oblast kalení a schéma měření, kdy bod 1 se nachází ve středu povrchu zkušební

Vzorku. Mezi jednotlivými body měření byl nastaven krok 500 μm . Jednotlivé vzorky byly měřeny ve středu zakalené zóny.



Obrázek 35. a, - náčrtek zakalené oblasti; b, - schéma měření, matice vpichů mikrometru.

Takto byla změřena vtisková tvrdost, Vickersova tvrdost a také byla změřena hloubka vtisku vzniklá působením indentoru. U každého vzorku bylo provedeno celkem 10 měření a takto získaná data byla následně statisticky vyhodnocena pomocí vzorců uvedených níže (vzorce 1-3) a dále podle optimalizačního parametru byla vypočtena optimální hodnota nastavení výkonu laseru.

Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

kde n je počet měření a x_i naměřené hodnoty [48]

Směrodatná odchylka výběru

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

kde N je počet měření; x_i naměřené hodnoty a \bar{x} je jejich aritmetický průměr [48]

Standartní chyba aritmetického průměru

$$s_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

kde s je směrodatná odchylka výběru a n je počet měření [48]

Vtisková tvrdost H_{IT}

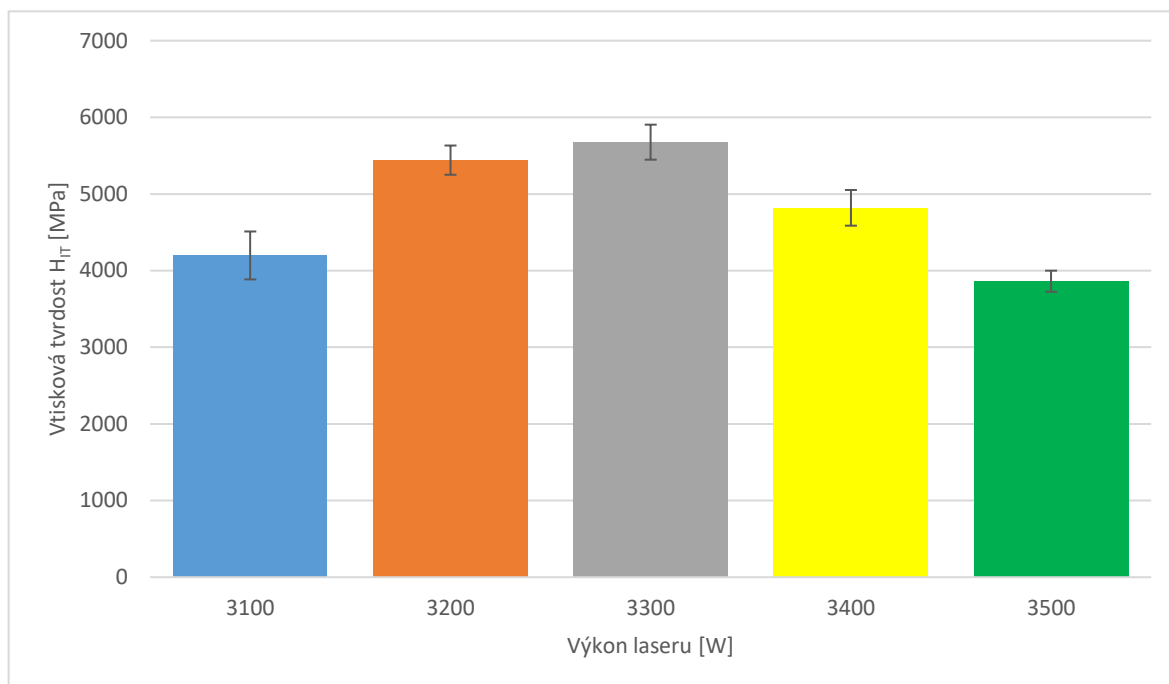
Při Instrumentované zkoušce tvrdosti jsou získávány dvě základní veličiny – vtisková tvrdost a Vickersova tvrdost. Vtisková tvrdost je mírou odolnosti k trvalé deformaci nebo poškození a vypočítá se jako maximální síla aplikovaná na zkoumanou plochu dělená průmětem kontaktní plochy.

Tabulka 8. Naměřené hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT}

| Měření | Vtisková tvrdost H_{IT} [MPa] | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | Vzorek 1.1 | Vzorek 1.2 | Vzorek 1.3 | Vzorek 1.4 | Vzorek 1.5 |
| 1 | 6278,7 | 6731,9 | 6857 | 5376,4 | 4780,5 |
| 2 | 3107,3 | 4274,4 | 6029,9 | 4447 | 3706,1 |
| 3 | 4603,3 | 5194,4 | 5906,1 | 4049,7 | 3201,9 |
| 4 | 3554,2 | 5414,4 | 6005,8 | 5707,5 | 3492,8 |
| 5 | 4901,7 | 5585,5 | 5262,2 | 4877,9 | 3681,1 |
| 6 | 3511,9 | 5235,5 | 4116,7 | 3767,2 | 4038,8 |
| 7 | 5007,8 | 5235,5 | 5437,5 | 5492 | 3830,4 |
| 8 | 3518,7 | 5559,4 | 6199,7 | 4505,4 | 3787,9 |
| 9 | 4077,8 | 5486,1 | 5442,3 | 4170,9 | 4298,5 |
| 10 | 3419 | 5697,8 | 5501,9 | 5797,9 | 3798,3 |
| Aritmetický průměr | 4198 | 5441,5 | 5675,9 | 4819,2 | 3861,6 |
| Směrodatná odchylka | 989 | 603,3 | 722,7 | 735,6 | 435,3 |
| Standartní chyba průměru | 312,7 | 190,8 | 228,5 | 232,6 | 137,6 |

Z výsledků lze pozorovat, že vzorek 1.3 dosáhl nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti a to 5675,9 MPa. Tohoto výsledku bylo dosaženo při nastavení výkonu 3300 W. Nejnižší hodnoty (3861,6 MPa) bylo dosaženo u vzorku 1.5 při výkonu 3500 W, tedy dodatečné zvýšení výkonu o 200 W mělo za následek snížení výsledné vtiskové tvrdosti o hodnotu 1814,3 MPa, což odpovídá poklesu o 32 %.

Na následujícím obrázku (Obr. 36) jsou znázorněny jednotlivé výsledky vtiskové tvrdosti H_{IT} v závislosti na výkonu laseru. Chybové úsečky znázorňují standartní chybu průměru.



Obrázek 36. Porovnání vtiskové tvrdosti H_{IT} v závislosti na výkonu laseru.

Mikrotvrdość podle Vickerse H_{VIT}

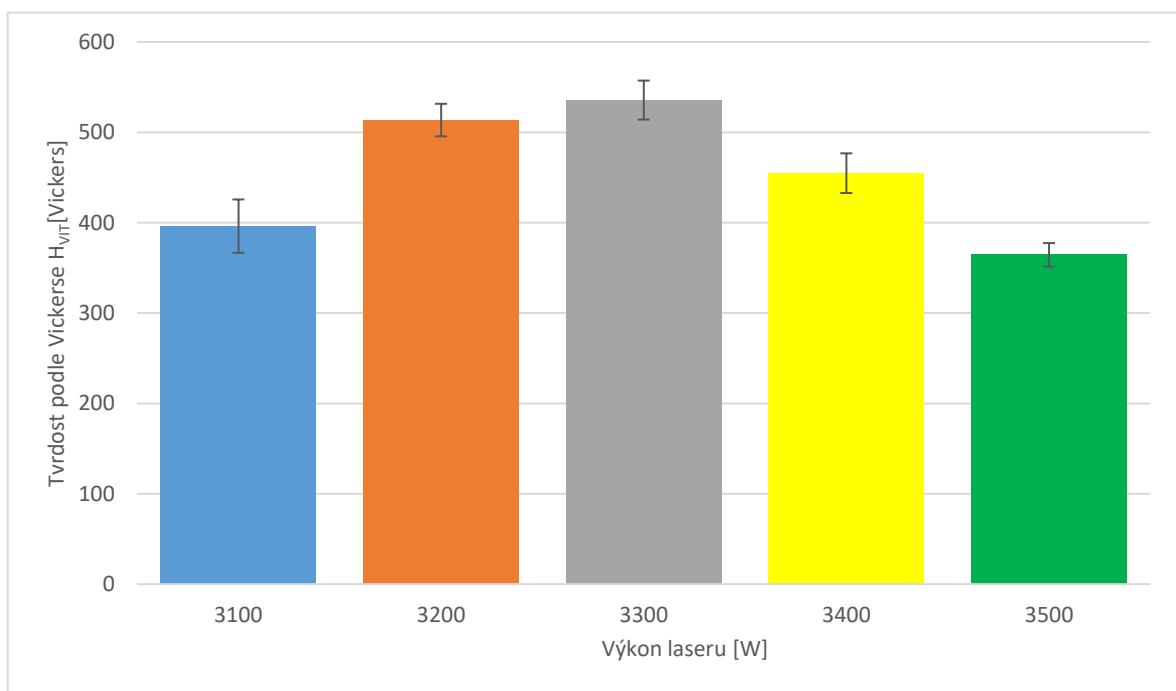
Jedná se o odolnost materiálu proti místnímu porušení cizím tělesem. Definuje se jako poměr zkušebního zatížení k povrchu vtisku.

Tabulka 9. Naměřené hodnoty mikrotvrdości podle Vickerse H_{VIT}

| Měření | Mikrotvrdość podle Vickerse H_{VIT} [Vickerse] | | | | |
|---------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Vzorek 1.1 | Vzorek 1.2 | Vzorek 1.3 | Vzorek 1.4 | Vzorek 1.5 |
| 1 | 592,6 | 635,4 | 647,2 | 507,5 | 451,2 |
| 2 | 293,3 | 403,4 | 569,1 | 419,7 | 349,8 |
| 3 | 434,5 | 490,3 | 557,5 | 382,2 | 302,2 |
| 4 | 335,5 | 511 | 566,9 | 538,7 | 329,7 |
| 5 | 462,7 | 527,2 | 496,7 | 460,4 | 347,4 |
| 6 | 331,5 | 494,2 | 388,6 | 355,6 | 381,2 |
| 7 | 472,7 | 494,2 | 513,2 | 518,4 | 361,5 |
| 8 | 332,1 | 524,7 | 585,2 | 425,2 | 357,5 |
| 9 | 384,9 | 517,8 | 513,7 | 393,7 | 405,7 |
| 10 | 322,7 | 537,8 | 519,3 | 547,2 | 358,5 |
| Aritmetický průměr | 396,2 | 513,6 | 535,7 | 454,9 | 364,5 |
| Směrodatná odchylka | 93,3 | 56,9 | 68,2 | 69,4 | 41,1 |
| Standartní chyba průměru | 29,5 | 18 | 21,6 | 22 | 13 |

Výsledky měření udávají, že nejvyšší hodnoty mikrotvrdomosti podle Vickerse bylo dosaženo u vzorku 1.3, kdy tato hodnota byla 535,7 Vickerse. Nejnižší hodnoty, tedy 364,5 Vickerse, bylo dosaženo u vzorku 1.5. Zvýšení výkonu došlo ke snížení tvrdosti podle Vickerse o 171,2 Vickerse, tedy o 32 %. Druhé nejnižší hodnoty bylo dosaženo u vzorku 1.1, a to 396,2 Vickerse. V tomto případě mělo zvýšení výkonu z 3100 W na 3300 W za následek nárůst tvrdosti podle Vickerse o 35 %.

V následujícím obrázku (Obr. 37) lze vidět grafické znázornění mikrotvrdomosti podle Vickerse H_{VT} jednotlivých vzorků. Chybové úsečky znázorňují standartní chybu průměru.



Obrázek 37. Porovnání tvrdosti podle Vickerse H_{VT} v závislosti na výkonu laseru.

Indentační hloubka

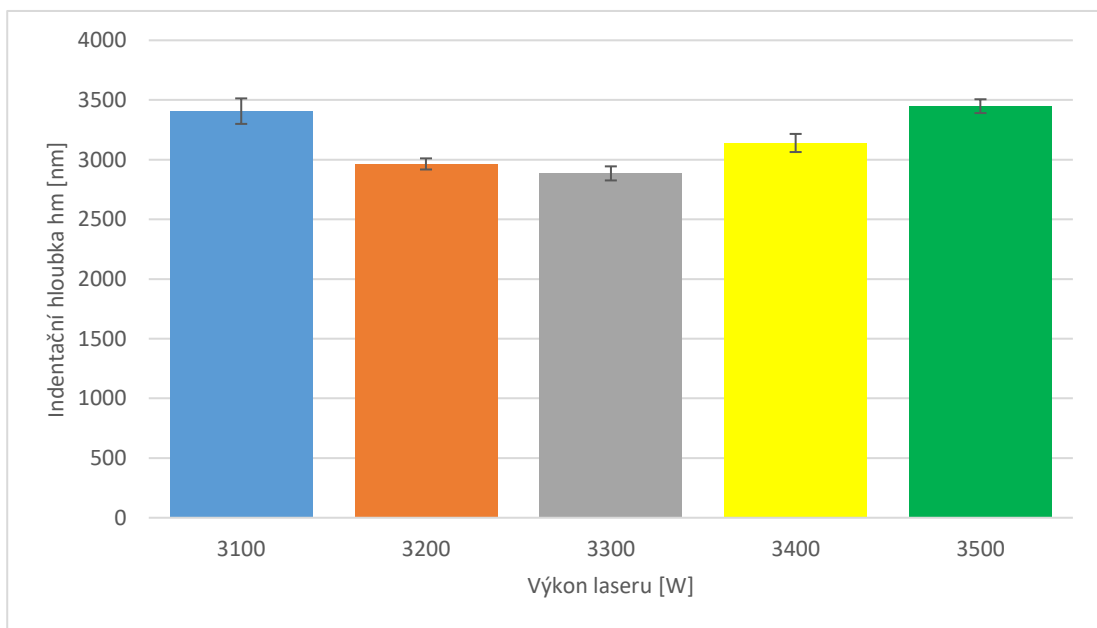
Udává hloubku vniknutí zkušebního tělesa do povrchu testovaného materiálu.

Tabulka 10. Naměřené hodnoty indentační hloubky

| Měření | Indentační hloubka h_m [nm] | | | | |
|--------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | Vzorek 1.1 | Vzorek 1.2 | Vzorek 1.3 | Vzorek 1.4 | Vzorek 1.5 |
| 1 | 2792,4 | 2639,9 | 2611,8 | 2960,7 | 3088 |
| 2 | 3828 | 3247,5 | 2778,2 | 3214,7 | 3484,9 |
| 3 | 3176 | 3007,3 | 2835,3 | 3414,6 | 3744,5 |
| 4 | 3639,4 | 2993,1 | 2807,1 | 2860,4 | 3588,8 |
| 5 | 3133,1 | 2932,1 | 2957,4 | 3115,6 | 3545,6 |
| 6 | 3678,8 | 2994,8 | 3324,6 | 3508,9 | 3355,1 |
| 7 | 3100,9 | 2994,8 | 2939,3 | 2929,4 | 3477,2 |

| | | | | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 8 | 3672,2 | 2954,5 | 2766 | 3192 | 3496,2 |
| 9 | 3408,7 | 2974,2 | 2909,5 | 3364,8 | 3246,8 |
| 10 | 3635,7 | 2903,8 | 2921,7 | 2837,1 | 3456,5 |
| Aritmetický průměr | 3406,5 | 2964,2 | 2885,1 | 3139,8 | 3448,4 |
| Směrodatná odchylka | 337,9 | 147,1 | 186,2 | 239,8 | 182,8 |
| Standartní chyba průměru | 106,9 | 46,5 | 58,9 | 75,8 | 57,8 |

V případě indentační hloubky jsme se zaměřili na nejnižší hodnotu, jelikož s rostoucí tvrdostí klesá hloubka indentace. Nejnižší hodnoty bylo dosaženo u vzorku 1.3 s výkonem 3300 W a to 2885,1 nm. Nejvyšší hodnoty naopak dosáhl vzorek číslo 1.1, s výkonem 3100 W, a to 3406,5 nm. V tomto případě došlo u vzorku s nižším výkonem ke zvětšení hloubky indentace o 18 % vůči vzorku 1.3. V následujícím obrázku (Obr. 38) lze vidět grafické znázornění indentační hloubky v závislosti na výkonu laseru. Chybové úsečky znázorňují standartní chybu průměru.



Obrázek 38 Porovnání indentační hloubky hm v závislosti na výkonu laseru.

5.3 Porovnání jednotlivých nastavení kalícího procesu

Ze zjištěných výsledků vyplývá jistá korelace mezi tvrdostí podle Vickerse H_{VT} a vtiskovou tvrdostí H_{IT} . Dále data potvrzují, že s rostoucí hodnotu tvrdosti i vtiskové tvrdosti klesá hloubka indentace. Jak je z výsledků patrné, tak zvyšování výkonu má pozitivní vliv na nárůst výsledné tvrdosti, ale pouze do bodu, kdy začne docházet k přehřátí kaleného materiálu. Při přílišném ohřátí materiálu nedochází k dostatečně rychlému

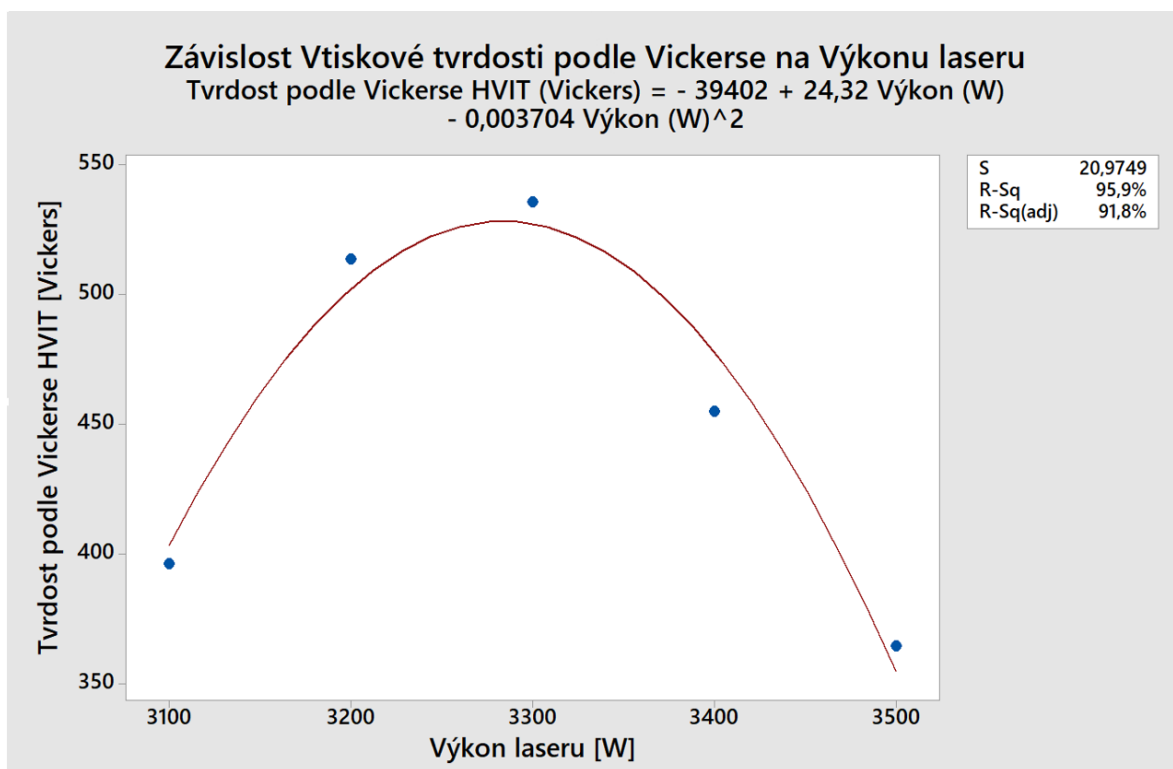
odvodu tepla dovnitř materiálu, tudíž není dosažena kritická rychlost ochlazování potřebná pro dosažení maximální tvrdosti kaleného materiálu.

5.4 Nalezení optimálního nastavení laseru

Pro nalezení optimálního nastavení výkonu laseru byla zvolena tvrdost podle Vickerse jako optimalizační parametr. Jednotlivé hodnoty byly zpracovány pomocí programu Minitab 17, kdy byl pro proložení dat funkcí využit kvadratický regresivní model a kubický regresivní model. Dále byla ověřena významnost jednotlivých proměnných těchto modelů pomocí programu TriloByte QC. Expert 3.3.

Kvadratický regresivní model

Na následujícím obrázku (Obr. 39) je závislost vtiskové tvrdosti podle Vickerse na Výkonu laseru proložena polynomicou funkcí druhého řádu. V tabulce (Tab. 11) jsou výsledky testování parametrů nalezeného modelu.



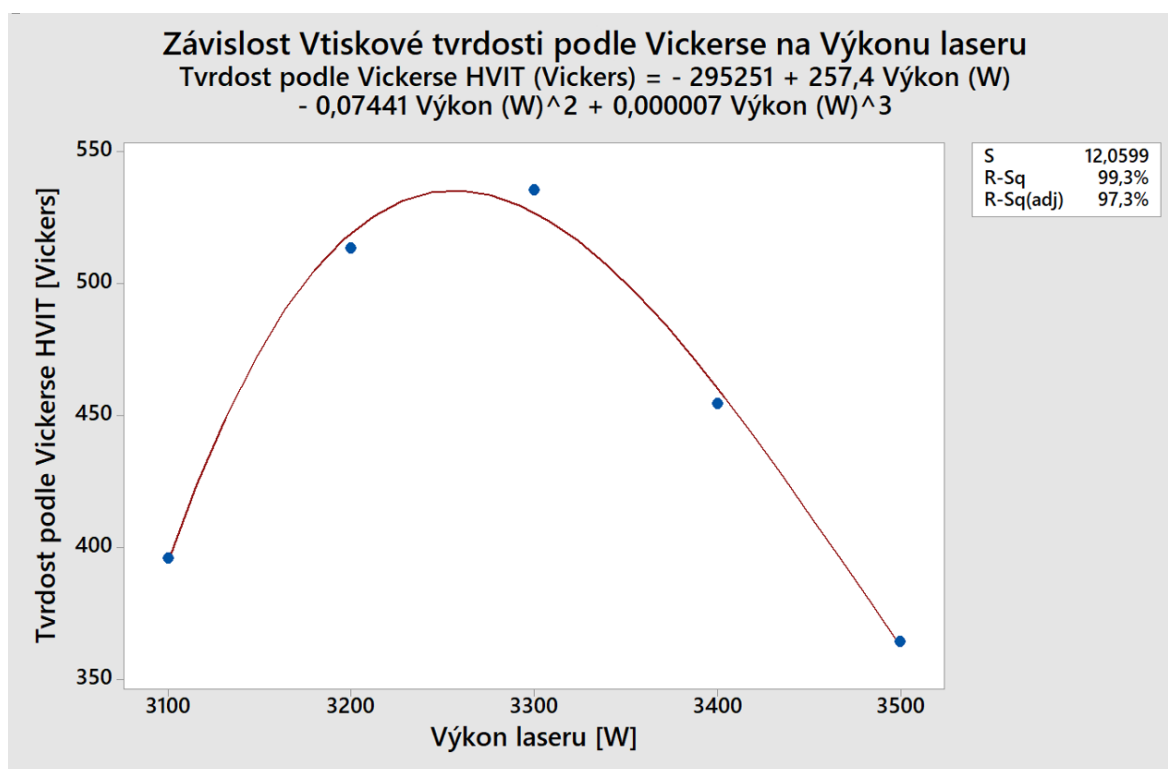
Obrázek 39 Polynomická funkce 2. řádu popisující tvrdost podle Vickerse H_{VIT} v závislosti na výkonu laseru.

Tabulka 11. Ověření parametrů pomocí programu TriloByte QC. Expert 3.3

| Odhady parametrů | | Polynomická funkce 2. řádu | |
|------------------|-------------|----------------------------|----------|
| Proměnná | Odhad | Směr.Odch. | Závěr |
| Abs | -39402,2543 | 5931,384931 | Významný |
| A | 24,32461429 | 3,599645706 | Významný |
| A ² | -0,00370414 | 0,00545313 | Významný |

Kubický regresivní model

Na následujícím obrázku (Obr. 40) je závislost vtiskové tvrdosti podle Vickerse na Výkonu laseru proložena polynomickou funkcí třetího řádu. V tabulce (Tab. 12) jsou výsledky testování jednotlivých parametrů nalezeného modelu.



Obrázek 40 Polynomická funkce 3. řádu popisující tvrdost podle Vickerse HVIT v závislosti na výkonu laseru.

Tabulka 12. Ověření parametrů pomocí programu TriloByte QC. Expert 3.3

| Odhady parametrů | | Polynomická funkce 3. řádu | |
|------------------|--------------|----------------------------|------------|
| Proměnná | Odhad | Směr.Odch. | Závěr |
| Abs | -295251,3886 | 93586,62776 | Nevýznamný |
| A | 257,4140059 | 85,23392887 | Nevýznamný |
| A ² | -0,074413202 | 0,025851289 | Nevýznamný |
| A ³ | 7,14E-06 | 2,61E-06 | Nevýznamný |

5.4.1 Výpočtový model nastavení výkonu laseru

Přestože kubický regresivní model popisuje naměřená data s vyšší přesností, tak při ověřování významnosti vyšly jednotlivé parametry jako nevýznamné. Z tohoto důvodu se pro popis vlivu výkonu laseru na tvrdost podle Vickerse jeví jako vhodnější kvadratický model, u kterého byly jeho parametry významné.

Toto zjištění, tedy použití kvadratického modelu pro popis změn v materiálu, které jsou vyvolané v důsledku aplikace tepelného zpracování koresponduje se zjištěním i jiných autorů [49,50], kteří ve svých studiích použily stejný typ regresního modelu.

Výpočet výkonu dle kvadratického regresivního modelu

$$\begin{aligned}y &= -39402 + 24,32x - 0,003704x^2 \\ \frac{dy}{dx} &= 0 \\ 0 &= 24,32 - 2 * 0,003704x \\ x &= \frac{24,32}{2 * 0,003703} = 3283,8 \text{ W}\end{aligned} \tag{4}$$

Jako optimální hodnota výkonu laseru vyšla hodnota 3283,8 W. Tato hodnota výkonu byla následně využita pro testování vlivu míry překrytí laserových paprsků (Kap. 6).

6 VLIV PŘEKRYTÍ LASEROVÝCH PAPRSKŮ

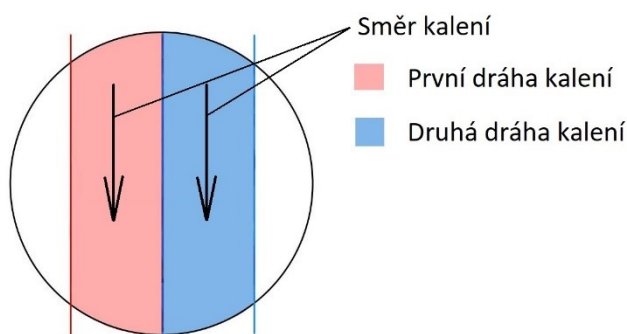
Tato část je zaměřena na zkoumání vlivu velikosti překrytí laserových paprsků. K tomuto účely byly vyrobeny nové zkušební vzorky, které byly následně zakaleny pomocí nových parametrů získaných v předchozí kapitole.

6.1 Příprava zkušebních vzorků pro zkoumání vlivu překrytí

V následující tabulce (Tab. 13) je uvedeno nastavení kalícího procesu při přípravě nové sady vzorků. U vzorků byly nastaveny různé hodnoty překrytí, kdy například u vzorku 2.1 je překrytí záporné, tedy byla mezi jednotlivými drahami kalení přítomna mezera. Velikost překrytí se postupně zvyšovala s krokem 3 mm, až po vzorek 2.4, kdy překrytí dosahuje velikosti 50 %.

Tabulka 13. Nastavení kalení s překrytím.

| Vzorek | Překrytí [mm] | Výkon laseru [W] | Šířka x délka paprsku [mm] | Rychlost hlavy [cm/min] | Vzdálenost kalící hlavy od vzorku [cm] | Úhel dopadu paprsku [°] |
|--------|---------------|------------------|----------------------------|-------------------------|--|-------------------------|
| 2.1 | -3 | 3284 | 12 x 7,5 | 45 | 24 | 25 |
| 2.2 | 0 | | | | | |
| 2.3 | 3 | | | | | |
| 2.4 | 6 | | | | | |



Obrázek 41. Schéma průběhu kalení

6.2 Naměřené výsledky

Na zakalených vzorcích (Obr. 42) lze vidět změnu zbarvení po zakalení. Rozdíly ve velikostech překrytí jsou snadno pozorovatelná pouhým pohledem. U druhého průjezdu lze pozorovat změnu v kvalitě výsledného povrchu. K této změně povrchu nejspíše došlo vlivem nahřátí materiálu vzorku po prvním průjezdu laserového paprsku, tedy u druhého průjezdu nejspíše nedocházelo k tak rychlému odvodu tepla.



2.1

2.2

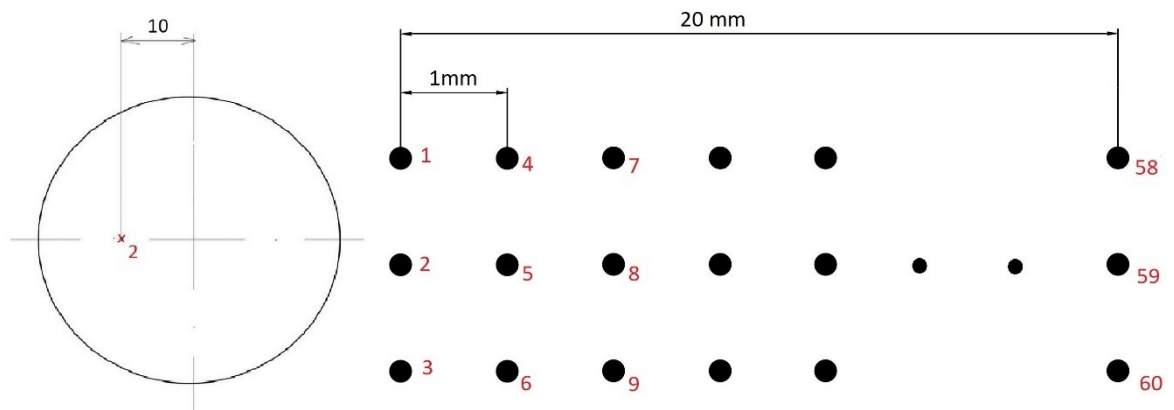
2.3

2.4

Obrázek 42. Zakalené zkušební vzorky, seřazeny postupně 2.1 až 2.4.

6.2.1 Mikrotvrдость

U vzorků byla měřena mikrotvrдость pomocí přístroje Micro-Combi Tester od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Průběh zkoušky probíhal stejně jako v kapitole 5.2.1 s tím rozdílem, že bylo provedeno pro každý vzorek celkem 60 měření. Na následujícím obrázku (Obr. 43) je zobrazeno schéma měření.

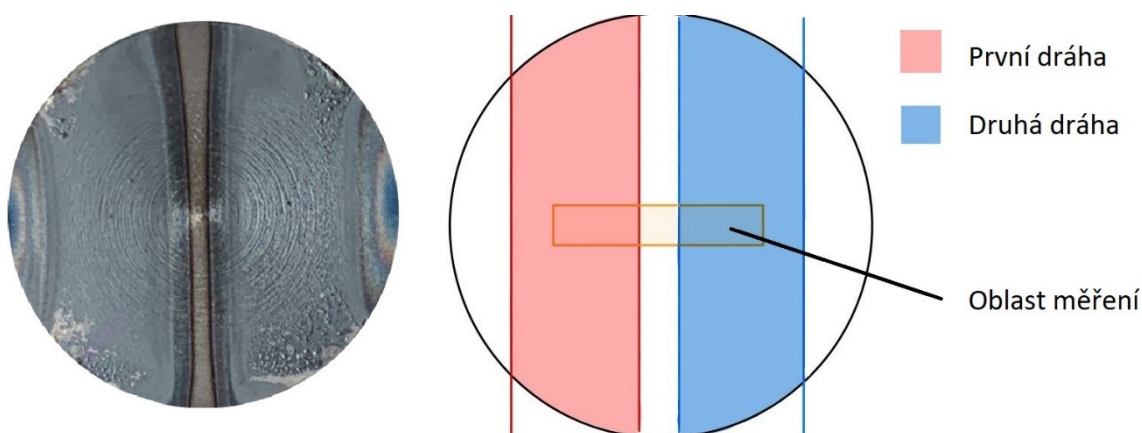


Obrázek 43. Schéma měření, matice bodů vniku indentoru.

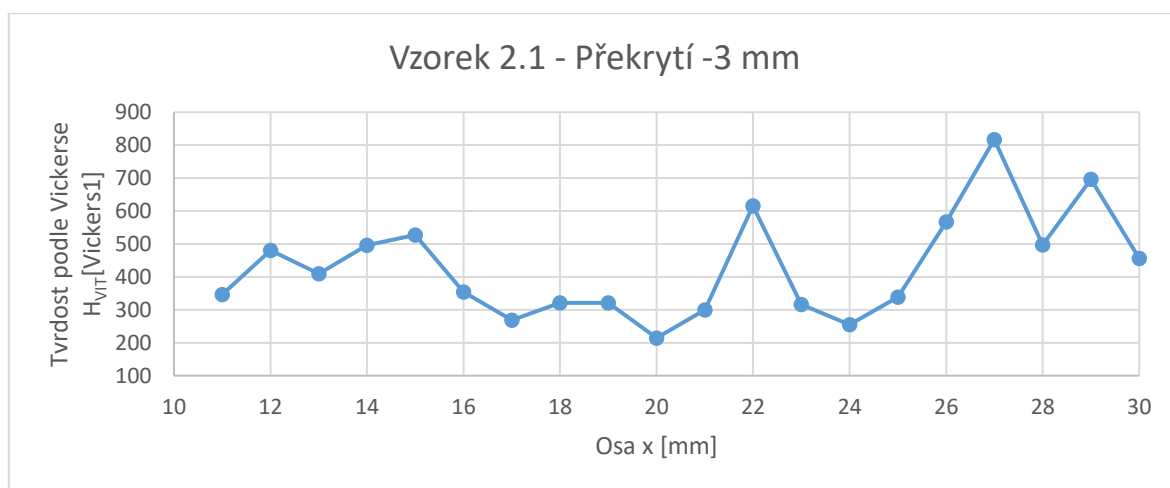
U jednotlivých vzorků byl posouzen vliv překrytí na výslednou mikrotvrдость podle Vickerse H_{VT} . Jelikož se jedná o měření tvrdosti v závislosti na poloze x zkušební vzorku, byly pro každou vzdálenost provedena 3 měření. Pro vyhodnocení a následnou tvorbu grafického znázornění byla pro každou vzdálenost vypočtena hodnota mikrotvrdsti podle Vickerse pomocí výpočtu aritmetického průměru tří příslušných měření.

Vzorek 2.1 – překrytí -3 mm

U vzorku 2.1 byla hodnota překrytí -3 mm, tedy v podstatě byla mezi jednotlivými drahami přítomna mezera o velikosti 3 mm. Na následujícím obrázku (Obr. 44) je zobrazen reálný vzorek po zakalení, dále je zde také zobrazeno schéma popisující jednotlivé kalící dráhy včetně oblasti měření mikrotvrdomosti. Na již zakaleném vzorku lze pozorovat, že zakalená zóna působí větší, než je znázorněno ve schématu. Jedná se ale především o tepelně ovlivněnou zónu, kdy bylo teplo do této zóny dopraveno vedením uvnitř materiálu, tedy k ohřevu tepelně ovlivněné zóny nedošlo vlivem přímého účinku laserového záření ale sekundárními jevy.



Obrázek 44. Zakalený vzorek 2.1; schéma kalení



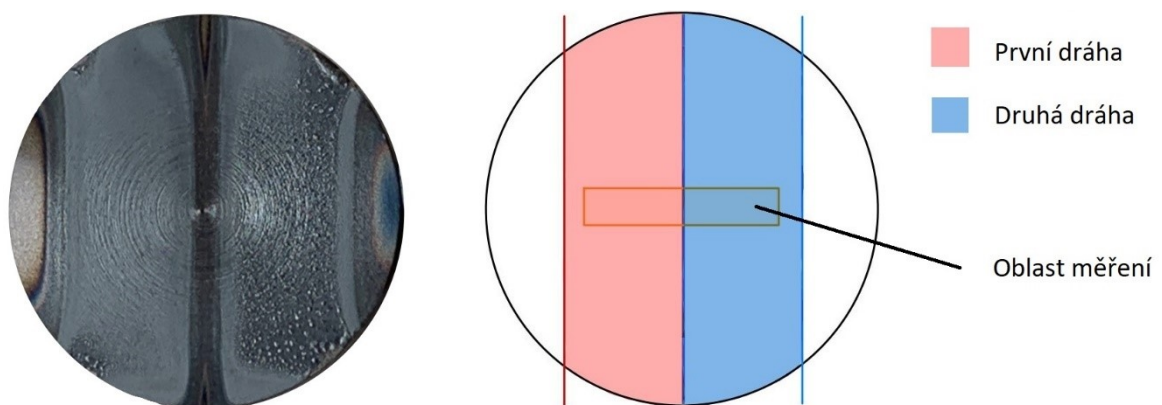
Obrázek 45. Porovnání mikrotvrdomosti v závislosti na poloze v ose x – vzorek 2.1

Na předchozím obrázku (Obr. 45) lze pozorovat graf průběhu tvrdosti podle Vickerse H_{VT} v závislosti na poloze ose x. Nejnižší hodnoty mikrotvrdomosti je dosaženo ve vzdálenosti 20 mm od levého kraje zkušební vzorku, tedy přesně uprostřed zkušební vzorku. V tomto místě nedošlo k zakalení, ani zde není patrná tepelně ovlivněná zóna. Nejvyšší

hodnoty naopak dosahuje bod ve vzdálenost 27 mm, tedy bod nacházející se uprostřed druhé dráhy kalení. Dále je z grafu patrné, že v oblasti první dráhy kalení mají výsledné hodnoty mikrotvrdoosti menší rozptyl, než je tomu v oblasti druhé dráhy kalení.

Vzorek 2.2 – překrytí 0 mm

U vzorku 2.2 byla zvolena hodnota překrytí 0 mm. V tomto případě byly jednotlivé dráhy zhotoveny těsně vedle sebe, tedy došlo k přesahu tepelně ovlivněných zón. Laserový paprsek druhé dráhy působil v oblasti již tepelně ovlivněné zóny první dráhy a zároveň oblast tepelného ovlivnění vzniklá během druhého skenování působila v již zakalené zóně vzniklé při kalení prvním. Na následujícím obrázku (Obr. 46) je zobrazen reálný vzorek po zakalení, dále je zde také zobrazeno schéma popisující jednotlivé kalící dráhy včetně oblasti měření mikrotvrdoosti.



Obrázek 46. Zakalený vzorek 2.2; schéma kalení



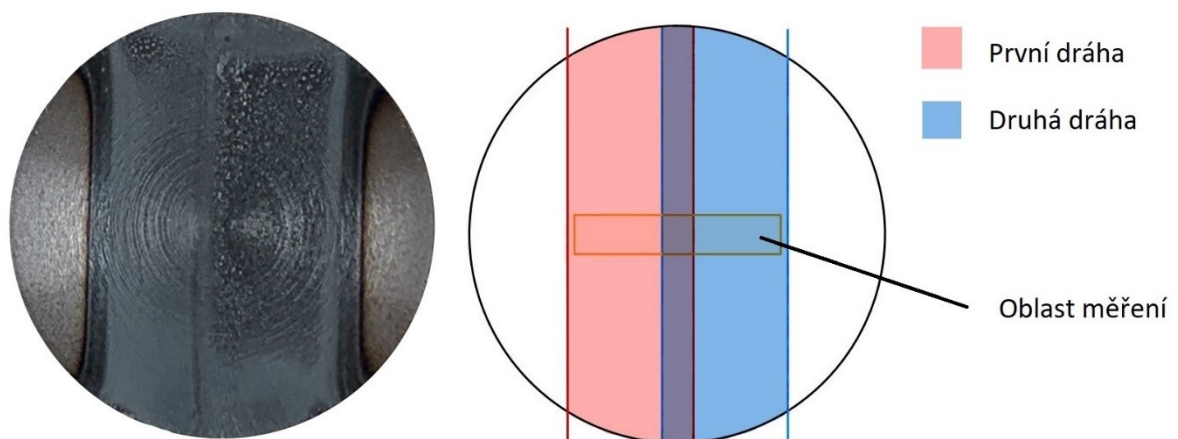
Obrázek 47. Porovnání mikrotvrdoosti v závislosti na poloze v ose x – vzorek 2.2

Na předchozím obrázku (Obr. 47) lze pozorovat graf průběhu tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} v závislosti na poloze ose x. Nejnižších hodnot mikrotvrdoosti je dosaženo ve vzdálenostech 22, 24 a 26 mm. Nejvyšší hodnoty je dosaženo ve vzdálenosti 29 mm. Při porovnání jednotlivých drah lze pozorovat, že u první dráhy vykazují hodnoty mikrotvrdoosti nižší

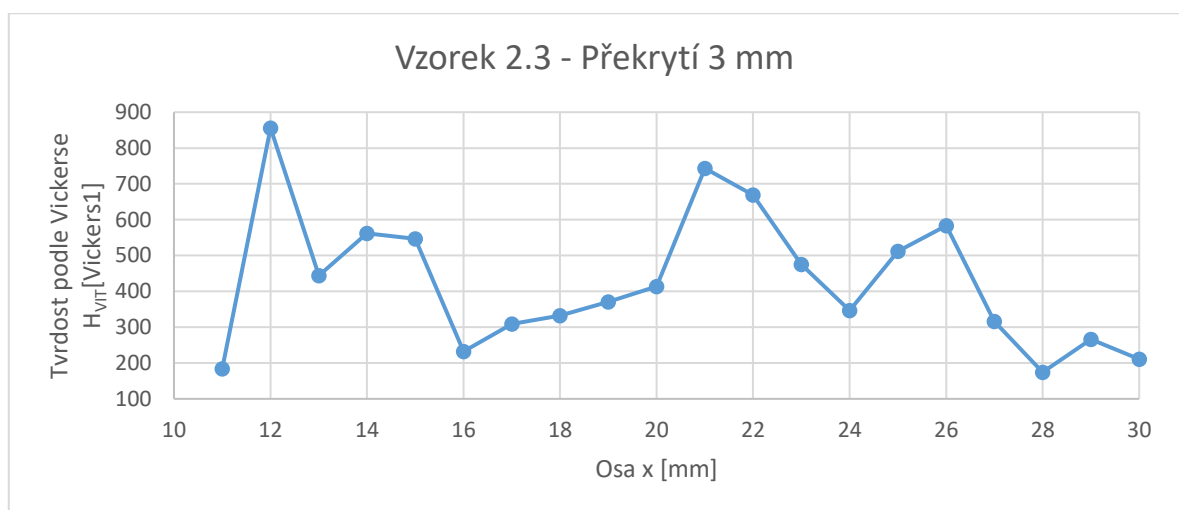
míru variability, než je tomu u dráhy druhé. Lze předpokládat, že k tomuto nerovnoměrnému zakalení druhé dráhy došlo vlivem zbytkového tepla zkušebního materiálu po prvním skenování, tedy nedocházelo k tak rychlému ochlazení materiálu při kalicím procesu.

Vzorek 2.3 – překrytí 3 mm

Vzorek 2.3 byl připraven s překrytím drah o velikosti 3 mm, což odpovídá 25 % překrytí. Na následujícím obrázku (Obr. 48) je zobrazen reálný vzorek po zakalení, dále je zde také zobrazeno schéma popisující jednotlivé kalicí dráhy včetně oblasti měření mikrotvrdomosti.



Obrázek 48. Zakalený vzorek 2.3; schéma kalení

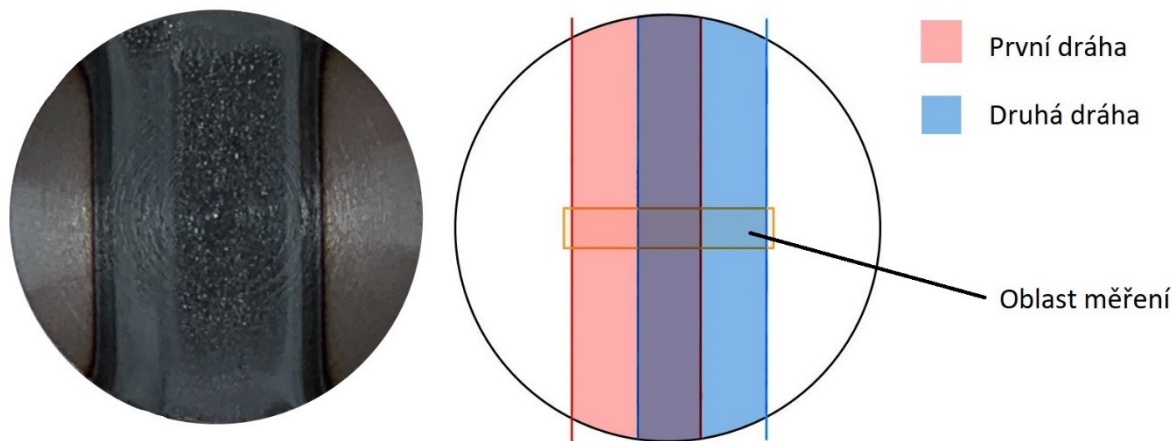


Obrázek 49. Porovnání mikrotvrdomosti v závislosti na poloze v ose x – vzorek 2.3

Na předchozím obrázku (Obr. 49) lze pozorovat graf průběhu tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} v závislosti na poloze ose x. Nejnižších hodnot mikrotvrdomosti bylo dosaženo ve vzdálenostech 9 a 28 mm od levého okraje zkušební vzorku. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo v bodě 12. Na grafu lze pozorovat pokles mikrotvrdomosti ve vzdálenosti 16 mm s následným postupným růstem do vzdálenosti 20 mm. Lze předpokládat, že k tomuto poklesu mikrotvrdomosti došli vlivem druhého skenování.

Vzorek 2.4 – překrytí 6 mm

Vzorek 2.4 byl zhotoven s překrytím drah 6 mm, tedy překrytí mělo hodnotu 50 % šířky paprsku. Na následujícím obrázku (Obr. 50) je zobrazen reálný vzorek po zakalení, dále je zde také zobrazeno schéma popisující jednotlivé kalící dráhy včetně oblasti měření mikrotvrdomosti.



Obrázek 50. Zakalený vzorek 2.4; schéma kalení



Obrázek 51. Porovnání mikrotvrdomosti v závislosti na poloze v ose x – vzorek 2.4

Na předchozím obrázku (Obr. 51) lze pozorovat graf průběhu tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} v závislosti na poloze ose x. Nejnižších hodnot mikrotvrdomosti je dosaženo ve vzdálenostech 12; 18; 26 a 30 mm. Nejvyšších hodnot mikrotvrdomosti bylo dosaženo v bodech 14; 22 a 29 mm. Z grafu lze vyčíst, že vlivem druhého skenování s překrytím 6 mm došlo ke vzniku dvou oblastí s propadem mikrotvrdomosti. Tyto propady se nacházejí v oblastech působení hrany kalícího paprsku. Toto zjištění koresponduje i se závěry, ke kterým došli autoři Moradi a KaramiMoghadam, kteří ve své studii [51] taktéž detekovali propady mikrotvrdomosti, které se nacházely v oblastech působení hrany kalícího paprsku.

6.3 Změna topografie povrchu

U zkoumaných vzorků byla zpozorována změna topografie povrchu při druhém skenování laserovým paprskem. Lze předpokládat, že k této změně došlo vlivem nahřátí materiálu při prvním průjezdu laserového paprsku. Z tohoto důvodu došlo k přehřátí materiálu, a tedy i pomalejšímu odvodu tepla při druhém skenování povrchu kalícím paprskem. Pro popis změny topografie povrchu bylo testování provedeno u vzorku 2.1, jelikož se jednalo o vzorek s nejnižšími změnami v povrchové vrstvě a u vzorku 2.4, u kterého naopak byly změny nejmarkantnější. Ke snímání povrchů zakalených vzorků byl použit profilometr Zygo NewView 9000 nacházející se v Laboratorním centru U15 Univerzity Tomáše Bati.

Profilometr

Profilometr Zygo NewView 9000 (Obr. 52) poskytuje vysokou všestrannost při bezkontaktním optickém profilování povrchů. Tento systém umožňuje snadno a rychle měřit velkou škálu typů povrchů, včetně hladkých, drsných, rovných, šikmých a stupňovitých. Všechna měření provedena na tomto přístroji jsou nedestruktivní, velmi rychlá a nevyžadují žádnou předpřípravu zkušebních vzorků [52].

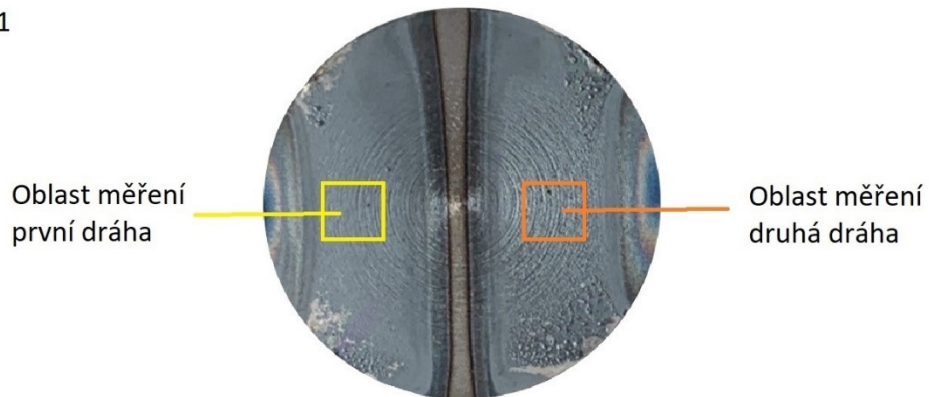


Obrázek 52. Profilometr Zygo NewView 9000 [52].

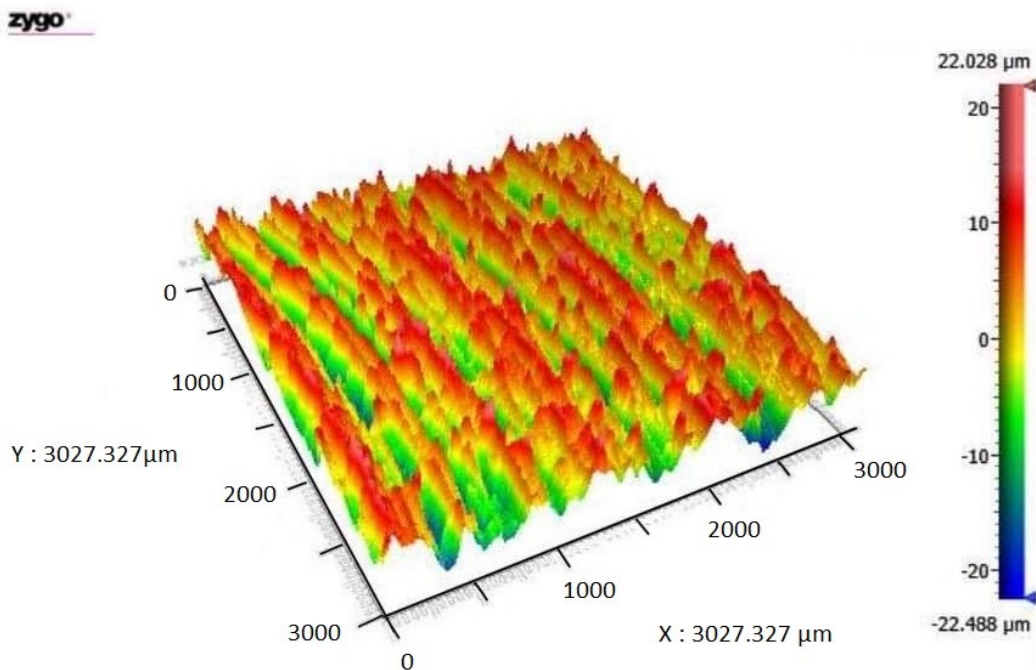
Vzorek 2.1

Na následujícím obrázku (Obr. 53) je zobrazena oblast snímání povrchu jednotlivých drah kalení. V tomto případě, kdy je přítomna mezera 3 mm mezi jednotlivými drahami, došlo pouze ke změně povrchového zabarvení, ale nedošlo k výrazné změně profilu povrchu. Topografie povrchu změřená v oblasti první dráhy kalení je zobrazena v obrázku 54, topografie oblasti druhé dráhy kalení je zobrazena v obrázku 55.

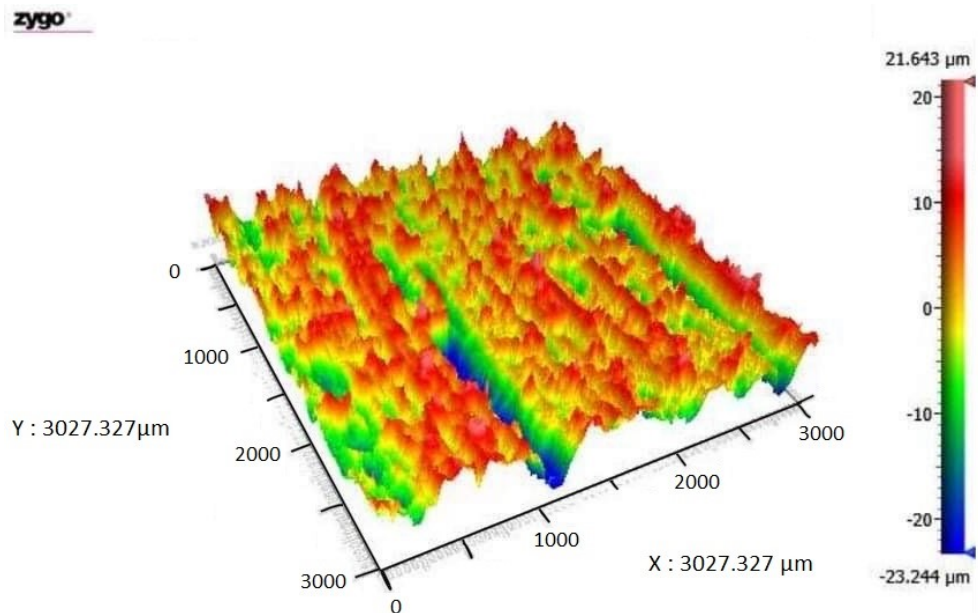
Vzorek 2.1



Obrázek 53. Oblasti měření topografie povrchu u vzorku 2.1



Obrázek 54. Topografie povrchu v oblasti první dráhy kalení – vzorek 2.1

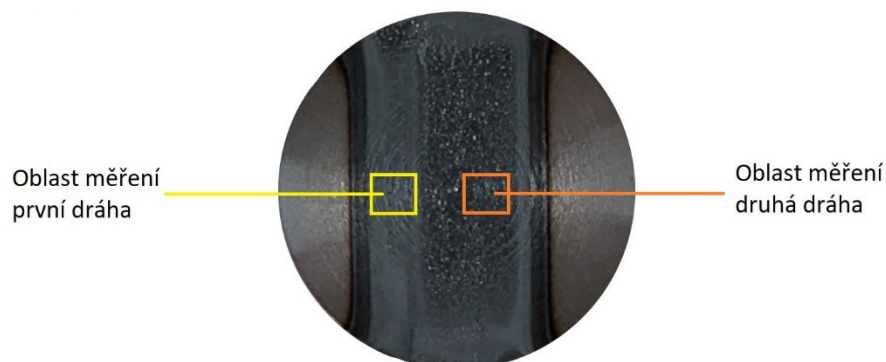


Obrázek 55. Topografie povrchu v oblasti druhé dráhy kalení – vzorek 2.1

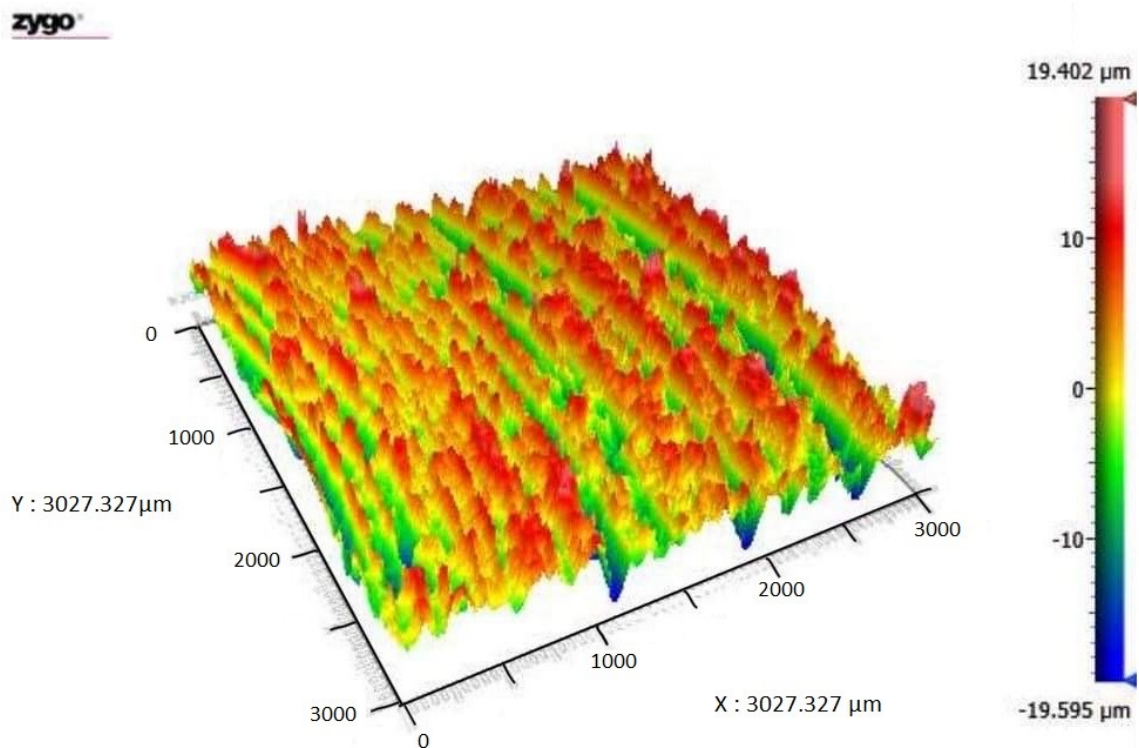
Vzorek 2.4

Na následujícím obrázku (Obr. 56) lze pozorovat změnu povrchu u vzorku s překrytím 6 mm. Při pozorování 3D skenu topografie povrchu vzniklém po prvním průjezdu kalící hlavičky (Obr. 57) lze pozorovat, že vlivem zakalení nedošlo ke změně profilu, zatímco u druhého průjezdu kalícího paprsku (Obr. 58) došlo k velkému ovlivnění povrchu zakalené oblasti. V těchto oblastech lze pozorovat vznik vystouplých úseků vzniklých zakalením. V těchto oblastech nejspíše došlo k degradaci kaleného materiálu vlivem přehřátí. K tomuto přehřátí dochází, jelikož byl matečný materiál před druhým skenováním již přehřát skenováním prvním. Dále k tomuto jevu nejspíše dochází i vlivem změny absorptivity materiálu, kdy v již zakalené zóně dochází ke snížení reflektivity, tedy i nárůstu pohlcování laserového záření. Výrobek s takto vzniklými výstupky v povrchové vrstvě by měl před praktickou aplikací podstoupit nějakou formu dokončovací operace.

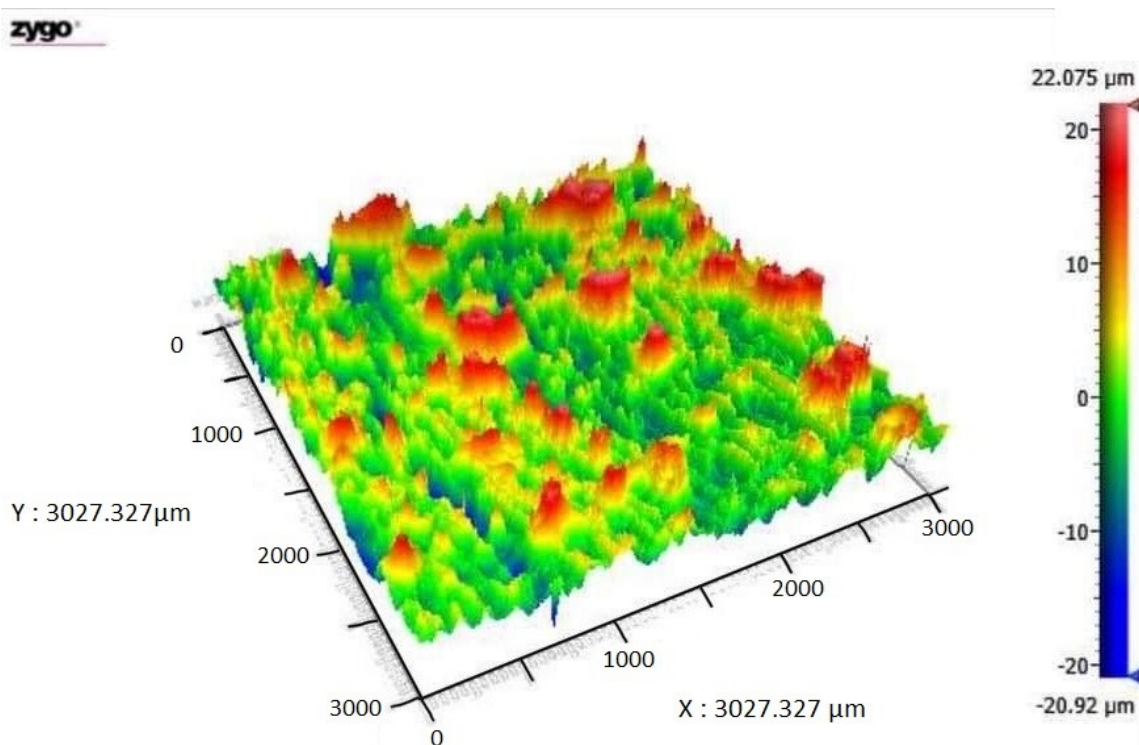
Vzorek 2.4



Obrázek 56. Oblasti měření topografie povrchu u vzorku 2.4



Obrázek 57. Topografie povrchu v oblasti první dráhy kalení – vzorek 2.4



Obrázek 58. Topografie povrchu v oblasti druhé dráhy kalení – vzorek 2.4

6.4 Diskuse výsledků

Z výsledků je zřejmé, že vlivem zakalení došlo k nárustu mikrovrstvy zkušebních vzorků. U všech vzorků došlo k částečnému přehřátí v oblasti druhé kalící stopy, což mělo za následek získání méně rovnoměrné výsledné mikrovrstvy. Bylo zjištěno, že lze volbou velikosti překrytí ovlivnit výsledné mechanické vlastnosti zakalené součásti.

Kalící paprsek má díky laserové kalící hlavici homogenní teplotní pole. Při působení na povrch materiálu dochází k akumulování většího množství tepla ve středu kalící stopy, než je tomu v případě krajních zón průjezdu paprsku. V krajních oblastech je tedy výsledná tvrdost menší, než je tomu ve středu zakalené zóny. Pomocí vhodně zvolené velikosti překrytí můžeme tento problém částečně eliminovat, kdy vlivem druhého skenování dojde v těchto oblastech k nárustu tvrdosti. Zároveň ale při překrytí dochází ke vzniku zón se sníženou tvrdostí. Tyto zóny se nacházejí pár milimetrů od místa působení hrany kalící stopy, a to jak u první dráhy, tak i u dráhy druhé. Tuto změnu mikrovrstvy lze dobře pozorovat v grafu průběhu mikrovrstvy v závislosti na ose x vzorku 2.4 (Obr. 51).

Autoři Moradi a KaramiMoghadam ve své práci [51] při zkoumání vlivu velikosti překrytí došli k podobnému zjištění, kdy při překrytí o velikosti 50 % šířky dráhy také detekovali propady mikrovrstvy, které se nacházely nedaleko hranic oblasti překrytí.

Zakalení zkušebních vzorků také způsobilo změnu v topografii povrchu. K této změně docházelo především v oblasti druhé stopy kalení. Lze předpokládat, že k této změně došlo oxidací oceli vlivem přehřátí. K tomuto přehřátí došlo, jelikož byl materiál již tepelně ovlivněn prvním průchodem laserového paprsku. Dále došlo ke zvýšení pohltivosti záření testovaného materiálu v oblasti zakalení a v tepelně ovlivněné zóně vzniklé po prvním průchodu laseru, což také přispělo, k již zmíněnému přehřátí. Pro částečné odstranění tohoto problému by bylo vhodné před provedením dalšího skenování vyčkat, než testovaný materiál zchladne na teplotu okolí.

Autorům Ren at al. v práci [53] zkoumající vliv rychlosti pohybu kalící hlavy na výslednou hloubku zakalení také vznikla tato degradovaná povrchová vrstva materiálu. Dle autorů se jednalo o oxidaci způsobenou přehřátím materiálu, což potvrzuje náš předpoklad.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo seznámení se s využitím laserových technologií v průmyslu, a to zejména při využití v oblasti tepelného zpracování ocelí. Laserové technologie nachází čím dál větší uplatnění v průmyslu zejména díky existenci velkého množství laserů o různých výkonech, délce trvání pulsů a možnosti tvarovat oblast působení laserového paprsku díky optickým členům.

V praktické části bylo cílem posoudit vliv velikosti překrytí laserového paprsku na výsledné mechanické vlastnosti testovaného materiálu EN C45. Pro tyto účely bylo nutné nejprve nalézt optimální nastavení, které by bylo následně použito pro zkoumání překrytí.

Zkušební vzorky byly připraveny ve firmě Kovomont Přerov, kde byly následně také v kalícím středisku zakaleny podle příslušného nastavení. U těchto vzorků byla změřena mikrotvrдость a následně pomocí regresní analýzy určeno vhodné nastavení výkonu laseru.

Pomocí takto získaného nastavení byly připraveny další zkušební vzorky s různou mírou překrytí. U těchto vzorků byla změřena mikrotvrдость a také byl proveden 3D sken topografie povrchu. Překrytí kalících stop mělo za následek nárůst hodnoty mikrotvrdsti uprostřed oblasti překrytí, ale zároveň vedlo k propadu mikrotvrdsti nedaleko hranic oblasti překrytí. Dále při druhém skenování laserovým paprskem došlo ke vzniku vystouplých struktur pozorovatelných na povrchu v oblasti druhé dráhy kalení. K této degradaci materiálu došlo vlivem přehřátí materiálu.

Vlivem zakalení došlo u všech vzorků k nárůstu mikrotvrdsti. Bylo zjištěno, že velikost překrytí má vliv na výsledné mechanické vlastnosti a vhodnou volbou strategie pohybu kalící hlavičky lze tyto vlastnosti podle požadavků měnit.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BIFFI, C.A., J. FIOCCHI a A. TUISSI. Relevant aspects of laser cutting of NiTi shape memory alloys. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2022, **19**, 472-506 [cit. 2023-02-21]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2022.03.146
- [2] STEEN, William M. a Jyotirmoy MAZUMDER. *Laser Material Processing* [online]. 4th. London: Springer London, 2010 [cit. 2022-12-10]. ISBN 978-1-84996-061-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-84996-062-5
- [3] NARESH a Pankaj KHATAK. Laser cutting technique: A literature review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, **56**, 2484-2489 [cit. 2023-02-21]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.08.250
- [4] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KAREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění – 5. díl: Výroba a technologie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, **5** [cit. 2023-02-21]. ISSN 80504. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil>
- [5] KATAYAMA, Seiji. Fundamentals and Features of Laser Welding. In: KATAYAMA, Seiji. *Fundamentals and Details of Laser Welding* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2020, s. 35-55 [cit. 2023-02-22]. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. ISBN 978-981-15-7932-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-15-7933-2_3
- [6] HONG, Kyung-Min a Yung C. SHIN. Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **245**, 46-69 [cit. 2023-02-22]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.02.008
- [7] Laserové svařování. In: *LaserTherm* [online]. [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu>
- [8] CENIGAONAINDIA, Asier, Fernando LIÉBANA, Aitzol LAMIKIZ a Zelmar ECHEGOYEN. Novel Strategies for Laser Joining of Polyamide and AISI 304. *Physics Procedia* [online]. 2012, **39**, 92-99 [cit. 2021-11-21]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2012.10.018
- [9] JUNG, K.W., Y. KAWAHITO, M. TAKAHASHI a S. KATAYAMA. Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel. *Materials & Design* [online]. 2013, **47**, 179-188 [cit. 2021-11-21]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2012.12.015
- [10] CHEON, J. a S.-J. NA. Relation of joint strength and polymer molecular structure in laser assisted metal and polymer joining. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. 2014, **19**(8), 631-637 [cit. 2021-11-21]. ISSN 1362-1718. Dostupné z: doi:10.1179/1362171814Y.0000000236
- [11] CSIZÉR, Tamás, Tamás TEMESI a László MOLNÁR. MECHANICAL AND OPTICAL INVESTIGATION OF LASER WELDED STRUCTURAL STEEL - POLY(METHYL-METHACRYLATE) HYBRID JOINT STRUCTURES. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* [online]. 2019, **25**, 12-16 [cit. 2021-11-21]. ISSN 2336-5382. Dostupné z: doi:10.14311/APP.2019.25.0012
- [12] HUANG, Yijie, Xiangdong GAO, Bo MA a Yanxi ZHANG. Interface Formation and Bonding Mechanisms of Laser Welding of PMMA Plastic and 304 Austenitic Stainless Steel. *Metals* [online]. 2021, **11**(9) [cit. 2023-02-22]. ISSN 2075-4701. Dostupné z:

- doi:10.3390/met11091495
- [13] DONG, Longlong, Wenge CHEN, Lintao HOU, Jiaojiao WANG a Jiulong SONG. Metallurgical and mechanical examinations of molybdenum/graphite joints by vacuum arc pressure brazing using Ti-Zr filler materials. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **249**, 39-45 [cit. 2021-11-21]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.06.007
- [14] HOLTKAMP, Jens, Andreas ROESNER a Arnold GILLNER. Advances in hybrid laser joining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2010, **47**(9-12), 923-930 [cit. 2021-11-21]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-009-2124-6
- [15] ATANASSOVA, Victoria, Ivan KOSTADINOV a Petya PENKOVA. *Selective laser cleaning of corroded metal objects* [online]. In: . s. 030016- [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: doi:10.1063/1.5091160
- [16] ZHANG, Guangxing, Xueming HUA, Ye HUANG, Yuelong ZHANG, Fang LI, Chen SHEN a Jian CHENG. Investigation on mechanism of oxide removal and plasma behavior during laser cleaning on aluminum alloy. *Applied Surface Science* [online]. 2020, **506** [cit. 2023-02-22]. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2019.144666
- [17] *Nový nástroj pro čištění v průmyslu* [online]. In: . LASCAM systems s.r.o., 2015 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/novy-nastroj-pro-cisteni-v-prumyslu-laser/>
- [18] *Laser Shock Peening | LSP* [online]. HiLASE [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.hilase.cz/produkty/laser-shock-peening-lsp/>
- [19] CLAUER, Allan H. Laser Shock Peening, the Path to Production. *Metals* [online]. 2019, **9**(6) [cit. 2023-02-24]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9060626
- [20] R, Sundar, Ganesh P, Ram Kishor GUPTA et al. Laser Shock Peening and its Applications: A Review. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2019, **6**(4), 424-463 [cit. 2023-02-24]. ISSN 2196-7229. Dostupné z: doi:10.1007/s40516-019-00098-8
- [21] KADLAS BLÜMELOVÁ, Kristina. *Laser Shock Peening mnohonásobně prodlužuje životnost materiálů* [online]. In: . Technický týdeník: Business Media CZ, 2021 [cit. 2023-02-24].
- [22] Upgrading additively manufactured parts using laser shock peening. In: *Laser systems europe* [online]. Europa Science Ltd., 2022 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.lasersystemseurope.com/analysis-opinion/upgrading-additively-manufactured-parts-using-laser-shock-peening>
- [23] PAN, Xinlei, Liucheng ZHOU, Chenxi WANG et al. Microstructure and residual stress modulation of 7075 aluminum alloy for improving fatigue performance by laser shock peening. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2023, **184** [cit. 2023-02-24]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2022.103979
- [24] HATAMLEH, OMAR, JED LYONS a ROYCE FORMAN. Laser peening and shot peening effects on fatigue life and surface roughness of friction stir welded 7075-T7351 aluminum. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures* [online]. 2007, **30**(2), 115-130 [cit. 2023-02-24]. ISSN 8756-758X. Dostupné z: doi:10.1111/j.1460-2695.2006.01093.x
- [25] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.

- [26] TOTTEN, George E. *Steel heat treatment*. 2007. ISBN 0-8493-8455-9.
- [27] ARDILA-RODRÍGUEZ, L.A., B.R.C. MENEZES, L.A. PEREIRA, R.J. TAKAHASHI, A.C. OLIVEIRA a D.N. TRAVESSA. Surface modification of aluminum alloys with carbon nanotubes by laser surface melting. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2019, **377** [cit. 2023-02-23]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2019.124930
- [28] WU, Tso-Chang, Sameehan S. JOSHI, Yee-Hsien HO, Mangesh V. PANTAWANE, Subhasis SINHA a Narendra B. DAHOTRE. Microstructure and surface texture driven improvement in in-vitro response of laser surface processed AZ31B magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys* [online]. 2021, **9**(4), 1406-1418 [cit. 2023-02-23]. ISSN 22139567. Dostupné z: doi:10.1016/j.jma.2020.11.002
- [29] K.R., Rakesh, Srikanth BONTHA, Ramesh M.R., Mitun DAS a Vamsi Krishna BALLA. Laser surface melting of Mg-Zn-Dy alloy for better wettability and corrosion resistance for biodegradable implant applications. *Applied Surface Science* [online]. 2019, **480**, 70-82 [cit. 2023-02-23]. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2019.02.167
- [30] SIDDIQUI, Anas Ahmad a Avanish Kumar DUBEY. Recent trends in laser cladding and surface alloying. *Optics & Laser Technology* [online]. 2021, **134** [cit. 2023-02-23]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2020.106619
- [31] VALKOV, Stefan, Maria ORMANOVA a Peter PETROV. Surface Manufacturing of Materials by High Energy Fluxes. In: CHOWDHURY, Mohammad Asaduzzaman, ed. *Advanced Surface Engineering Research* [online]. InTech, 2018 [cit. 2023-02-23]. ISBN 978-1-78984-339-2. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.79874
- [32] TAYLOR-SMITH, Kerry. *What is Laser Surface Alloying?* [online]. AZoOptics, 2019 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=1595>
- [33] LIU, Yanan, Ye DING, Lijun YANG, Ronglu SUN, Tiangang ZHANG a Xuejiao YANG. Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, **66**, 341-363 [cit. 2023-02-23]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.03.061
- [34] ZHU, Lida, Pengsheng XUE, Qing LAN, Guiru MENG, Yuan REN, Zhichao YANG, Peihua XU a Zhe LIU. Recent research and development status of laser cladding: A review. *Optics & Laser Technology* [online]. 2021, **138** [cit. 2023-02-23]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2021.106915
- [35] BABU, P. Dinesh, K.R. BALASUBRAMANIAN a G. BUVANASHEKARAN. Laser surface hardening: a review. *International Journal of Surface Science and Engineering* [online]. 2011, **5**(23) [cit. 2022-12-10]. ISSN 1749-785X. Dostupné z: doi:10.1504/IJSURFSE.2011.041398
- [36] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 1: struktury kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05248-8.
- [37] GRUM, Janez a A ACT. Comparison of different techniques of laser surface hardening. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*. 2007, **24**, 17-25.
- [38] SANCHO, Paula, M. Angeles MONTEALEGRE, Jesús DOMINGUEZ, Piera ALVAREZ a Juan ISAZA. Dynamic control of laser beam shape for heat treatment. *Journal of Laser Applications* [online]. 2018, **30**(3) [cit. 2023-02-03]. ISSN 1042-346X. Dostupné z: doi:10.2351/1.5040647
- [39] TARCHOUN, Baha, Abderrazak El OUAFI a Ahmed CHEBAK. Experimental Investigation of Laser Surface Hardening of AISI 4340 Steel Using Different Laser Scanning Patterns. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*

- [online]. 2020, **08**(02), 9-26 [cit. 2023-02-01]. ISSN 2327-4077. Dostupné z: doi:10.4236/jmmce.2020.82002
- [40] DEWI, Handika Sandra, Andreas FISCHER, Joerg VOLPP, Thomas NIENDORF a Alexander F.H. KAPLAN. Microstructure and mechanical properties of laser surface treated 44MnSiVS6 microalloyed steel. *Optics & Laser Technology* [online]. 2020, **127** [cit. 2023-02-04]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2020.106139
- [41] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [42] ŁAWRYNOWICZ, Z. Rationalisation of Austenite Transformation to Upper or Lower Bainite in Steels. *Advances in Materials Science* [online]. 2014, **14**(2), 14-23 [cit. 2023-04-17]. ISSN 2083-4799. Dostupné z: doi:10.2478/adms-2014-0006
- [43] *Bolzano: Přehled vlastností ocel iC45* [online]. Bohdan Bolzano, s.r.o., 2020 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-c45>
- [44] *LDM DIODE LASER* [online]. LASERLINES, 2018 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.laserlines.co.uk/products/l dm-series/>
- [45] *M-20iA/35M** [online]. FANUC, 2019 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://www.fanucamerica.com/cmsmedia/datasheets/M-20iA_35M%20Product%20Information_299.pdf
- [46] *Vybavení: Kalící hlavice* [online]. 2019 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.laskal.cz/vybaveni/>
- [47] *CSM Instruments* [online]. SMTNET, 2021 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: https://smtnet.com/company/index.cfm?fuseaction=view_company&company_id=53901
- [48] ZÁHORA, Jiří. *Učebnice statistiky*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, 2015. ISBN 978-80-88176-00-8.
- [49] BACCHI, Linda, Fabio BIAGINI, Serena CORSINOVI, Marco ROMANELLI, Michele VILLA a Renzo VALENTINI. Influence of Thermal Treatment on SCC and HE Susceptibility of Supermartensitic Stainless Steel 16Cr5NiMo. *Materials* [online]. 2020, **13**(7) [cit. 2023-05-11]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13071643
- [50] BORISADE, S.G., O.O. AJIBOLA, A.O. ADEBAYO a A. OYETUNJI. Development of mathematical models for the prediction of mechanical properties of low carbon steel (LCS). *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **38**, 1133-1139 [cit. 2023-05-11]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.07.134
- [51] MORADI, Mahmoud a Mojtaba KARAMIMOGHADAM. High power diode laser surface hardening of AISI 4130; statistical modelling and optimization. *Optics & Laser Technology* [online]. 2019, **111**, 554-570 [cit. 2023-05-08]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2018.10.043
- [52] *NewView™ 9000 with Coherence Scanning Interferometry Technology* [online]. Zygo Corporation, 2022 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.zygo.com/products/metrology-systems/3d-optical-profilers/newview-9000>
- [53] REN, Dongdong, Pengjun ZHANG, Jiahui YU, Yangwu YAO a Xiaoyang LI. Study on the quenching depth and surface hardness of metal materials by laser quenching variable parameters. *Frontiers in Physics* [online]. 2023, **10** [cit. 2023-05-11]. ISSN 2296-424X. Dostupné z: doi:10.3389/fphy.2022.1115447

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-------------------|---|
| Obr. | Obrázek |
| Tab. | Tabulka |
| W/mm ² | Watt na milimetr čtverečný (měrný výkon) |
| s | sekunda |
| tj. | to je |
| CO ₂ | Oxid uhličitý |
| Nd: YAG | Neodym: yttrito-hlinitý granát |
| mm | milimetr |
| et al. | a jiní |
| NiTi | Nikl titan |
| MIG | Svařování kovu v inertním plynu |
| TIG | Svařování netavící se elektrodou v inertním plynu |
| LTJ | Transmisivní laserové spojování |
| LCJ | Kondukční laserové svařování |
| W | Watt |
| N | Newton |
| LIFTEC | Laser induced fusion technology |
| POM | Polyoxymethylen |
| LSP | laserové vyklepávání |
| GPa | Giga Pascal |
| ns | nanosekunda |
| J | Joule |
| nm | nanometr |
| Ra | střední aritmetická odchylka profilu |
| Rt | celková drsnost |
| J/mm ² | Joule na milimetr čtverečný (hustota energie) |
| LC | laserové navařování |
| LSA | laserové legování povrchu |
| mm/s | milimetr za sekundu (rychlost) |
| Q | tok energie |
| °C | stupně celsia |
| ° | stupeň |

| | |
|----------------------|--|
| T | teplota |
| Fe-Fe ₃ C | Metastabilní soustava železo – karbid železa |
| M _s | start růstu martenzitu |
| M _f | konec růstu martenzitu |
| HRC | Tvrдость podle Rockwella typ C |
| kg | kilogram |
| H _{IT} | Vtisková tvrдость |
| H _{VIT} | mikrotvrдость podle Vickerse |
| hm | indentační hloubka |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1. Rozložení aplikací laseru v závislosti hustoty energie na době působení. [2] .. | 10 |
| Obrázek 2. Rozdílné metody vrtání pomocí laseru [2]. | 11 |
| Obrázek 3. Interakce na čele řezu: a) optický přenos energie, b) přenos hmoty a pohybového momentu [2]. | 13 |
| Obrázek 4. Tepelná interakce s materiálem: a) využití dlouhého laserového pulsu, b) využití krátkého laserového pulsu [1]. | 14 |
| Obrázek 5. a) princip indukčního svařování, b) princip hlubokého svařování [7]. | 15 |
| Obrázek 6. Výsledky tahových zkoušek spojů CFRP s pozinkovanou ocelí provedených za různých podmínek spojování [9]. | 16 |
| Obrázek 7. Mez pevnosti v závisti na povrchové úpravě kovu [14]. | 18 |
| Obrázek 8. Princip laserového čištění [17]. | 19 |
| Obrázek 9. Princip laserového vyklepávání [22]. | 20 |
| Obrázek 10. Porovnání drsností při zpevnění povrchu [24]. | 21 |
| Obrázek 11. Princip laserového natavování povrchu [28]. | 23 |
| Obrázek 12. Morfologie povrchu laserem tavených vzorků: a) Snímaná oblast b) 12,5 J/mm ² c) 25 J/mm ² d) 45 J/mm ² [29]. | 24 |
| Obrázek 13. Základní princip metody a, laserového navařování b, laserového legování [31]. | 25 |
| Obrázek 14. Snímek řezu: a) vrstvy vzniklé laserovým navařováním, b) laserem legované povrchové vrstvy [30]. | 25 |
| Obrázek 15. Hloubka zakalené vrstvy v závislosti na rychlosti skenování [25]. | 29 |
| Obrázek 16. Vliv teploty na pohlcování laserového záření [37]. | 31 |
| Obrázek 17. Strategie kalení [39]. | 32 |
| Obrázek 18. Rozložení obdélníkového pole na kruhové [38]. | 33 |
| Obrázek 19. Přizpůsobení teplotního obdélníkového pole s využitím různých rychlostí pohybu kruhové paprsku [38]. | 34 |
| Obrázek 20. Optické soustavy s výslednou velikostí paprsku. a, Gaussovo rozložení b, čtvercové s homogenním rozložením tepelného účinku c, bodové pole získané pomocí difrakčního optického členu [40]. | 34 |
| Obrázek 21. Část diagramu Fe-Fe ₃ C [41]. | 35 |
| Obrázek 22. Křivky chladnutí ocelí pro střed (S) a povrch (P) kalených součástí s využitím více kalících metod v IRA diagramu (a – přímé, b – termální, c – izotermické, d – izotermické žhání) [26]. | 37 |
| Obrázek 23. Schématické znázornění mechanismu růstu pomocí podjednotkové nukleace a růstu [26]. | 39 |
| Obrázek 24. Schématické znázornění mechanismu formace horního a dolního austenitu [42]. | 39 |
| Obrázek 25. Schématické znázornění růstu perlitické kolonie [26]. | 40 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 26. Schématické znázornění teorie transformace martenzitu z austenitu [26]. | 41 |
| Obrázek 27. Prokalitelnost oceli C45 [43]. | 44 |
| Obrázek 28. Výkres zkušební vzorku. | 44 |
| Obrázek 29. Kalící středisko LASKAL. | 45 |
| Obrázek 30. Laserový zdroj LaserLine [44]. | 45 |
| Obrázek 31. Průmyslový robot FANUC M-20iA/35M [45]. | 46 |
| Obrázek 32. Kalící hlavice LaserLine [46]. | 47 |
| Obrázek 33. Zakalené vzorky, seřazeny postupně 1.1 až 1.5. | 48 |
| Obrázek 34. Micro-combi tester. | 49 |
| Obrázek 35. a, - náčrt zakalené oblasti; b, - schéma měření, matice vpichů mikrometru. | 50 |
| Obrázek 36. Porovnání vtiskové tvrdosti H_{IT} v závislosti na výkonu laseru. | 52 |
| Obrázek 37. Porovnání tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} v závislosti na výkonu laseru. | 53 |
| Obrázek 38 Porovnání indentační hloubky h_m v závislosti na výkonu laseru. | 54 |
| Obrázek 39 Polynomická funkce 2. řádu popisující tvrdost podle Vickerse H_{VIT} v závislosti na výkonu laseru. | 55 |
| Obrázek 40 Polynomická funkce 3. řádu popisující tvrdost podle Vickerse H_{VIT} v závislosti na výkonu laseru. | 56 |
| Obrázek 41. Schéma průběhu kalení | 58 |
| Obrázek 42. Zakalené zkušební vzorky, seřazeny postupně 2.1 až 2.4. | 59 |
| Obrázek 43. Schéma měření, matice bodů vniku indentoru. | 59 |
| Obrázek 44. Zakalený vzorek 2.1; schéma kalení | 60 |
| Obrázek 45. Porovnání mikrotvrdomosti v závislosti na poloze v ose x – vzorek 2.1 | 60 |
| Obrázek 46. Zakalený vzorek 2.2; schéma kalení | 61 |
| Obrázek 47. Porovnání mikrotvrdomosti v závislosti na poloze v ose x – vzorek 2.2 | 61 |
| Obrázek 48. Zakalený vzorek 2.3; schéma kalení | 62 |
| Obrázek 49. Porovnání mikrotvrdomosti v závislosti na poloze v ose x – vzorek 2.3 | 62 |
| Obrázek 50. Zakalený vzorek 2.4; schéma kalení | 63 |
| Obrázek 51. Porovnání mikrotvrdomosti v závislosti na poloze v ose x – vzorek 2.4 | 63 |
| Obrázek 52. Profilometr Zygo NewView 9000 [52]. | 64 |
| Obrázek 53. Oblasti měření topografie povrchu u vzorku 2.1 | 65 |
| Obrázek 54. Topografie povrchu v oblasti první dráhy kalení – vzorek 2.1 | 65 |
| Obrázek 55. Topografie povrchu v oblasti druhé dráhy kalení – vzorek 2.1 | 66 |
| Obrázek 56. Oblasti měření topografie povrchu u vzorku 2.4. | 66 |
| Obrázek 57. Topografie povrchu v oblasti první dráhy kalení – vzorek 2.4 | 67 |
| Obrázek 58. Topografie povrchu v oblasti druhé dráhy kalení – vzorek 2.4 | 67 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1. Hodnoty drsnosti po zpevnění povrchu [24]. | 21 |
| Tabulka 2. Charakteristika zdrojů ohřevu [25]. | 29 |
| Tabulka 3. Výhody a nevýhody různých zdrojů ohřevu [2,35]. | 30 |
| Tabulka 4. Pohltivost záření [35]. | 32 |
| Tabulka 5. Vybrané parametry laserového zdroje [44]. | 46 |
| Tabulka 6. Technické parametry FANUC M-20iA/35M [45]. | 47 |
| Tabulka 7. Nastavení kalícího procesu. | 48 |
| Tabulka 8. Naměřené hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT} | 51 |
| Tabulka 9. Naměřené hodnoty mikrotvrdosti podle Vickerse H_{VIT} | 52 |
| Tabulka 10. Naměřené hodnoty indentační hloubky | 53 |
| Tabulka 11. Ověření parametrů pomocí programu TriloByte QC. Expert 3.3 | 56 |
| Tabulka 12. Ověření parametrů pomocí programu TriloByte QC. Expert 3.3 | 56 |
| Tabulka 13. Nastavení kalení s překrytím. | 58 |