



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ LASEROVÉ SKENOVACÍ HLAVY PRO POVRCHOVÉ KALENÍ

USE OF LASER SCANNING HEAD FOR SURFACE HARDENING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Veronika Jedličková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Bc. Veronika Jedličková
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

Využití laserové skenovací hlavy pro povrchové kalení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ověřit možnost využití laserové skenovací svařovací hlavy pro povrchové kalení materiálů. Ověřit vliv variace skenovacích parametrů na vlastnosti zakalené vrstvy.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii povrchového kalení laserem včetně vytváření laserové stopy s rozkmitem laserového svazku. Osvojit si techniku bezkontaktního měření povrchové teploty. Osvojit si metody metalografického zkoumání zakalené vrstvy. Prostudovat vliv variace skenovacích parametrů na vlastnosti zakalené vrstvy.

Seznam doporučené literatury:

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

MORAVEC, Jaromír. Teorie svařování a pájení II: Speciální metody svařování. Liberec: TUL, 2008. ISBN 978-80-7372.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

JEDLIČKOVÁ Veronika: Využití laserové skenovací hlavy pro povrchové kalení

V diplomové práci byla řešena problematika laserového povrchového kalení pomocí dynamického rozkmitu laserového svazku. Teoretická část představuje samotnou technologii kalení a vhodná použití laserových zařízení. V rámci experimentu byl použit vláknový laser YLS 2000 a kalený materiál byla ocel 12050, která je vhodná pro laserové kalení. Byl zkoumán vliv dvou volených parametrů skenovací hlavy na výslednou strukturu a tvrdost zakalených vrstev. Na základě zjištěných výsledků byla doporučena volba optimálních parametrů pro shodné podmínky s experimentem.

Klíčová slova: laserové technologie, povrchové kalení, skenovací hlava, ocel 12 050, tvrdost

ABSTRACT

JEDLIČKOVÁ Veronika: Use of laser scanning head for surface hardening

The diploma thesis addressed the issue of laser surface hardening using dynamic oscillation of the laser beam. The theoretical part presents the hardening technology and suitable using of laser equipments. The fiber laser YLS 2000 was used in the experiment and the hardened material was steel 12 050, which is suitable for laser hardening. The influence of two selected parameters of the scan head on the resulting structure and hardness of hardening layers was examined. Based on the results, the choice of optimal parameters for identical conditions with the experiment was recommended.

Keywords: laser technology, surface hardening, scan head, steel 12 050, hardness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JEDLIČKOVÁ, Veronika. *Využití laserové skenovací hlavy pro povrchové kalení* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132383>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Využití laserové skenovací hlavy pro povrchové kalení vypracovala samostatně pod vedením doc. RNDr. Libora Mrňi, Ph.D. s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 21. 5. 2021

Veronika Jedličková

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé diplomové práce doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D. za jeho přístup a cenné rady. Dále Ing. Pavlu Doležalovi, Ph.D. za provedení zkoušek mikrotvrdomosti, Ing. Mgr. Haně Šebestové, Ph.D. za pomoc s vyhodnocením mikrostruktury a Ing. Petru Horníkovi za pomoc a rady při experimentu. Na závěr bych chtěla poděkovat své rodině a příteli za podporu v mém studiu.

Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR PROBLÉMU	10
1.1 Povrchového kalení	10
1.2 Chemicko-tepelné zpracování	11
2 LASERY	13
2.1 Vlastnosti laserového svazku.....	13
2.2 Absorpce materiálem	14
2.3 Rozdělení laserů	16
2.4 Lasery ve strojírenství	17
2.5 Aplikace laseru	20
3 KALENÍ	24
3.1 Druhy kalení	25
3.2 Povrchové kalení laserem	27
4 MATERIÁL OCEL	30
5 MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	32
6 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ	34
7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	37
7.1 Výběr vzorků	38
7.2 Makrostruktura a mikrotvrdost.....	38
7.3 Mikrostruktura	47
8 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ	50
9 ZÁVĚRY	51

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých zkratk a symbolů

Seznam obrázků

Seznam grafů

Seznam tabulek

Seznam příloh

Přílohy

ÚVOD [1], [2]

Vývoj laserových technologií a jejich aplikací postupně odhaloval obrovský potenciál kvantových generátorů. Díky svým unikátním vlastnostem má laserový paprsek velice široké uplatnění. Setkáváme se s ním takřka každý den, aniž bychom si to reálně uvědomovali, například jako součást tiskáren, kopírek, čteček čárových kódů nebo ukazovátek. Využití nalézá v mnoha oborech například v medicíně, strojírenství, astronomii a meteorologii. V rámci některých aplikací lze pozorovat snahu o nahrazení původních konvenčních metod a jiné nejsou bez jeho přítomnosti dokonce uskutečnitelné. Lasery se staly neodmyslitelnou součástí dnešního života. V České republice se nachází hned několik výzkumných laserových center, díky kterým se řadíme ke světové špičce.

Použití pro jednotlivé technologie v rámci strojírenství se liší především v nastavení odpovídajícího výkonu. V oblasti výroby se nejčastěji uplatňuje laserové řezání, svařování, gravírování, povrchové kalení a jiné aplikace. Mezi hlavní charakteristiky laserových procesů patří vysoké rychlosti ohřevu a ochlazení zpracovávaného materiálu. Významné výhody jsou tedy přítomnost malých deformací a dosažení výborných přesností. Pouze vyšší cenová dostupnost laserového zařízení představuje jejich nevýhodu.



Obr. 1: Laserem kalená vrstva [26]

1 ROZBOR PROBLÉMU [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]

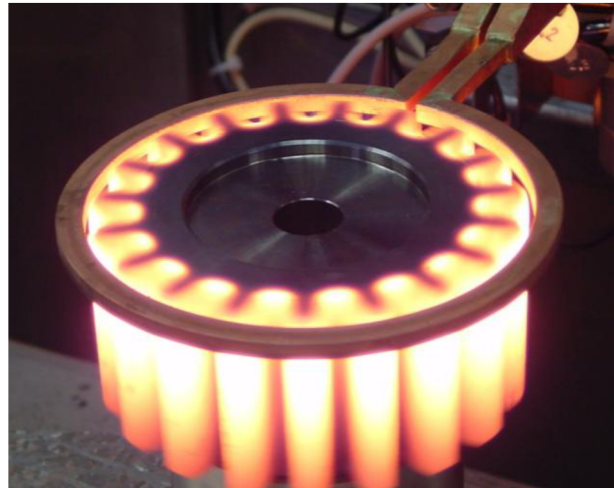
Řešeným problémem práce bylo ověření možnosti povrchově kalit materiál za pomoci laseru a skenovací optiky. Zkoumán byl vliv dvou zvolených parametrů skenovací hlavy na vlastnosti kalené vrstvy. Aplikace laserového kalení představuje ojedinělý způsob vytvrzování povrchu, mezi další patří různé metody povrchového kalení a tvrzení pomocí chemicko-tepelného zpracování.

1.1 Povrchového kalení [3], [5], [7], [8]

Jednotlivé druhy se liší způsobem dosažení ohřevu součásti na požadovanou kalicí teplotu. Mezi nejběžnější technologie patří:

- **Indukční kalení** – je nejvyužívanější metoda povrchového kalení. Je založena na ohřevu materiálu pomocí elektromagnetické indukce. Induktory jsou tvarované podle geometrie kalené součásti, aby vzdálenost od povrchu byla konstantní. Největší intenzita magnetického pole a hustota vzniklých vířivých proudů se nachází na povrchu a dochází k jeho ohřevu. Pro prudké ochlazení je použito kalicí médium. Hloubka prokalení je závislá na volbě frekvence. Při vyšších frekvencích je průnik magnetického pole menší a kalená vrstva je tenčí. Pomocí frekvence je tak proces dobře regulovatelný a lze lehce automatizovat.

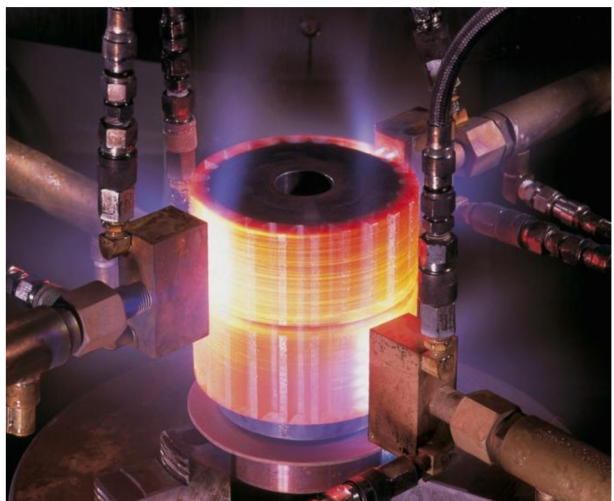
Veliký vliv na indukční ohřev mají především magnetické vlastnosti kalených kovů. V případě slitin železa nad Curieho teplotou dochází k zvýšení průniku magnetického pole a zpomalení ohřevu. Lokalizovaného ohřevu lze docílit pomocí koncentrátorů magnetického pole. Proces je velice rychlý, dochází při něm k malému okujení povrchu a dosahuje vysoké rozměrové přesnosti.



Obr. 2: Indukční kalení [8]

- **Kalení plamenem** – je založeno na ohřevu povrchu pomocí kyslík-acetylenového nebo kyslík-hydrogenového plamene s následným okamžitým ochlazením vodní nebo olejovou sprchou či ponořením do lázně. Ohřev lze hůře lokalizovat a je nerovnoměrný. Rychlost ohřevu je pomalejší a do materiálu je vneseno větší množství tepla než v případě indukce. To může způsobovat přehřátí, zhrubnutí zrna a možné deformace součásti. Při menších součástech je nebezpečí celkového prokalení. Výraznou výhodou jsou nízké náklady. Tato technologie se dále dělí na čtyři metody:

- jednorázové (stacionární),
- postupné,
- otočné („spinning“),
- kombinované.



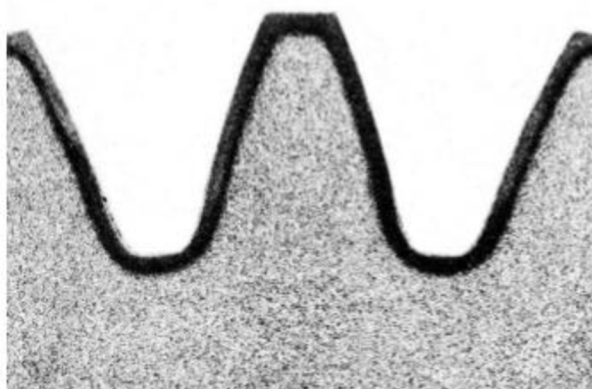
Obr. 3: Kalení plamenem, metoda otočná [9]

- **Kalení energetickými svazky** – spočívá v ohřevu materiálu dodáním energie pomocí koncentrovaného paprsku s vysokou hustotou energie. Jedná se o nejmodernější způsoby kalení, mezi které patří také kalení laserem, elektronovým svazkem nebo pomocí plasmy. Každá ze zmíněných technologií skýtá určité nevýhody, ale naopak jde o nejrychlejší technologie. Jsou řízené počítačem a lze je velmi dobře lokalizovat.

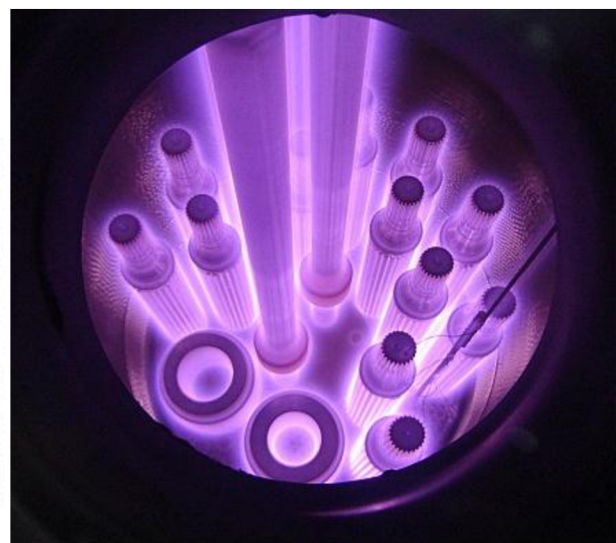
1.2 Chemicko-tepelné zpracování [3], [4], [6], [11]

Těmito technologiemi dochází k nasycování povrchu materiálu daným prvkem pomocí difuze. K dosažení požadovaných mechanických vlastností povrchu součástí např. odolnosti proti opotřebení, zvýšení tvrdosti, odolnosti proti namáhání je použito změny chemického složení. Mezi tyto technologie patří:

- **Cementace** – je sycení povrchu uhlíkem. Uplatňuje se především pro nízkouhlíkové oceli s obsahem uhlíku max. 0,2 % C. Nasycování probíhá v plynném, kapalném nebo pevném prostředí na eutektoidní nebo mírně nadeutektoidní obsah při teplotě nad A_{c3} v intervalu 850 až 950 °C. Čím vyšší teplota, tím větší hloubka cementační vrstvy. Cementace vyžaduje následné zakalení a nízkoteplotní popouštění, které dodá nauhličené vrstvě potřebnou tvrdost, která dosahuje až 800 HV. Zachovává se houževnaté jádro.
- **Nitridace** – je sycení povrchu dusíkem za teplot 500 až 600 °C v plynném nebo kapalném prostředí na koncentraci až 12 % N. Existuje také iontová nitridace, která probíhá za přítomnosti elektrického pole ve vakuu. Cílem nitridace je tvorba tvrdých nitridů s železem případně s některými dalšími příměsi především Al a Cr. Požadované tvrdosti je dosaženo již během nasycování v rozmezí 1000 až 1200 HV. Díky potřebným nízkým teplotám procesu může být součást před nitridací finálně tepelně zpracována a obrobena. V plynném prostředí je proces příliš pomalý, v kapalném rychlejší, ale vznikají pouze tenké vrstvy.
- **Nitrocementování a karbonitridování** – představuje sycení pomocí obou výše zmíněných prvků zároveň. V závislosti na teplotě převládá sycení jednoho či druhého prvku. Se zvyšující se teplotou převládá nasycení uhlíkem. Po nitrocementaci následuje kalení a popouštění, vrstva nedosahuje takové tvrdosti jako při cementaci, ale doba sycení je výrazně kratší. Oproti tomu po karbonitridování není potřebné kalení, teplota procesu je nižší a dochází k menším deformacím. Vzniká vrstva odolná proti opotřebení a zadírání.
- **Boridování** – je založeno na difuzi boru, kdy vznikají karbidy boru o velmi vysoké tvrdosti pro Fe_2B 1380 až 1410 HV a FeB 1900 až 2100 HV. Základní materiál s boridovou vrstvou je spojen charakteristickým zubovým spojením. Tvrdost vrstvy je zachována do teplot 700 až 800 °C. Je získána výborná tvrdost povrchu, odolnost proti abrazivnímu otěru, naopak pevnost v tahu klesá.

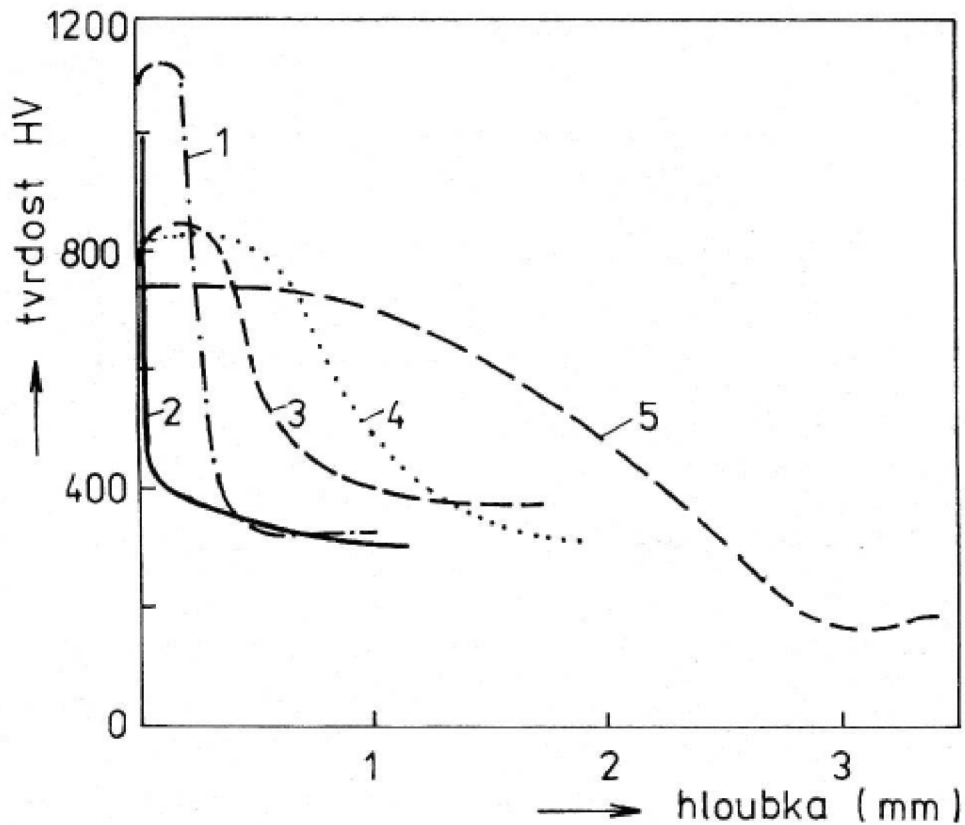


Obr. 4: Ukázka cementační vrstvy [3]



Obr. 5: Ukázka iontové nitridace [12]

Při porovnání výše zmíněných technologií je zřejmé, že nejvyšší tvrdosti povrchové vrstvy lze dosáhnout pomocí použití nitridace a boridování. Velikost výsledných vrstev je oproti kaleným vrstvám velmi nízká. Kalení plamenem dosahuje naopak velmi hluboké vrstvy prokalení avšak s výrazně nižší dosaženou tvrdostí. Použití laseru umožňuje získání vysoké tvrdosti s hloubkou přibližně do 2 mm. Z tohoto důvodu je v práci rozpracována teorie laserového kalení a experiment zaměřen na vyhodnocení parametrů kalené struktury.



Obr. 6: Porovnání různých způsobů vytvrzování [3]
 (1 nitridované, 2 karbonitridované, 3 nitrocementované, 4 cementované, 5 povrchově kalené)

2 LASERY [1], [13], [14], [15], [16], [17], [18]

Slovo LASER představuje zkratku počátečních písmen anglického pojmenování „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ (v překladu „Zesílení světla pomocí stimulované emise záření“).

Základem laserové technologie je možnost stimulované emise, na kterou poprvé upozornil Albert Einstein v roce 1917. Jako první byl sestrojen roku 1954 kvantový generátor mikrovlnného záření „MASER“. První laser byl představen poté v roce 1960. Rubínový laser představil americký fyzik Theodore Maiman. Následoval vývoj všech nejrůznějších typů laserů. V bývalém Československu se první přístroje objevily roku 1962. První československý laser s neodymovým sklem byl uveden v dubnu 1963. Mezi nejvýkonnější v oblasti plynových laserů se řadí CO₂ laser sestrojený 1964 Kumar Patelem.

Mezi současné největší úspěchy patří v roce 2016 v centru HiLASE překonání hodnoty 1 kW středního výkonu diodově čerpaného nanosekundového pevnolátkového laseru přezdívaného „Bivoj“.

Samotný laser se skládá z několika základních částí, jako je aktivní prostředí, čerpací systém, rezonátor a chlazení. (obrázek 7)

Obr. 7: Základní schéma laseru [15]

2.1 Vlastnosti laserového svazku [13], [15], [18]

Laserový paprsek patří do skupiny elektromagnetického záření, mezi nejdůležitější jeho vlastnosti patří: monochromaticnost, koherence, směrovost a módová struktura. Díky koherenci je možné světlo soustředit do velmi malé plochy oproti jiným technologiím.

Pro hodnocení směrovosti lze vypočítat prostorový úhel divergence pro případ paprsku tvaru kužele:

intenzity v rovnoměrné rozložení je zapotřebí použití vhodné optiky. Pro aplikaci kalení a navařování je zapotřebí mód s rovnoměrnou intenzitou energie získaný optického integrátoru.

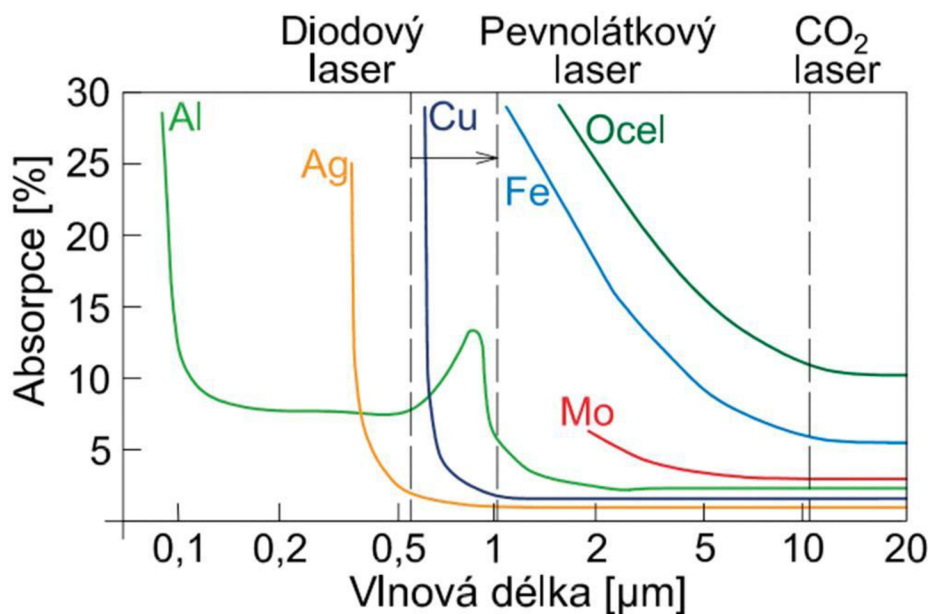
Obr. 8: Gaussův profil rozložení intenzity [19]

Rovnoměrné rozložení paprsku lze mimo jiné i zajistit pomocí rozkmitu paprsku pomocí připojené optické hlavy. Tohoto způsobu bylo konkrétně využito v experimentu této diplomové práce.

Svazek fotonů není ovlivňován elektrickým ani magnetickým polem, protože nezahrnuje elektrický náboj. Přeměna energie je uskutečňována ve zpracovávaném materiálu. Jedná se o velmi rychlý proces. Díky velmi rychlému ochlazení je dosaženo malé tepelně ovlivněné oblasti. Dávkování energie je velmi přesné.

2.2 Absorpce materiálem [13], [14], [15]

Pro efektivní použití laserového paprsku je zásadní především absorpce samotným materiálem a jeho přeměna na teplo. Vliv na absorpci záření materiálem mají vliv materiálové vlastnosti, vlnová délka záření a mimo jiné stav povrchu. Pro oblasti nízkých intenzit závisí koeficient odrazu zejména na elektrických vlastnostech kovu dle rovnice:



Obr. 9: Velikost absorpce různých materiálů v závislosti na vlnové délce laseru [15]

Tab. 1 : Vliv stavu povrchu na koeficient absorpce [13]

Stav povrchu	Průměrná drsnost povrchu Ra [μm]	Absorpce (%) CO ₂ laser λ = 10,6 μm	Absorpce (%) YAG laser λ = 1,06 μm
Leštěný	0,02	5,15-5,25	29,75-30,00
Broušený	0,21	7,45-7,55	38,90-40,10
Válcovaný	0,87	5,95-6,05	33,80-34,20
Pískovaný	1,65	33,85-34,30	68,20-68,40

Mezi další způsoby zvýšení absorpce patří zdrsnění povrchu, nanesení povrchové vrstvy s vyšší schopností absorpce, moření, předehřevem povrchu.

2.3 Rozdělení laserů [13], [14], [15]

Typy laserů se dají posuzovat dle různých hledisek. Jednotlivé skupiny se liší výrazně svou konstrukcí i vlastnostmi, které je dále předurčují ke konkrétním aplikacím. Uvedené rozdělení je dle typu aktivního prostředí:

- **Pevnolátkové lasery** - Nd: YAG, Er: YAG, Yb: YAG, Ti: safír, rubínový laser.
Aktivní prostředí je tvořeno látkou pevného skupenství, nejčastěji monokrystaly nebo amorfními látkami s příměsí aktivačních prvků. Buzeny jsou opticky pomocí výbojek či laserových diod. Mohou pracovat jak v kontinuálním, tak v pulzním režimu, nevyžadují zvláštní nároky na údržbu. Vlnové délky zaujímají v oblasti infračerveného a viditelného spektra. Dle tvaru aktivního prostředí se dále dělí na:
 - tyčové,
 - vláknové,
 - diskové.
- **Plynné lasery** – He-Ne, argonový laser, CO₂ laser, excimerové lasery.
Jako aktivní látky jsou využívány plyny, či směsi plynů a par. Buzeny jsou pomocí elektrického výboje, chemické reakce, fotodisociace, rychlou expanzí v plynu, průchodem svazku rychlých elektronů nebo opticky. Častěji pracují v kontinuálním režimu. Záření plynových laserů spadá do oblastí ultrafialového záření, viditelného a infračerveného spektra i do milimetrové oblasti. Svařování pomocí plynových laserů je srovnatelné se svařováním elektronovým paprskem. Plyny mají velkou optickou homogenitu a díky této vlastnosti lze dosáhnout velké intenzity záření. Dle druhu složek plynu inverzní populace se mohou lasery dělit na:
 - atomové,
 - iontové,
 - molekulární,
 - excimerové.
- **Kapalinové lasery** – barvivové lasery (př. barviv - fluorescein, rhodamin).
Aktivním prostředím jsou použity roztoky organických barviv. Buzení je provedeno opticky např. světlem jiného laseru. Režim může být pulzní i kontinuální. Značnou výhodou je možnost pomocí nelineární optiky přeladění jejich vlnové délky v rozsahu 300 až 1500 nm. Nevýhoda omezené životnosti aktivního prostředí způsobené rozladem barviv působením světla a tepla představuje vyšší nároky na údržbu. Využívají se především ve spektrometrii a v oblasti vědy a výzkumu.
- **Plazmatické lasery** – rentgenový laser.
Aktivní prostředí zahrnuje mnohonásobně nabitě ionty uvnitř chladnoucího plazmatu. Tvorba plasmy je zajištěna např. elektrickým výbojem, silnoproudým elektronovým svazkem nebo fokusovaným laserovým pulsem. Oblast vlnových délek je v oblastech rentgenového záření. Rentgenový laser má pulzní režim. Z důvodu malé vlnové délky pro zařízení nelze použít rezonátoru a je nutno zajistit proces „zesílené spontánní emise“.
- **Polovodičové lasery** – diodový laser, injekční laser.
Pro aktivní prostředí je využito polovodičového materiálu, kde aktivními částicemi jsou nerovnovážné elektrony a díry (volné nosiče náboje). Vznik stimulované emise je založen na zářivé rekombinaci nosičů náboje. Buzení může být za pomoci elektrického proudu, elektronovým svazkem nebo opticky. Výhodou je jejich kompaktnost, malé rozměry, schopnost velkého zesílení a účinnosti. Dále také možnost přeladění, vlnová délka se pohybuje v rozsahu od 0,3 μm do 30 μm. Hlavními nevýhodami jsou však poměrně velká rozbíhavost laserového svazku závislé na teplotě aktivního materiálu polovodiče. Laser je používán především v telekomunikační a výpočetní technice, v průmyslových aplikacích pak pro svařování a kalení.

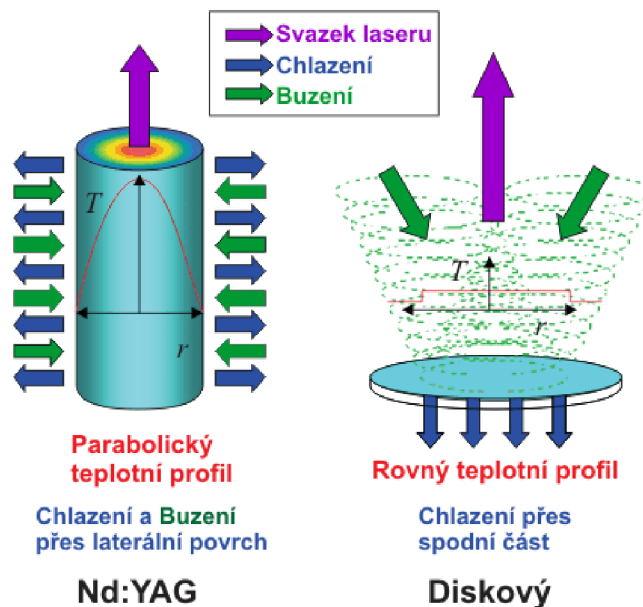
2.4 Lasery ve strojírenství [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27]

Z obrovského počtu typů laserů jsou v průmyslu využity jen některé. Uplatňují se především druhy pevnolátkových a plynových laserů. Jako první v roce 1960 byl použit rubínový laser na vrtání diamantových průvlaků určených pro tažení drátů. Pro technologické aplikace jsou na zařízení kladeny určité požadavky, například dosažitelný výkon, cenová dostupnost a dlouhodobá provozní spolehlivost. Mezi nejčastěji používané patří:

Nd:YAG laser

- Jde o nerozšířenější z pevnolátkových laserů nejčastěji s vlnovou délkou 1064 nm. Existuje několik variant tohoto laseru. Tyto lasery bývají často buzeny pomocí laserových diod, a proto jsou někdy označeny jako DPSS („Diode Pump Solid State“), méně často pak výbojkami, které mimo jiné mají výrazně nižší životnost a účinnost než diody. Mohou pracovat jak v kontinuálním tak v pulzním režimu. Aktivní prostředí na bázi krystalu yttrium aluminium granátu dopovaným ionty neodymu je oproti jiným látkám mechanicky pevnější, vykazuje malé optické ztráty a tepelně stálý. Nevýhodou je tzv. „thermal lensing effect“, který je způsoben teplotní roztažností krystalu a způsobem chlazení. Dochází k jeho deformaci a vede k zhoršení kvality paprsku. Existuje několik variant tohoto typu laseru, kdy například pomocí změny geometrie aktivního prostředí je eliminován nežádoucí zmíněný efekt. Největší výhodou je možnost napojení výstupního svazku na optické vlákno, která dodává laseru významnou flexibilitu a rozšiřuje pole aplikací. Tato skutečnost velmi usnadňuje transport paprsku do místa zpracování.

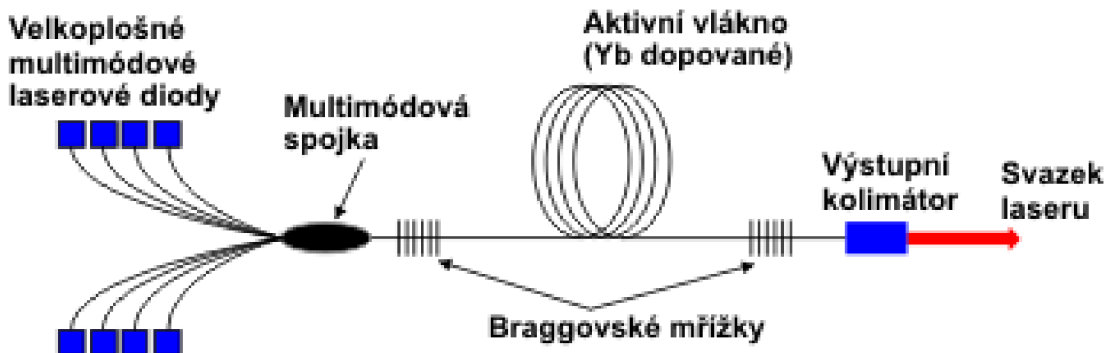
V současné době existuje několik variant tohoto typu laseru. Liší se tvarem aktivního prostředí, původní v podobě tyčinky, dále deskový a diskový typ. Účinnost se pohybuje v rozmezí 2 až 30 %, v případě novějších typů jde o vyšší účinnosti, avšak starší typy jsou výrazně neefektivní.



Obr. 10: Schéma Nd:YAG laseru [21]

Vláknové lasery

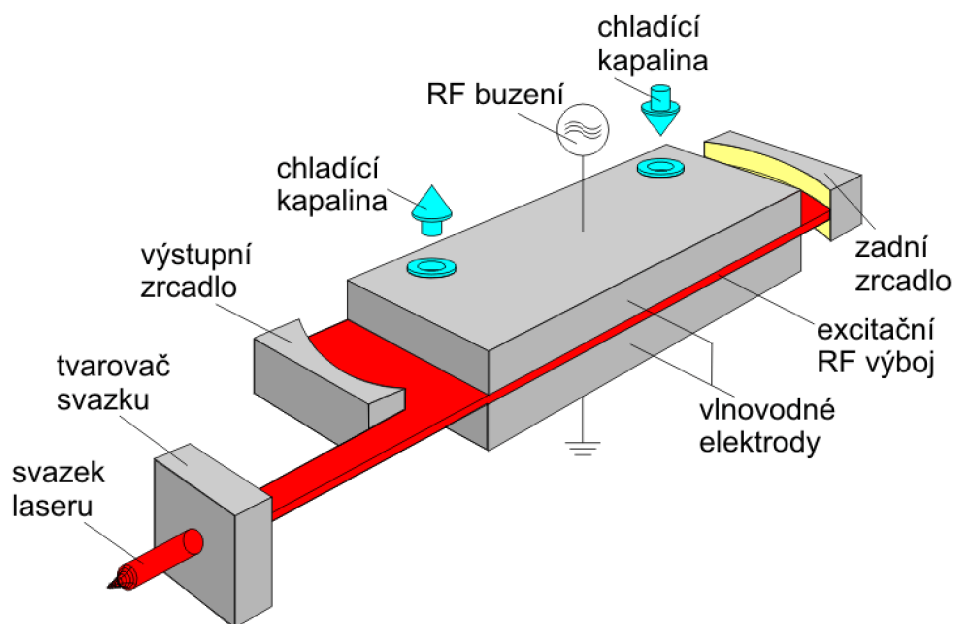
- Patří do skupiny pevnolátkových laserů. Jde o speciální typ pevnolátkových laserů. Aktivní prostředí je v podobě optického křemíkového vlákna s průměrem jádra několik mikrometrů a délkou několik metrů. Vláknó je dopované nejčastěji atomy erbia (Er) nebo yterbia (Yr). Buzení probíhá pomocí laserových diod, jejich zařízení je do aktivního vlákna přivedeno opět optickým vláknem. Jedná se o tzv. *vláknó – vláknó* architekturu a laser díky tomu neobsahuje žádné opto-mechanické prvky jako zrcadla apod. Výkony dnes dosahují až 14 kW. V dnešní době se jedná o nejmodernější technologii pro průmyslové řezání, svařování a značení a podíl vláknových laserů na trhu neustále roste.



Obr. 11: Schéma vláknového laseru [24]

CO₂ laser

- CO₂ laser patří do skupiny plynových laserů. Aktivním prostředím je směs plynů CO₂. Vlnová délka emitujícího záření je 10,6 μm. Jejich energetická účinnost je okolo 10 až 15 %. Hlavní předností tohoto laseru je velký kontinuální výkon (až desítky kW). Buzení probíhá radio-frekvenčně nebo elektrickým výbojem. Lasery vynikají vysokou spolehlivostí, dlouhou životností a nízkými provozními náklady. Využívají se především pro značení, gravírování a řezání nekovů (výkon do 1,5 kW), řezání a svařování kovů (výkon do 20 kW). Vedení paprsku lze zajistit pouze pomocí zrcadel, nemůže být použito optické vlákno jako v případě laserů s menší vlnovou délkou. Což je poměrně nevýhoda z důvodu údržby optické dráhy a pravidelné kalibrace.



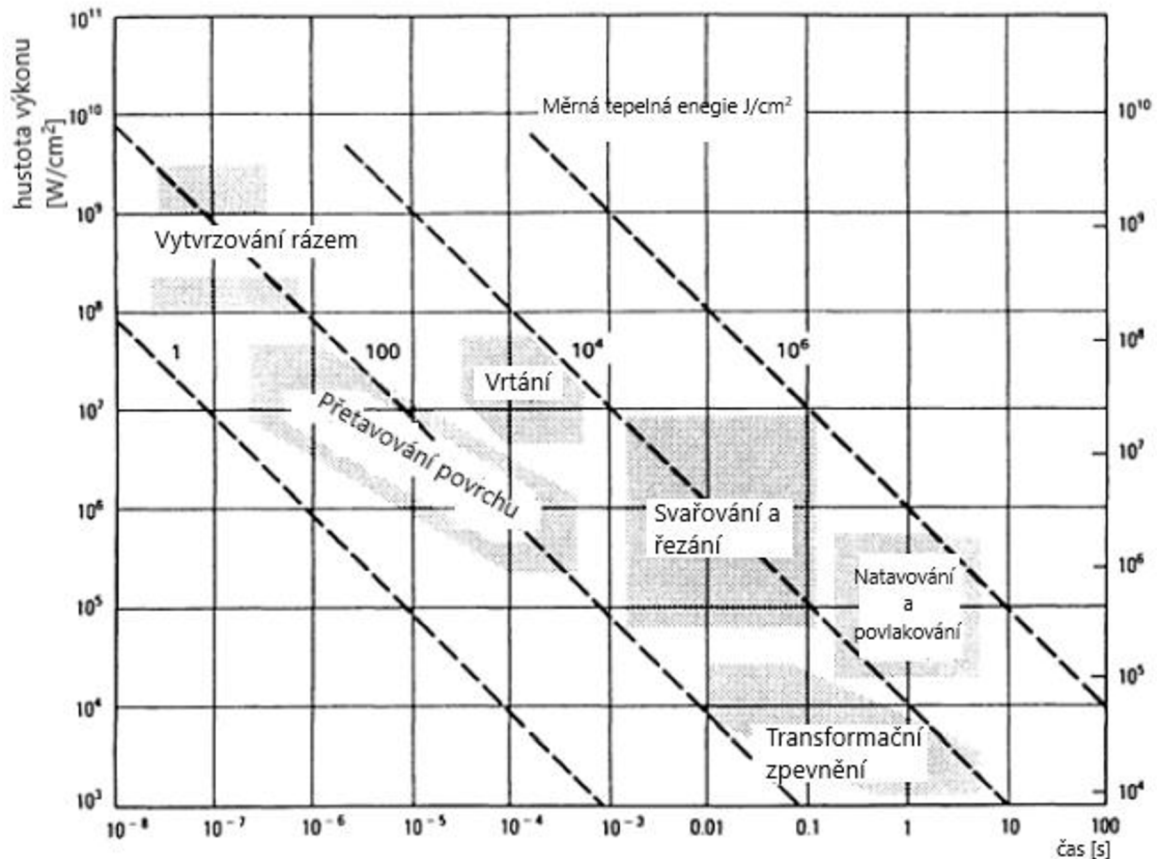
Obr. 12: Schéma CO₂ laseru [26]

Tab. 2: Porovnání vlastností laserů [28]

	Nd:YAG laser	CO ₂ laser	diskový laser	vláknový laser
celková účinnost [%]	5	10	15	30
výstupní výkon do [kW]	6	20	4	50
BPP (pro 5 kW) [mm.mrad]	25	6	8	< 2,5
chlazení	DI voda	-	voda	vzduch/voda
provozní náklady [Kč/h]	825	520	760	460
údržba	častá	nutná	častá	žádná

2.5 Aplikace laseru [13], [14], [28], [29], [30]

Laserové technologie našly uplatnění v mnoha odlišných odvětvích průmyslu, kde v rámci různorodých aplikací hrají v současné době nezastupitelnou roli pro zvýšení efektivity i rychlosti práce. Jejich aplikace se odvíjejí od volby vhodného výkonu laseru, jak je znázorněno v grafu uvedeném níže. Ve strojírenství to jsou například:



Obr. 13: Oblasti použití laseru pro jednotlivé aplikace [19]

- Svařování laserem – se vyznačuje především vysokou rychlostí procesu. Dosahuje přesných a kvalitních svarů. Díky nízké hladině vneseného tepla je přítomna minimální deformace a malá tepelně ovlivněná oblast. Svar vykazuje veliký poměr hloubky k šířce. Je možno svařovat i materiály s vysokou tepelnou vodivostí i s vysokou teplotou tavení. Nepoužívá se žádný přídavný materiál a navíc lze provést svár i při přístupu pouze z jedné strany. Proces je bezkontaktní, dobře automatizovaný a energetický vstup je lehce říditelný, vykazuje vysokou flexibilitu. Nejsou kladeny požadavky na přípravu svarových ploch. Výsledná kvalita svaru je s minimálními nebo žádnými nároky na následné opracování.



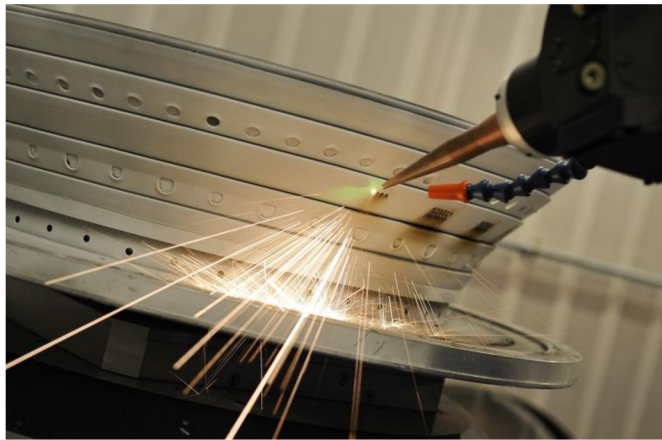
Obr. 14: Ukázka svařování [29]

- Řezání laserem – patří v současnosti mezi nejrozšířenější průmyslové aplikace. Vysoká koncentrace energie umožňuje dělit všechny technické materiály bez ohledu na jejich vlastnosti. Je dosaženo poměrně vysokých řezných rychlostí (v metrech až desítkách metrů za minutu). Tloušťka řezu dosahuje až 20 mm u nerezových a 30 mm u uhlíkových ocelí. Přesnost řezání je přibližně 0,05 až 0,1 mm na jeden metr délky řezu. Dobrá kvalita řezných ploch s drsností Ra 1,6. Úzká řezná spára dosahuje velikosti 0,05 mm. Rozlišujeme tyto metody: sublimační, tavné a oxidační. První variantu volíme pro tenké plechy, použití impulsního svazku. Druhou pak pro vysokolegované oceli, měď, hliník, nikl a jejich slitiny, ale i pro nekovové materiály, jedná se o kontinuální svazek. Třetí pro nelegované až středně legované oceli.



Obr. 15: Ukázka řezání [28]

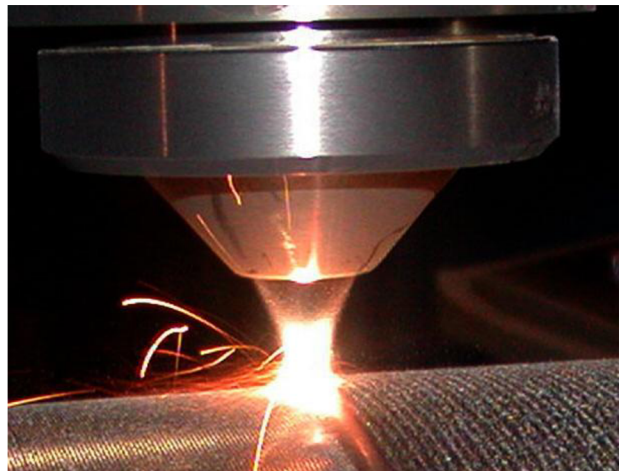
- Vrtání - vlivem krátkých impulzů s vysokou hustotou výkonu dopadajícího paprsku se materiál v bodě dopadu taví a následně sublimuje. Časté je využití pulzních, vláknových nebo Nd:YAG zdrojů s lasery kratších vlnových délek z důvodu lepší absorpce materiálem. Díky laserovému vrtání lze dosáhnout extrémních přesností až na 1 μm a to i pod úhlem. Proces ovlivňuje velké množství parametrů laseru, mezi nejzásadnější patří délka laserových pulzů, jejich energie a velikost laserové stopy. Výhodou vrtání laserem je možnost vytvoření velmi malých otvorů o průměru od 10 do 100 μg , průměr lze libovolně zvětšovat. Průřez otvoru je většinou kruhový, ale je možné touto metodou vytvořit téměř jakýkoliv tvar a lze vrtat do materiálu i s velkou tloušťkou, avšak při vyšších tloušťkách než 50 mm může docházet k zhoršení tvaru a povrchu otvoru. Vrtat laserem lze nejen kovy, ale také plasty, dřevo, sklo, keramiku a další materiály.



Obr. 16: Ukázka vrtání [28]

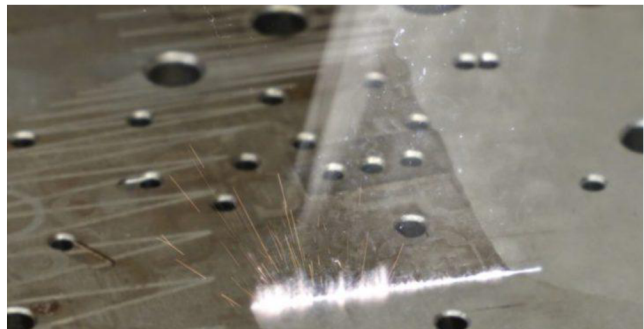
- Hybridní technologie – spočívá ve spojení konvečních způsobů výroby s laserem. Je naráz využito předností obou technologií. Nejčastější je využití obloukových technologií s ochrannými plyny MIG, MAG a TIG (někdy nazývaná též WIG). Metody MIG a MAG pracují s podobným principem svařování s tavící se elektrodou v ochranném plynu, který v případě MAG je aktivní (CO_2) a reaguje s roztavenou lázní, v případě MIG inertní plyn (Ar), který s roztavenou lázní nereaguje. Laser generuje vysoký výkon pro dosažení potřebné hloubky svaru a konvenční technologie zajišťuje přísun přídavného materiálu. Hybridní svařování lze využít na svařování nízkolegovaných, nelegovaných a vysokolegovaných ocelí. Výhodou těchto metod je nízká ekonomická náročnost, obecně rychlejší svařování možnost automatizace, menší deformace dílů.

- Laserové navařování – spočívá v přivedení přídavného materiálu v podobě drátu či prášku do oblasti paprsku, kde dojde k jeho natavení. Zároveň dochází k natavení základního materiálu a vzniká metalurgický spoj, zaručující výbornou adhezi mezi materiály. Pomocí laseru je dosaženo nejkvalitnějších navařů. Do základního materiálu je vneseno pouze malé množství tepla. Proces je velice efektivní, lze navařovat v libovolných tloušťkách a 3D tvarech, což je využito v případě 3D tisku. Lze ji tak využít i k obnovení poškozených či opotřebovaných povrchů či opravě součástí, u nichž kvůli chybě výroby chybí část materiálu. Tato technologie se dále uplatňuje pro renovace a opravy funkčních ploch především pro střížné hrany nástrojů, komponenty parních a plynových turbín, kladky, hřídele, navijecí bubny a jiné pohybové součásti, součásti obráběcích nástrojů, čepy a dorazové plochy.



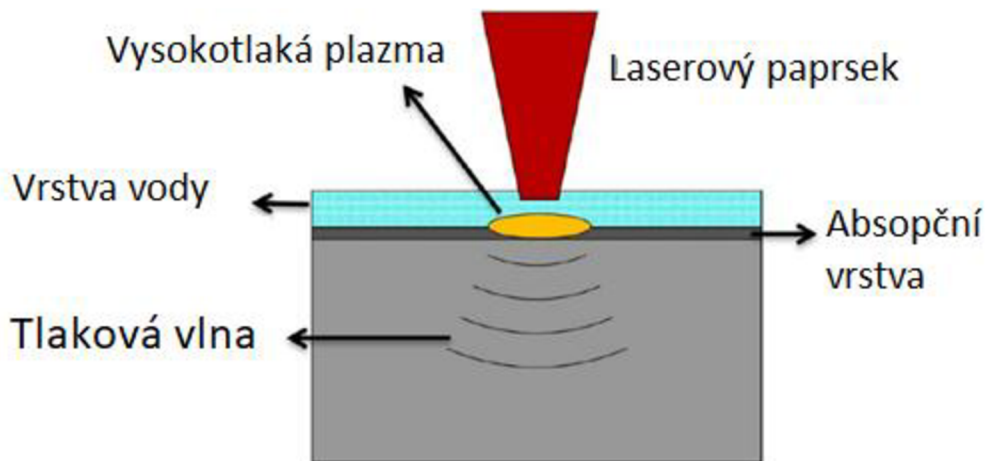
Obr. 17: Ukázka navařování [29]

- Čištění - jedná se o převratnou metodu ekologického čištění. Je založeno na principu velmi krátkých impulzů s velkým výkonem, díky kterým jsou nečistoty z povrchu odpařeny. Materiál není namáhán mechanicky, tepelně ani chemicky. V porovnání je možné ušetřit až polovinu potřebného času pro konvenční čištění. Použití této aplikace je především v případech odstraňování barev a laků, odrezování, ale také pro čištění historických exponátů a další.



Obr. 18: Ukázka laserového čištění [29]

- Laser shock peening (LSP) – technologie určená pro vytvrzování povrchu, která výrazně prodlužuje životnost povrchu kovových součástí. LSP funguje na principu krátkých pulsů laseru s vysokou energií k vytvoření tlakových zbytkových napětí v materiálu. Před dopadem prochází laserový svazek tenkou vrstvou vody a dochází k ablaci absorpční vrstvy, která pokrývá povrch tvrzeného materiálu. Vzniká tak plazma, které na malé ploše povrchu svou expanzí (která je navíc krytá vrstvou vody) vytváří tlak až několik GPa. Tvrzeným materiálem projde tlaková vlna, která způsobí plastickou deformaci svrchní vrstvy materiálu (do 1,5 mm), čímž se vytvoří tlaková zbytková napětí. Hloubka a velikost napětí je závislá na materiálu a hustotě aplikace laserových pulsů.

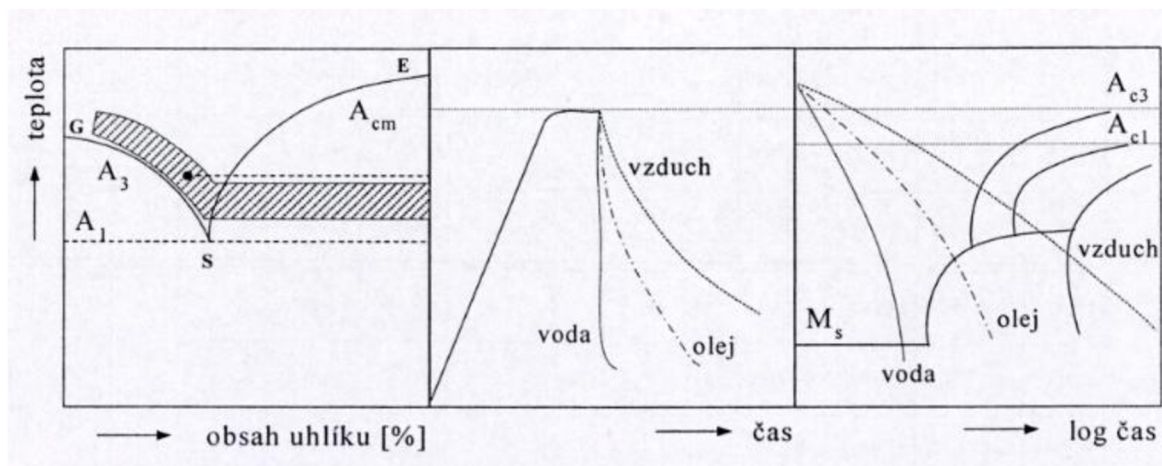


Obr. 19: Ukázka technologie laser peening shock [31]

- Mikroobrábění laserem – metoda, která již podle názvu slouží k odebrání materiálu tepelným účinkem na místě dopadu laserového svazku. Laser působí na velmi malou plochu obráběného materiálu, kde vysokou intenzitou záření způsobí odpaření materiálu, přičemž nevzniká velké tepelné ovlivnění okolního materiálu. Mikroobrábění laserem lze použít i na materiály, které jsou jinak těžce obrobitelné klasickými metodami obrábění, neboť laserový paprsek může obrábět i velmi tvrdé materiály, včetně nekovových, například pro hliník, titan, křemík, sklo, keramika, karbon nebo kevlar. Tato metoda je často využívána pro svou vynikající přesnost plynoucí z vlastností laserové technologie v aplikacích, které pro které je přesnost naprosto zásadní, například v elektroprůmyslu, letectví či medicíně. Další výhodou mikroobrábění je obrábění bez vzniku ořepů nebo rysek, které vznikají při klasickém obrábění a také materiál není odebrán po jednotlivém zrnu, nedochází tedy k degradaci vazebního materiálu.

3 KALENÍ [3], [4], [11], [13], [33]

Kalení představuje proces tepelného zpracování s cílem dosažení nerovnovážné struktury. Jeho účelem je zvýšit tvrdost materiálu na předem stanovenou hodnotu. Skládá se z ohřevu na teplotu nad A_{c3} , popř. A_{c1} , výdrže na kalící teplotě a následného ochlazení minimálně kritickou rychlostí. Rychlost ochlazení má zásadní vliv na charakter vzniklé struktury, kdy je potlačen rozpad austenitu na ferit a perlit. Dle zvolené hodnoty rychlosti tak vznikají tvrdé fáze martenzit nebo bainit, ale častěji požadovaná je martenzitická struktura. Na obr. 20 je zobrazena oblast vhodných kalících teplot a také vliv zvoleného kalícího média na rychlost ochlazování a na výslednou strukturu.

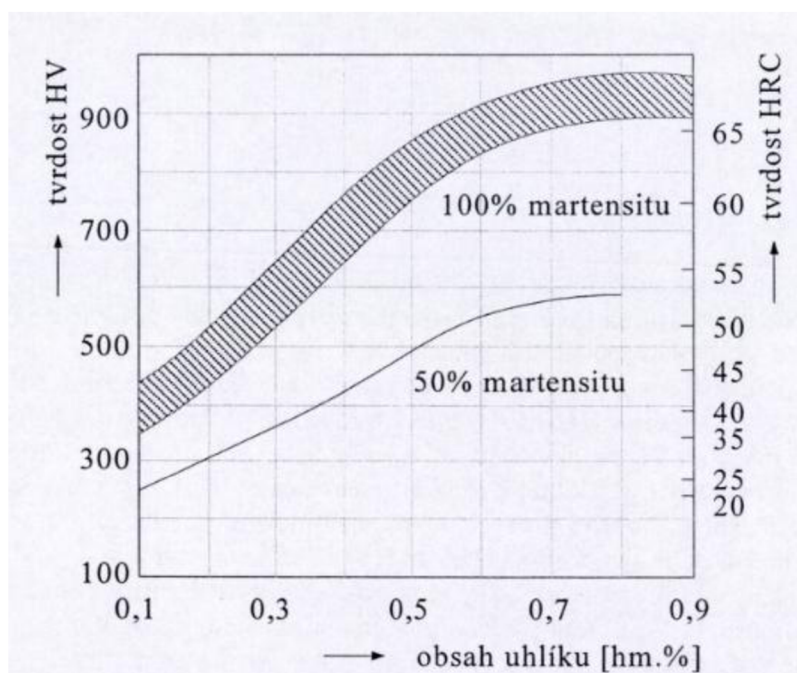


Obr. 20: Základní diagramy kalení [3]

Pro volbu vhodného typu kalení jsou důležité tyto pojmy:

Kalitelnost je schopnost oceli dosáhnout nerovnovážnou strukturu.

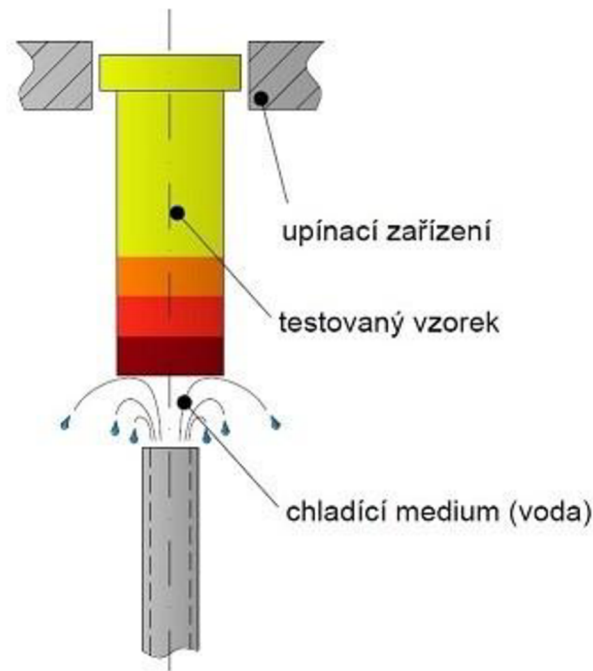
Zakalitelnost je hodnocena dosažitelnou tvrdostí martenzitu, která závisí na obsahu uhlíku. Na obrázku 21 je zobrazena tvrdost pro strukturu čistě martenzitickou a s obsahem 50 % martenzitu.



Obr. 21: Závislost dosažitelné tvrdosti nelegovaných ocelí na obsahu uhlíku [4]

Oceli dosahující s obsahem uhlíku více jak 0,35 % jsou považovány za dobře kalitelné.

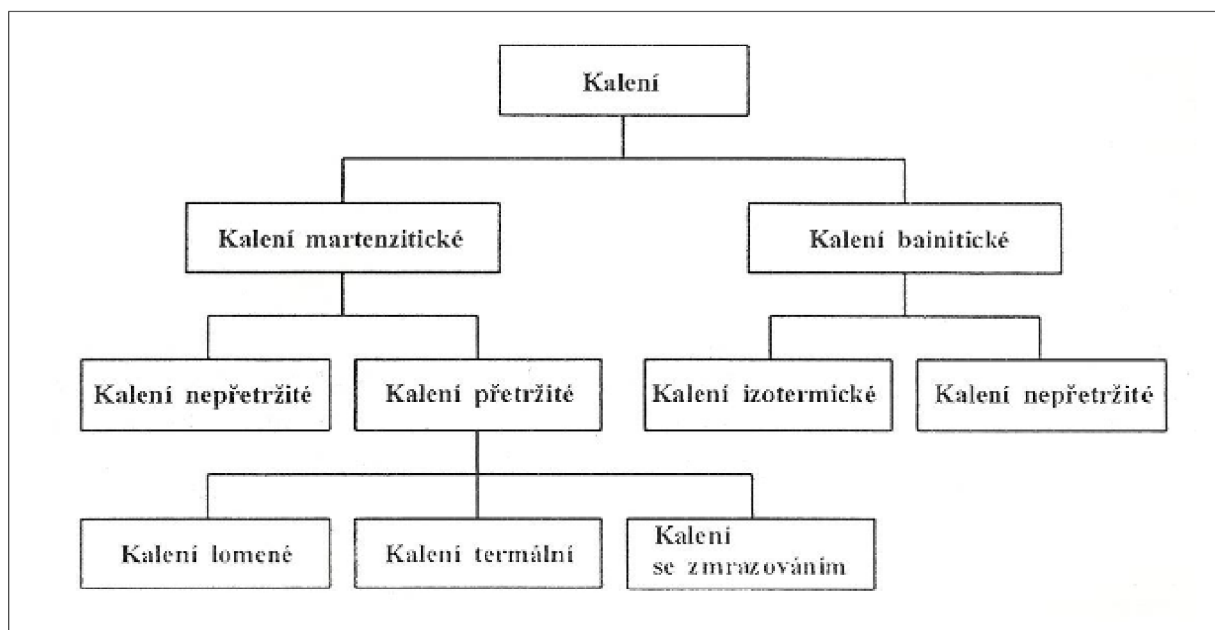
Prokalitelnost je schopnost dosažení tvrdosti dle zakalitelnosti v dané hloubce pod povrchem. Tato vlastnost závisí na tvaru příslušného ARA diagramu. Určení její hodnoty je možné pomocí Jominiho čelní zkoušky prokalitelnosti.



Obr. 22: Princip Jominiho zkoušky prokalitelnosti [6]

3.1 Druhy kalení [3]. [4], [6], [11]

Základní dělení je na kalení martenzitické a bainitické, které jsou následně členěny na základě průběhu procesu ochlazování, jsou uvedeny na obrázku 23. Martenizitická struktura dosahuje výrazné tvrdosti a na druhou stranu také poměrně křehká. Částečné omezení nežádoucí struktury lze učinit pomocí různých kalících postupů.



Obr. 23: Dělení kalení [4]

Kalící média

Nejznámější a nejlevnějším kalícím médiem je voda, která má intenzivní ochlazovací účinek, avšak za cenu ne vždy zcela žádoucích vnitřních pnutí. Při kalení vodou dochází k nadkritické rychlosti ochlazování, které jsou nutné pro vznik martenzitické struktury. Roztavená solná lázeň má výhodu výrazně menší výsledné vnitřní pnutí, neboť při kalení dochází k plynulému ochlazování. Nevýhodou je pak obtížnější manipulace. Častým kalícím médiem jsou rovněž minerální oleje, které mají oproti vodě výhodu v nižší ochlazovací rychlosti (desetkrát pomalejší), což snižuje vnitřní pnutí v materiálu po zakalení, avšak oproti vodě je nutné součástku po odkalení odmastit. Důležitou vlastností pro kalení je rovněž viskozita oleje, která ovlivňuje vlastnosti výsledného výrobku. Při kalení v kapalině je nutná cirkulace či vertikálního pohybu ve vodě a filtraci kapaliny od nežádoucích částic. Z plynů má nejlepší ochlazovací vlastnosti vodík, který je ovšem výbušný, a tedy z bezpečnostního hlediska nebezpečný. Nejčastěji se proto používá dusík (N_2).

Martenzitické kalení (obrázek 24)

- **Nepřetržitě kalení**

V případě nepřetržitého (přímého) kalení se prování ochlazení z kalících teplot přímo do kalícího média nejčastěji do vody. Jde o nejjednodušší způsob kalení, přechody přes teploty martenzit start a martenzit finiš (M_S , M_F) jsou velice rychlé a uvnitř materiálu dochází k vnitřnímu pnutí.

- **Lomené kalení**

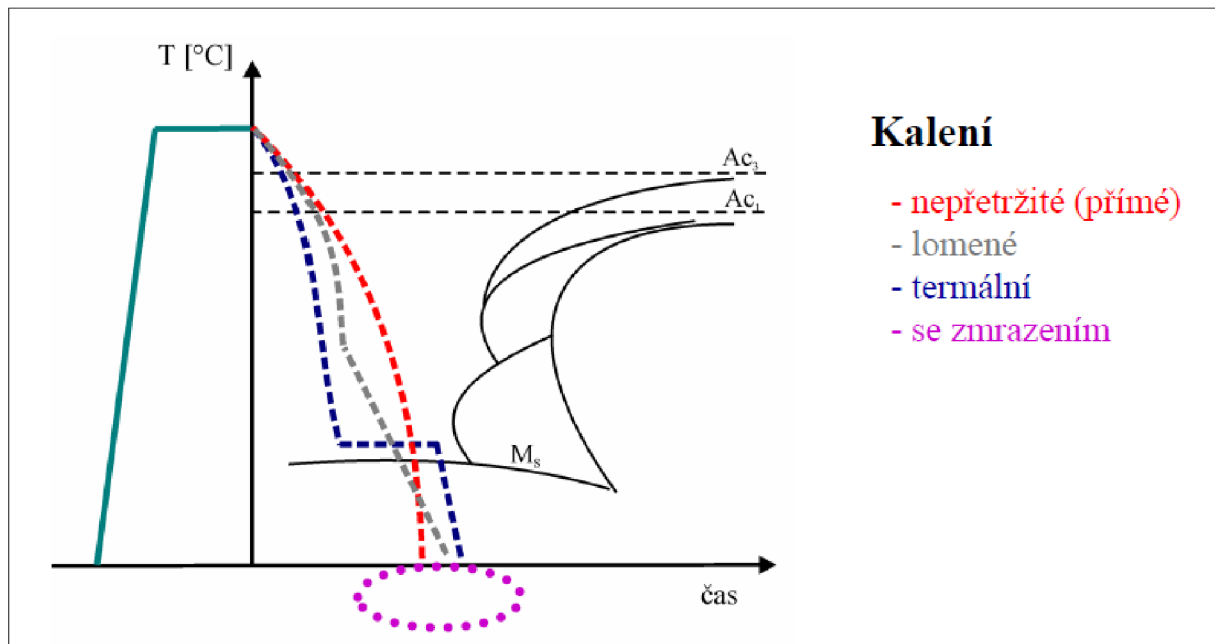
Začátek lomeného kalení probíhá ze začátku stejně jako přímé kalení. Z kalící teploty je prudce ochlazen ve vodě, aby bylo zabráněno vzniku perlitu. Těsně nad teplotou martenzit start je součást vyjmuta a vloží se do kalícího média s nižší rychlostí ochlazování. Tímto je zajištěna správně zakalená struktura a zároveň nedochází k výrazným vnitřním pnutím jako v předchozím případě.

- **Termální kalení**

Pro termální kalení je opět začátek velmi podobný přímému kalení, ale těsně před teplotou martenzit start je vložen do kalícího prostředí udržující teplotu nad hodnotu přeměny martenzitu např. solná lázeň. Dochází k vyrovnání teplot uvnitř a na povrchu součásti a před přeměnou austenitu na bainit je součást pomalu ochlazená pod teplotu martenzit finiš. Zde jsou již vnitřní pnutí minimální.

- **Se zmrazením**

Tento typ kalení je používán pro materiály, které pomocí běžných kalících médií nedojde k ukončení martenzitické přeměny. Hranice jejich teploty leží pod teplotou 0°C . Z počátku dochází ke kalení ve vodě a poté je součást zmrazena v prostředí například kapalného dusíku.



Obr. 24: Schéma metod martenzického kalení [4]

Bainitické kalení

- **Nepřetržité kalení**

Tato metoda je možná pouze u ocelí s předsunutou bainitickou oblastí v ARA diagramu. Spočívá v plynulém, dostatečně rychlém ochlazení tak, aby byl zajištěn rozpad austenitu na bainit nebo směs bainitu a martenzitu. Obvykle následuje popouštění, v případě výše legovaných ocelí k vícenásobnému.

- **Izotermické kalení**

Materiál je rychle ochlazen v solné lázni na teploty, při které nehrozí vznik perlitu. Na dané teplotě je ponechán do doby dosažení bainitické struktury a dále je ochlazen na vzduchu. V materiálu jsou přítomna pouze velice malá pnutí a je dosažena velmi dobrá houževnatost.

3.2 Povrchové kalení laserem [30], [32], [33], [35]

Při kalení pomocí laseru, dochází k velmi rychlému ohřevu pomocí laserového paprsku až $10^3 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$. Ochlazení probíhá pomocí odvodu tepla do okolního materiálu neboli efektem *samozakalení*. Je dosahováno vysokých ochlazovacích gradientů a v zakalené struktuře vzniká jemnozrnný martenzit. Kalení laserem je vhodné pro objemné součásti, aby rychlost ochlazení byla dostatečná pro zakalení. V případě menších součástí by bylo nutné použití kalícího média. Pro zakalení plochy je potřeba vytvářet jednotlivé kalené stopy vedle sebe u rotačních součástí je vhodné zároveň použít trajektorii spirály. Základní tvar zakalené stopy je miskovitý, ovlivnit lze pomocí optiky pro změnu rozložení výkonu laserového svazku. Následující stopy ovšem mohou předchozí negativně tepelně ovlivnit. Na obrázku 25 jsou zobrazeny jednotlivé způsoby umístění stop.

Obr. 25: Způsoby kladení stop [35]

- V případě použití mezer přetrvává v tepelně neovlivněných oblastech původní tvrdost materiálu. Místa tak představují značné nebezpečí z hlediska vnitřního pnutí.
- Při dalším způsobu místa dotyků stop mají vyšší tvrdost než základní materiál, avšak v průběhu tvrdosti jsou přítomny ostré skoky.
- Při překrytí dochází k popuštění předchozí zakalené struktury. Ve zmíněných oblastech je snížena tvrdost, ale k výraznému poklesu mechanických vlastností nedochází.

V rámci technologie kalení pomocí laseru existují dvě různé metody na základě zvoleného optického zařízení:

4 MATERIÁL OCEL 12 050 [36], [37]

Jedná se o uhlíkovou ocel k zušlechťování, povrchovému kalení a pro velké výkovky. Tato konstrukční ocel je vhodná pro laserové kalení, označována je ocel ČSN 12 050 (C45). V praxi je využívána pro hřídele těžních strojů, turbokompresorů, na větší ozubená kola, šneky, ojnice, pístnice, vřetena, čepy, šrouby, spojovací součásti, vrtací tyče, frézovací trny a dalších. Doporučená je i pro montážní nářadí jako například klíče, či kladiva a pro ruční nástroje např. nůžky. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny dle normy ČSN 41 2050, pro polotovar tlustý plech s tloušťkou v rozsahu od 3 do 60 mm ve stavu normalizačně žíhaném (tabulky 3 a 4).

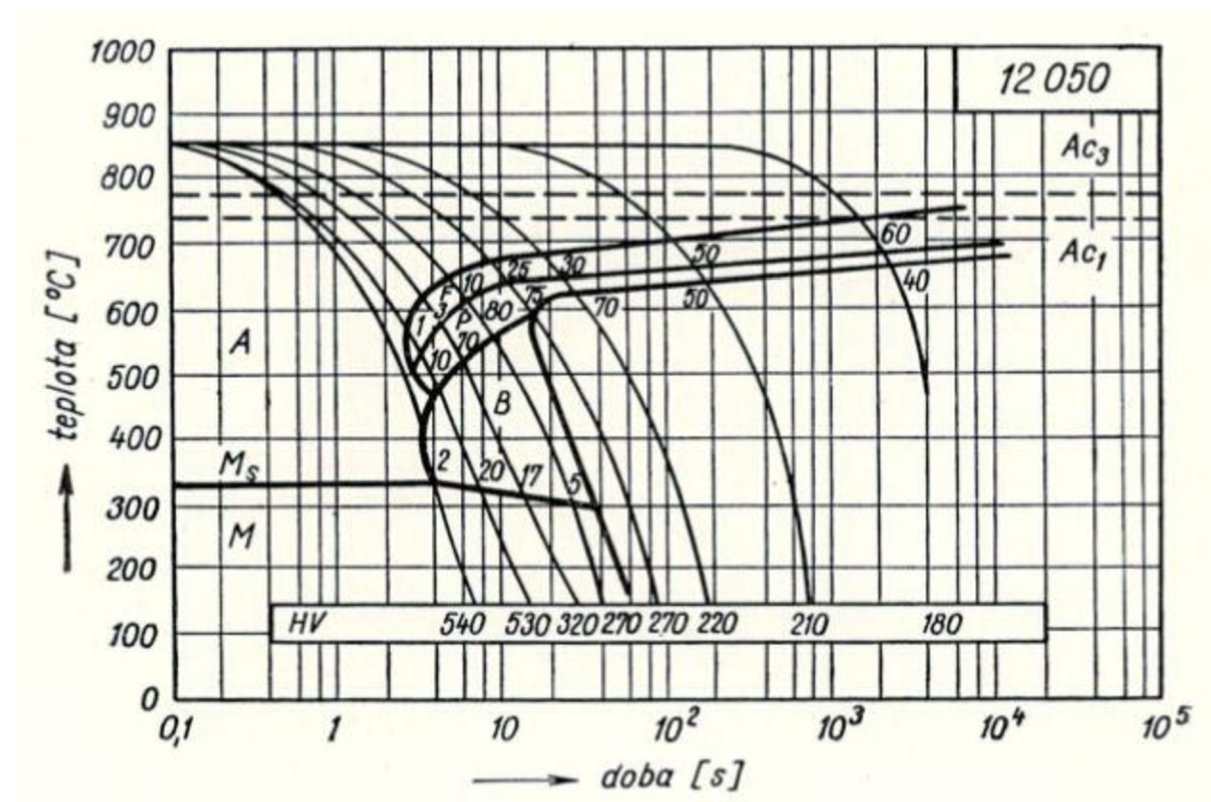
Tab. 3: Chemické složení v [hm. %] dle ČSN 41 2050 [37]

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,42 – 0,50	0,50 – 0,80	0,17 – 0,37	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,040	max. 0,040

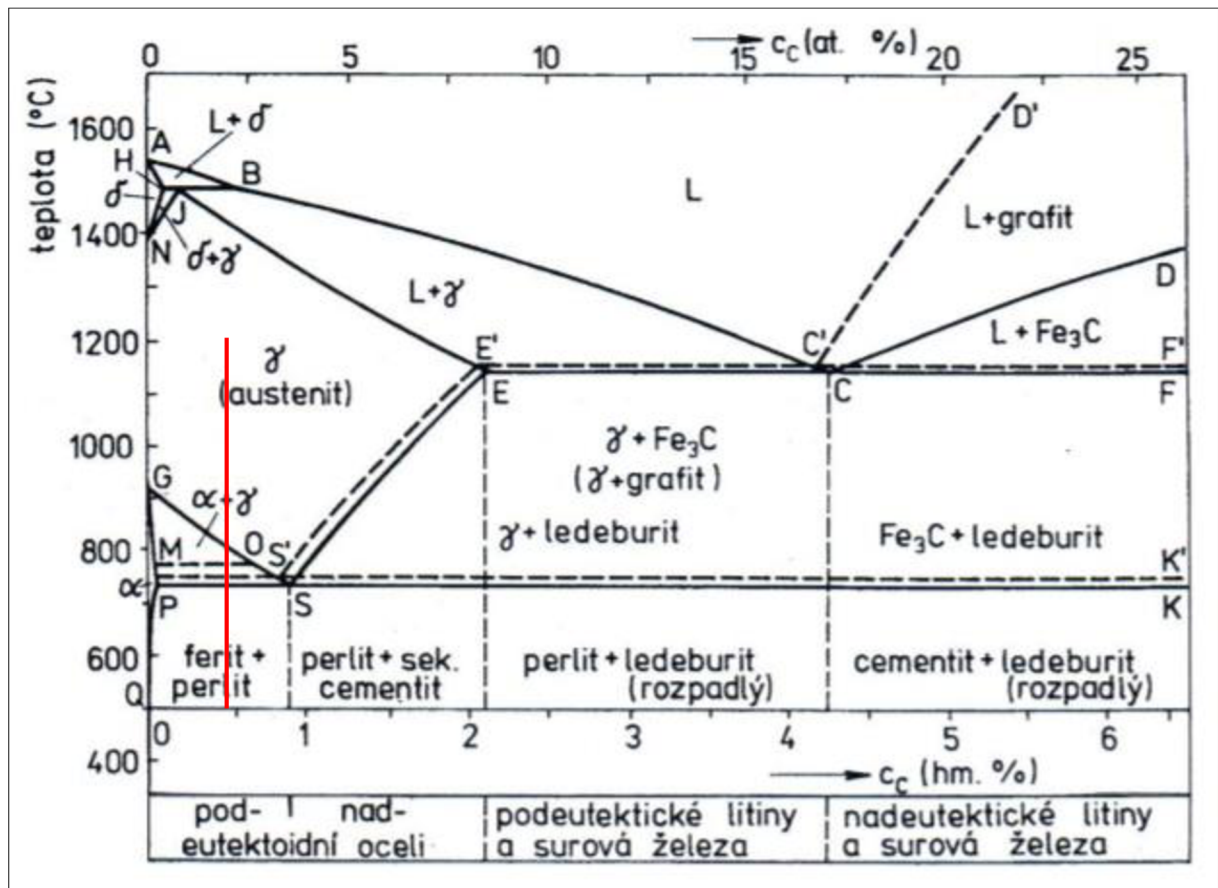
Tab. 4: Mechanické vlastnosti dle ČSN 41 2050 [37]

Mez kluzu $R_{p0,2}$	min. 355	MPa
Mez pevnosti v tahu R_m	min. 600	MPa
Tažnost A_5	15	%
Tvrdoost	max. 207	HB

Pomocí diagramu anizotermického rozpadu austenitu na obrázku 28 je dána teplota M_s 310 °C. Kritická rychlost ochlazování je přibližně $150 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, která pro dosažení martenzitické struktury představuje minimální povolenou rychlost ochlazování. Za účelem dosažení vyšší tvrdosti je potřeba použití vyšších rychlostí.



Obr. 28: ARA diagram oceli 12 050 [36]



Obr. 29: Rovnovážný diagram soustavy Fe-C s vyznačeným složením oceli 12050 [38]

5 MĚŘENÍ TVRDOSTI [38], [39], [40], [41]

Tvrdot materiálu představuje hlavní kritérium pro hodnocení dosažené kvality a účinnosti procesu kalení. Může být měřena pomocí několika způsobů. Zkoušky jsou děleny dle charakteru zatížení na statické a dynamické. Oproti jiným mechanickým zkouškám jsou rychlé a jednoduché. Pro správné vyhodnocení je potřeba, aby měřený povrch byl hladký bez okují, cizích vměstků a maziva. Zatížení musí působit kolmo na povrch zkušební vzorku, který je zabezpečen proti pohybu. Mezi běžně používané metody, tzv. vnikací zkoušky se řadí:

- **Měření tvrdosti dle Brinella** – je založeno na vtlačování tělesa v podobě kuličky z karbidu wolframu do zkušební materiálu. Podmínky zatěžování a průměr kuličky jsou stanoveny dle normy ČSN EN ISO 6506-1. Po odlehčení je měřen průměr vtisku na povrchu ve dvou přibližně na sebe kolmých směrech. Tvrdot je rovna podílu zvoleného zatížení a kulové plochy vtisku dle vztahu:

- **Měření tvrdosti dle Rockwella** – je stanoveno dle normy ČSN EN ISO 6508-1. Vnikací těleso má tvar diamantového kuželu s vnitřním úhlem 120° nebo kulička z karbidu wolframu. Zatížení je rozděleno na předběžné F_0 a přídavné F_1 . Měří se hloubky pro jednotlivá zatížení a jejich rozdílem je stanovena konečná hodnota tvrdosti vztahem:

6 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ [42], [43], [44]

Pracovní stanoviště pro provedení experimentu bylo sestaveno z příslušné skenovací optické hlavy upevněná na robotickém rameni, do které byl přiveden laserový paprsek pomocí optického vlákna (obrázek 31). Pro zachycení dosahovaných teplot během procesu byla do blízkosti umístěna termokamera, nainstalována pod vyhovujícím úhlem pro kompletní zobrazení kalené stopy. Vzdálenost vzorku a optické jednotky byla okolo 200 mm. Proti případnému narušení je optika chráněna vzduchovými noži tzv. „cross-jet“.



Obr. 31: Pracovní stanoviště pro zvolený experiment

- **Vláknový laser**

Jedná se o výkonový vláknový laser typ YLS 2000 od firmy IPG Photonics, jeho vlákno je dopováno prvky ytterbia s vlnovou délkou 1,07 μm . Maximální průměrný výkon dosahuje 2 kW. Pomocí optického vlákna je paprsek připojen ke skenovací hlavě, která je připevněna na robotickém rameni. Laserový paprsek je transformován pomocí optického vlákna. Zvolená jednotka je vybrána na základě požadované operace například svařování, kalení či dělení.

Tab. 6: Optické vlastnosti laseru [43]

provozní režim	pulzní /CW
opakovací frekvence	2 kHz
špičkový výkon	20 kW
doba trvání pulsu	0,2 – 10 ms



Obr. 32: Vláknový laser Yb: YAG

- **Skenovací hlava – Arges Rhino Fiber**

Jedná se o 2D skenovací optiku, která je vhodná pro použití s vláknovými nebo diodovými lasery transformované do místa aplikace optickým vláknem. Pomocí této optiky je možné kalit metodou dynamického rozkmitu laserového svazku v obousměrném i jednosměrném režimu. Procesní rychlost posunu laserového paprsku a velikost posunu laserového svazku, představují dva stěžejní parametry. Jejich vliv na výslednou kalenou stopu byl pozorován v průběhu experimentu.



Obr. 33: Skenovací hlava Arges Rhino Fiber [44]

- **Termokamera - FLIR A310**

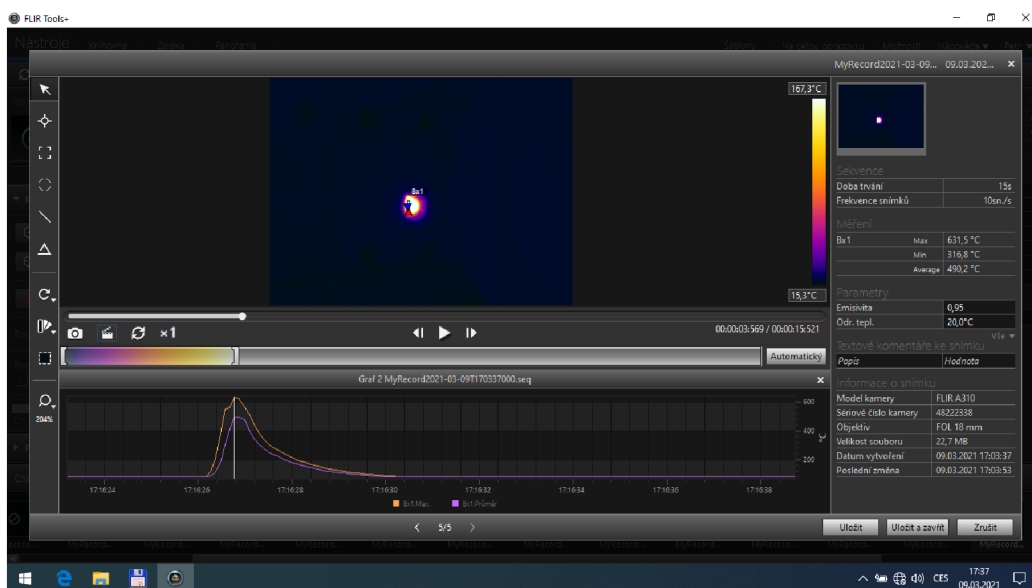
Profesionální stacionární termokamera byla použita pro bezkontaktní měření teploty v průběhu procesu kalení. Zaznamenávána byla průměrná a maximální teplota. Pro tento případ bylo nutné použití detektoru pro vyšší rozsah teplot až do teploty 1200 °C.



Obr. 34: Termokamera FLIR A310 [42]

Tab. 7: Technické parametry [42]

rozlišení senzoru	320 x 240 pixelů
teplotní rozsah	-20 °C...+350 °C
obnovovací frekvence	8 Hz
rozměry	170 x 70 x 70 mm



Obr. 35: Ukázka náhledu průběhu záznamu termokamery

- **Robotické rameno ABB**

IRB 2400 je celosvětově nejpopulárnějším průmyslovým robotem. Jeho robustní provedení a použití minimálního počtu dílů přispívají k vysoké spolehlivosti a dlouhým intervalům mezi jednotlivými servisními zásahy.

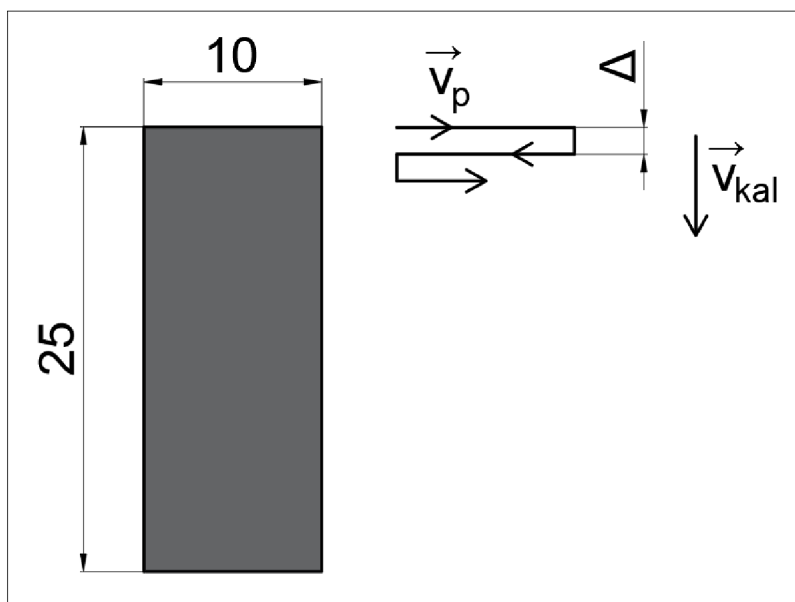


Obr. 36: Robotické rameno ABB[45]

Metalografické vzorky byly odborně zpracovány dle metalografických předpisů a norem.

7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Pomocí zmíněného vláknového laseru s režimem dynamického rozkmitu svazku popsaného výše, byly vytvořeny vzorky kalených stop o konečné velikosti 10 x 25 mm. Působení laserového paprsku bylo nastaveno v obousměrném režimu. Výkon laseru byl zvolen 2 kW. V rámci parametrů skenovací optiky byl zkoumán vliv dvou parametrů. Prvním je procesní rychlost laserového svazku v_p a druhým velikost posunu Δ , parametry jsou znázorněny na obrázku 37. Kalicí rychlost v_{kal} pak představuje výslednou rychlost kalení, která je zcela závislá na volbě výše zmíněných parametrů.



Obr. 37: Zobrazení kalené stopy a schéma pohybu laserového svazku

Zvolený materiál 12 050 je vhodný pro povrchové kalení, díky obsahu uhlíku v intervalu 0,42 – 0,50 lze u tohoto materiálu dosahovat již velmi vysoké tvrdosti. Konkrétní složení a mechanické vlastnosti použitého materiálu 12 050 jsou uvedeny v tabulkách 8 a 9. Dodán byl v normalizovaném stavu. Poskytnutý atest je uveden v příloze.

Tab. 8: Konkrétní chemické složení oceli 12 050

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	V
0,49	0,30	0,62	0,021	0,007	0,041	0,002	0,004
Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	B	H2	N2
0,01	0,01	0,03	0,001	0,002	0,0002	0,0009	0,0063
Uhlíkový ekvivalent je roven 0,60.							

Tab. 9: Konkrétní mechanické vlastnosti oceli 12 050

Mez kluzu $R_{p0,2}$	437	MPa
Mez pevnosti v tahu R_m	654	MPa
Tažnost A (délka vzorku $L_0 = 90$ mm)	33	%

Procesní rychlost byla volena v rozsahu od 2 000 do 5 000 mm/s a velikost posunu od 0,02 do 0,1 mm. Samotná šířka skenovacího paprsku byla 0,02 mm. Bylo zakaleno 18 vzorků v různých kombinacích, které byly stanoveny na základě vzhledu kaleného povrchu a předpokládaného vlivu parametrů na orientačně měřenou tvrdost dle Rockwella v průběhu experimentu. Po dohodě byla od druhého vzorku zaznamenávána průměrná a maximální

dosažená teplota pomocí termokamery s konstantní hodnotou emisivity 0,95 pro všechny vzorky (obrázek 38).



Obr. 38: Ukázka vzorků

7.1 Výběr vzorků

Na základě orientačních hodnot tvrdosti dle Rockwella, které byly měřeny ve třech pozicích podél osy stopy, bylo vybráno 9 vzorků pro následné vyhodnocení makrostruktury, mikrostruktury a mikrotvrdosti. Získané hodnoty tvrdosti byly brány pouze jako orientační, kdy z důvodu neznámé hloubky zakalené vrstvy mohlo dojít k proniknutí indentoru na základní materiál a zkreslení výsledků. V tabulce 10 je uveden seznam zpracovávaných vzorků.

Tab. 10: Vybrané vzorky (zadané parametry, tvrdost dle Rockwella, teplota)

označení vzorku	Δ [mm]	v [mm.s ⁻¹]	tvrdost dle Rockwella [HRC]			teplota [°C]	
			1/4	1/2	3/4	t_{\max}	$t_{\text{prům}}$
K01	0,03	2000	39	41	45	-	-
K03	0,03	4000	42	45	47	597	511
K06	0,04	4000	37	39	45	553	461
K07	0,02	3000	39	38	46	754	594
K09	0,02	5000	43	44	41	639	524
K13	0,05	2000	32	48	46	698	562
K14	0,07	2000	38	39	35	594	463
K15	0,1	2000	15	21	10	543	375
K16	0,03	4500	36	36	50	631	490

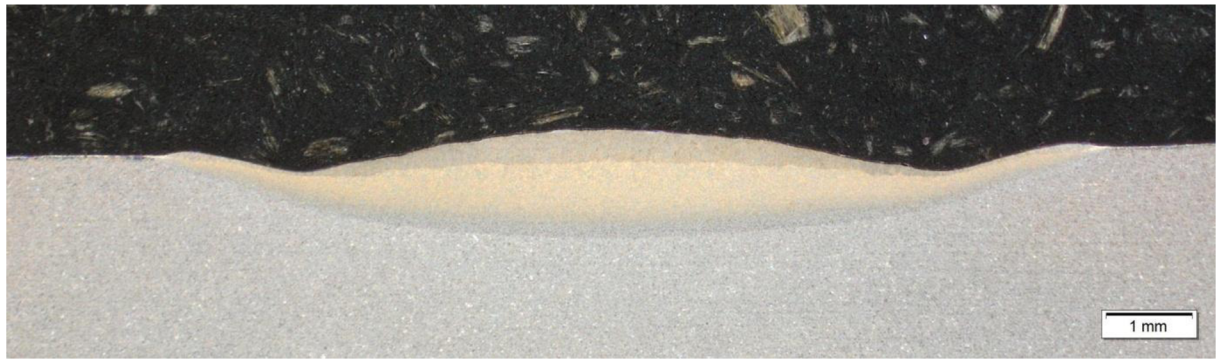
7.2 Makrostruktura a mikrotvrdost

Na základě makrostruktury společně s mikrotvrdostí byla hodnocena získaná hloubka zakalených vrstev. V případě vzorků K01 a K07 bylo dosaženo nejvyšší hloubky okolo 1 mm. Nejnižší hloubka byla naměřena pro vzorek K15 s nejvyšším zvoleným posunem 0,1 mm. Všechny dosažené hloubky prokalení jsou uvedeny v tabulce 11.

Tab. 11: Hloubka prokalení vzorků

označení vzorků	K01	K03	K06	K07	K09	K13	K14	K15	K16
hloubka prokalení [mm]	1,15	0,6	0,45	0,95	0,75	0,85	0,5	0,3	0,65

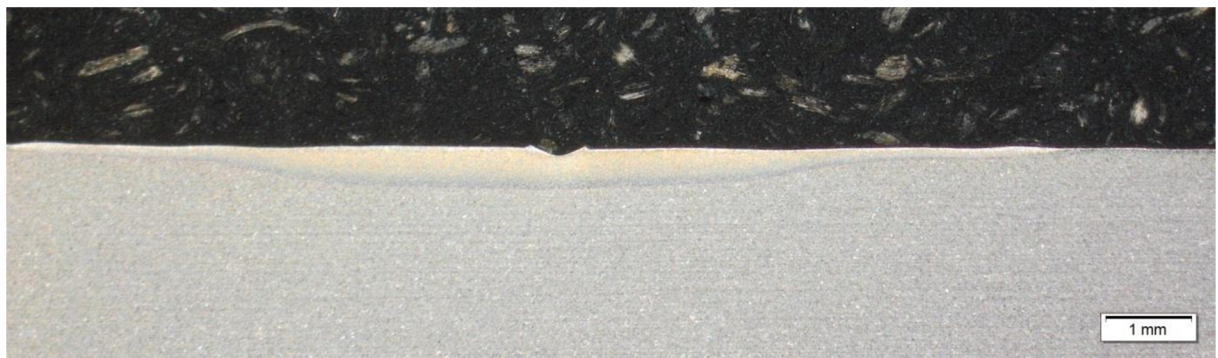
Jednotlivé snímky makrostruktury všech vzorků jsou uvedeny na obrázcích 39 až 47.



Obr. 39: Vzorek K01 ($\Delta = 0,03 \text{ mm}$; $v = 2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)



Obr. 40: Vzorek K03 ($\Delta = 0,03 \text{ mm}$; $v = 4000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)



Obr. 41: Vzorek K06 ($\Delta = 0,04 \text{ mm}$; $v = 4000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)



Obr. 42: Vzorek K07 ($\Delta = 0,02 \text{ mm}$; $v = 3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)



Obr. 43: Vzorek K09 ($\Delta = 0,02 \text{ mm}$; $v = 5000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)



Obr. 44: Vzorek K13 ($\Delta = 0,05 \text{ mm}$; $v = 2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)



Obr. 45: Vzorek K14 ($\Delta = 0,07 \text{ mm}$; $v = 2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)



Obr. 46: Vzorek K15 ($\Delta = 0,1 \text{ mm}$; $v = 2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)

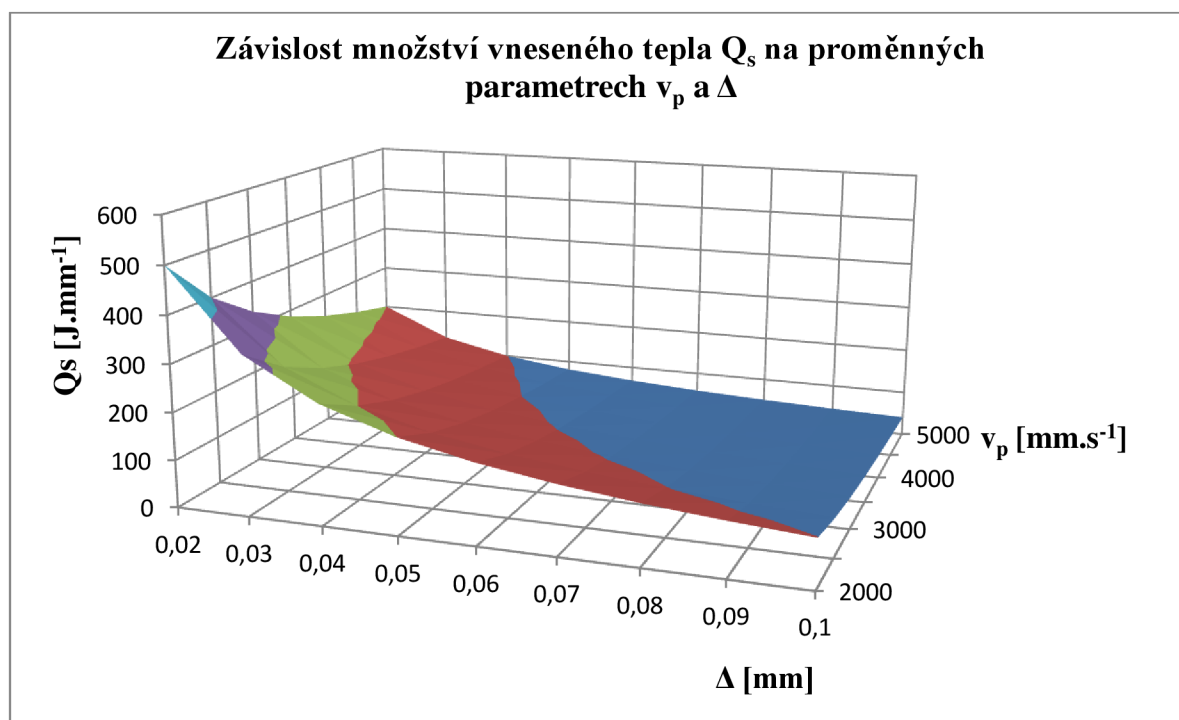
Obr. 47: Vzorek K16 ($\Delta = 0,03 \text{ mm}$; $v = 4500 \text{ mm.s}^{-1}$)

Pomocí procesních parametrů byla vypočítána hodnota specifického vneseného tepla, která je závislá na výkonu laseru a kalící rychlosti. V tomto případě však tato rychlost není nijak nastavena a je nutné ji dopočítat dle rovnice (7). Spočítána byla její teoretická hodnota z rozměrů kalené stopy. Podle známého posunu byl získán počet přejezdů paprsku a celková délka skenované trajektorie. Tato dráha byla podělena nastavenou hodnotou procesní rychlosti. Jedná se tedy o teoretickou hodnotu, při které je zanedbáno zpomalení při překmitu svazku.

Tab. 12: Seznam parametrů a hodnot rychlosti kalení a vneseného tepla

označení vzorku	rychlost v_p [mm.s ⁻¹]	posun Δ [mm]	počet přejezdů	celkový čas [s]	rychlost v_{kal} [mm.s ⁻¹]	vnesené teplo Q_s [J.mm ⁻¹]
K01	2000	0,03	834	4,183	5,977	267,7
K03	4000	0,03	834	2,091	11,955	133,84
K06	4000	0,04	625	1,803	15,936	100,4
K07	3000	0,02	1250	4,175	5,988	267,2
K09	5000	0,02	1250	2,505	9,980	160,3
K13	2000	0,05	500	2,513	9,950	160,8
K14	2000	0,07	358	1,803	13,870	115,4
K15	2000	0,1	250	1,263	19,802	80,8
K16	4500	0,03	834	1,859	13,449	119,0

V grafu 1 je zobrazena plocha závislosti vneseného tepla na volených procesních parametrech. Závislosti obou parametrů na vneseném teple mají hyperbolický charakter. Velikost vneseného tepla klesá se zvyšujícími se parametry nejdříve rychle a následně pomalěji.

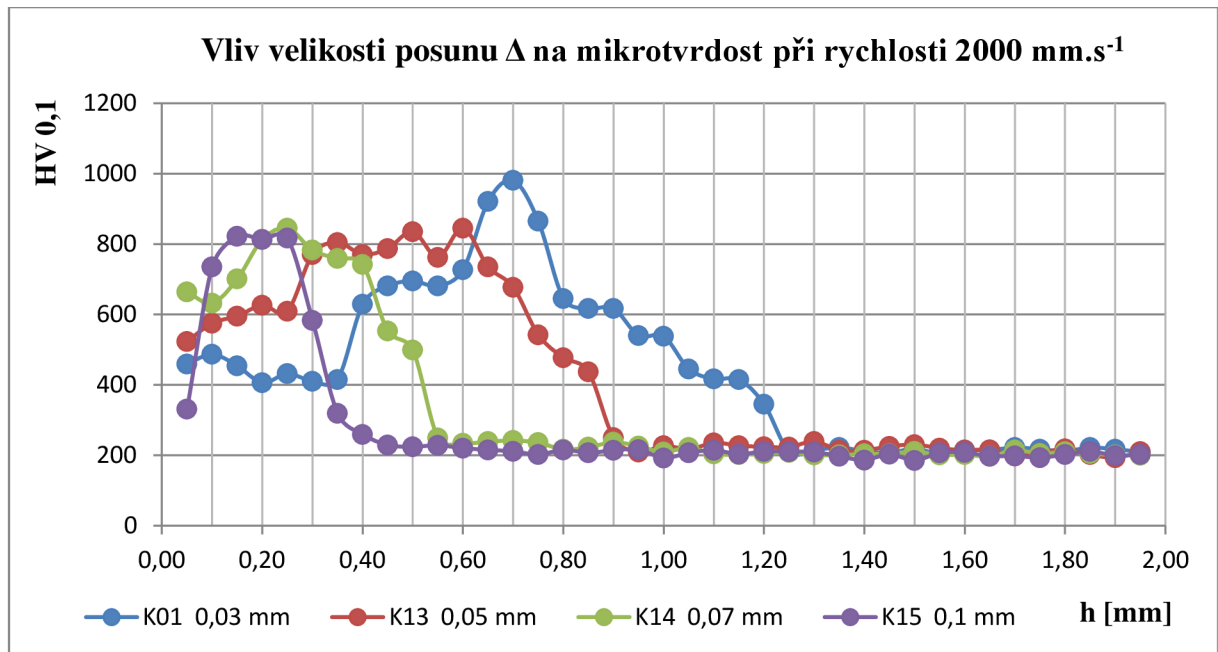


Graf 1: Závislost vneseného tepla na zvolených parametrech

S malými posuny a procesními rychlostmi zároveň jsou do materiálu vnesena tak velká množství tepla, že dochází k výraznému natavení povrchové vrstvy a snížení její tvrdosti. Mikrotvrdość v této oblasti klesá až k hodnotám v rozmezí 300 až 400 HV0,1. Což představuje vytvrzení pouze na 1,5 až 2násobek původní struktury. Pro zvýšení tvrdosti je potřeba volit větší velikosti posuvu.

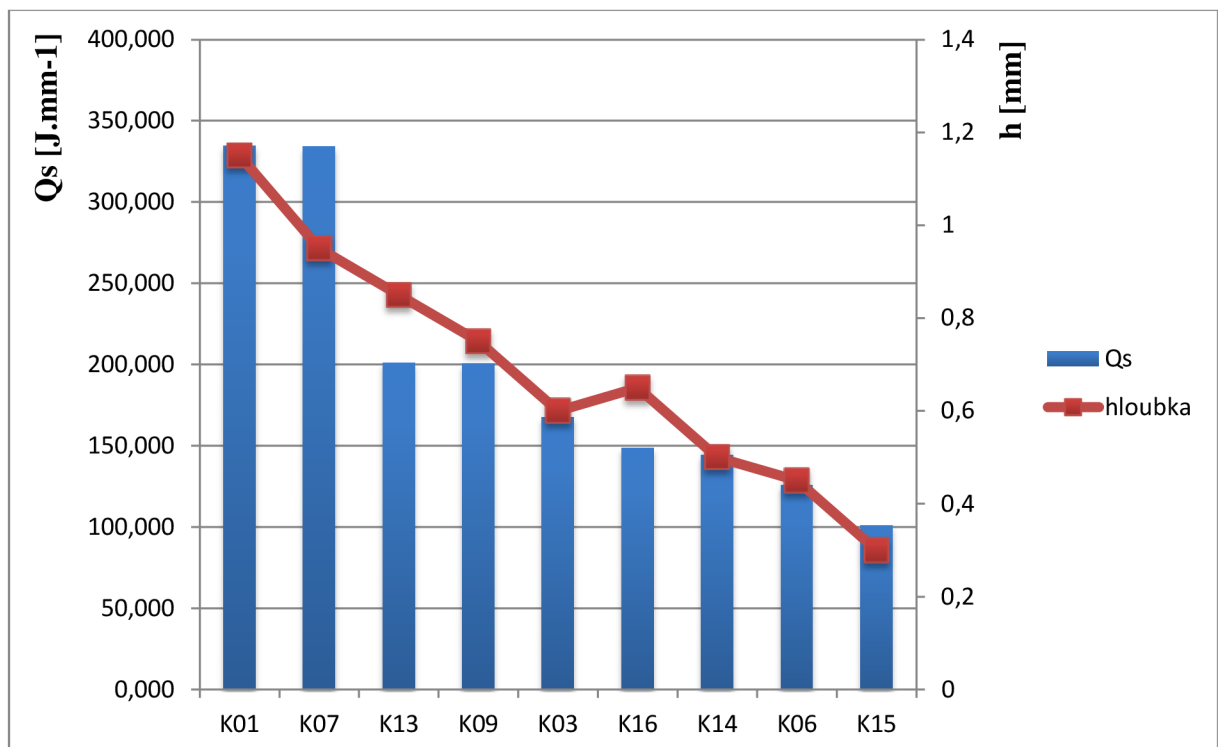
Vliv jeho velikosti je zobrazen v grafu 2, kde procesní rychlost je pro všechny uvedené vzorky shodná 2000 mm.s⁻¹. Volbou posuvu lze ovlivňovat hloubku prokalené vrstvy. A míru snížení tvrdosti v natavené povrchové vrstvě. Vzorky kalené pomocí malého posuvu jsou více

natavené a tvrdost na povrchu je výrazně nižší. Vzorek K15 s nejvyšší hodnotou posuvu v rámci experimentu dosahuje vysoké tvrdosti téměř okamžitě. Dochází k výraznému zvýšení tvrdosti v blízkosti povrchu vzorku, doprovázeno se stejně podstatným snižováním hloubky prokalení.



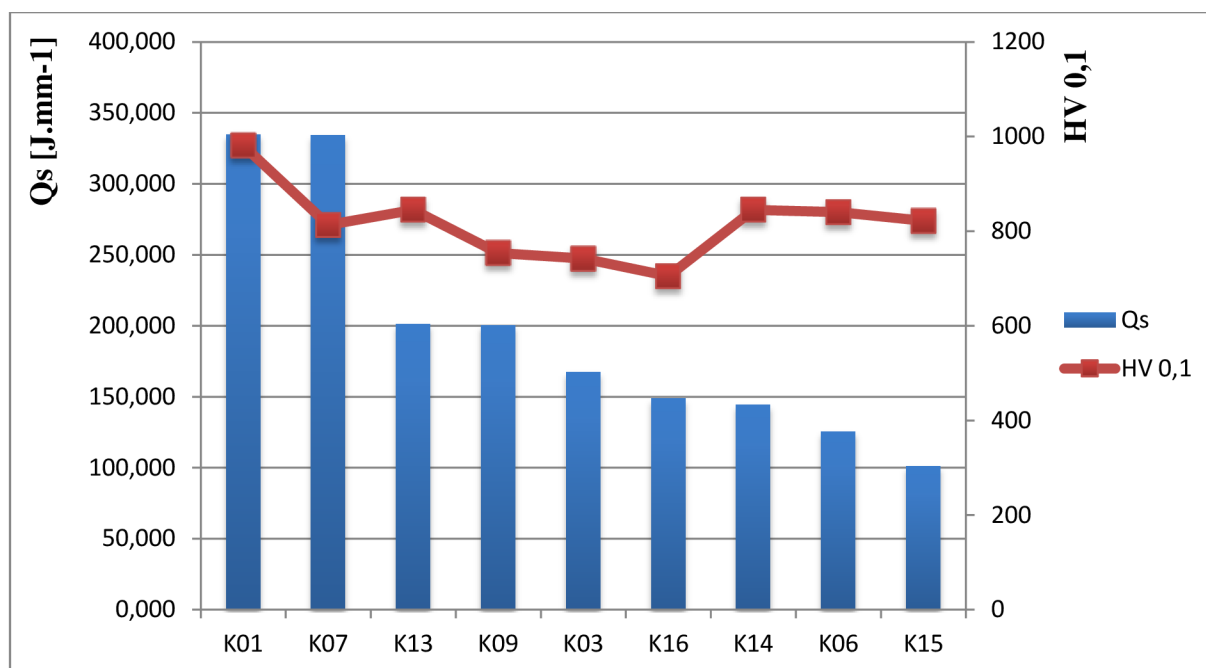
Graf 2: Vliv velikosti posuvu na mikrotvrdosti

Hloubka prokalení je závislá na množství vneseného tepla, které určuje hloubku prohřátí materiálu. Porovnání je zobrazeno v grafu 3.



Graf 3: Porovnání hodnot vneseného tepla a dosažené hloubky prokalení

V grafu 4 je znázorněna závislost maximální hodnoty mikrotvrdoosti na vneseném teple. V tomto případě nejsou tyto veličiny na sobě výrazněji závislé. Při laserovém kalení jsou rychlosti ochlazování dostatečně vysoké pro vznik podobných velmi vysokých tvrdostí pro velká i menší množství vneseného tepla.



Graf 4: Porovnání vneseného tepla s maximální dosaženou hodnotou mikrotvrdoosti HV 0,1

- **Porovnání dvojic vzorků s podobným množstvím vneseného tepla**

Tab. 13: Porovnání vzorků K01 a K07

označení	v_p [$mm \cdot s^{-1}$]	Δ [mm]	max. HV 0,1	h [mm]	$h_{natavené}$ [mm]
K01	2000	0,03	981	1,15	0,35
K07	3000	0,02	813	0,95	0,2

Vzorek K01 dosahuje vyšší maximální hodnoty mikrotvrdoosti a větší hloubky prokalení. U obou vzorků došlo k natavení povrchu. Hloubka natavení je větší u vzorku K01. Mikrotvrdoost v přetavené oblasti je méně snížena u vzorku K01. Jeho procesní rychlost je nižší a posun větší než vzorku K07.

Tab. 14: Porovnání vzorků K09 a K13

označení	v_p [$mm \cdot s^{-1}$]	Δ [mm]	max. HV 0,1	h [mm]	$h_{natavené}$ [mm]
K09	5000	0,02	754	0,75	0,1
K13	2000	0,05	845	0,85	(0,25)

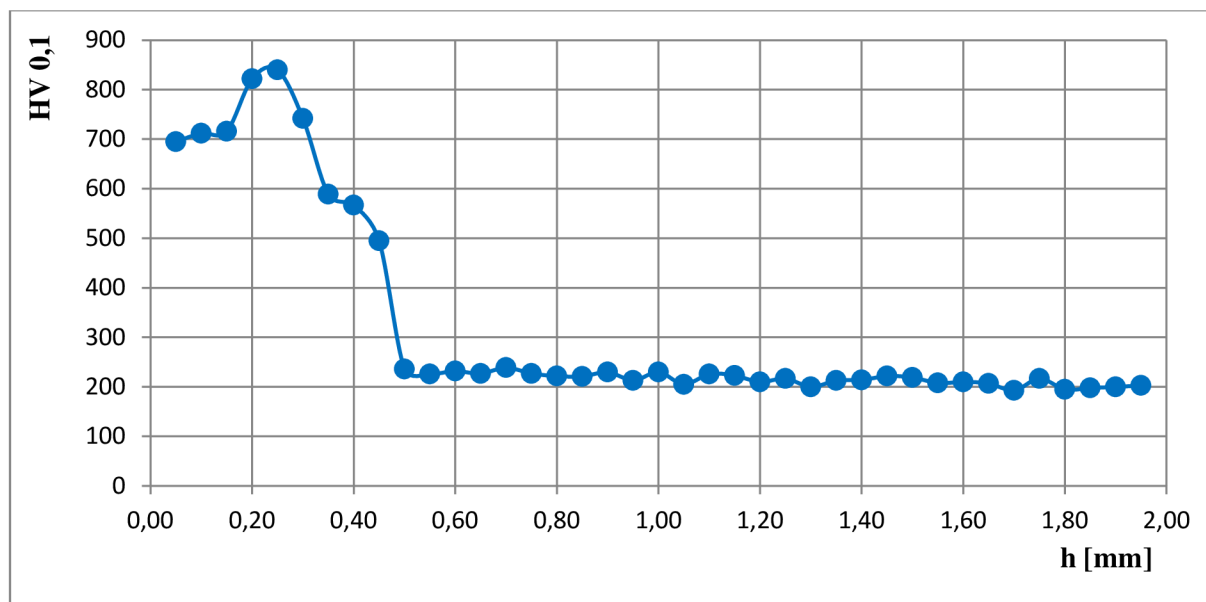
Vzorek K13 dosahuje vyšší maximální hodnoty mikrotvrdoosti, větší hloubky prokalení. U obou vzorků došlo k natavení povrchu. Hloubka natavení je větší u vzorku K13, avšak s velmi výraznou tvrdostí okolo 600 HV_{0,1}. Procesní rychlost je nižší a posun větší než vzorku K09.

Tab. 15: Porovnání vzorků K14 a K16

označení	v_p [$mm \cdot s^{-1}$]	Δ [mm]	max. HV 0,1	h [mm]	$h_{natavené}$ [mm]
K14	2000	0,07	845	0,5	(0,1)
K16	4500	0,03	705	0,65	0,15

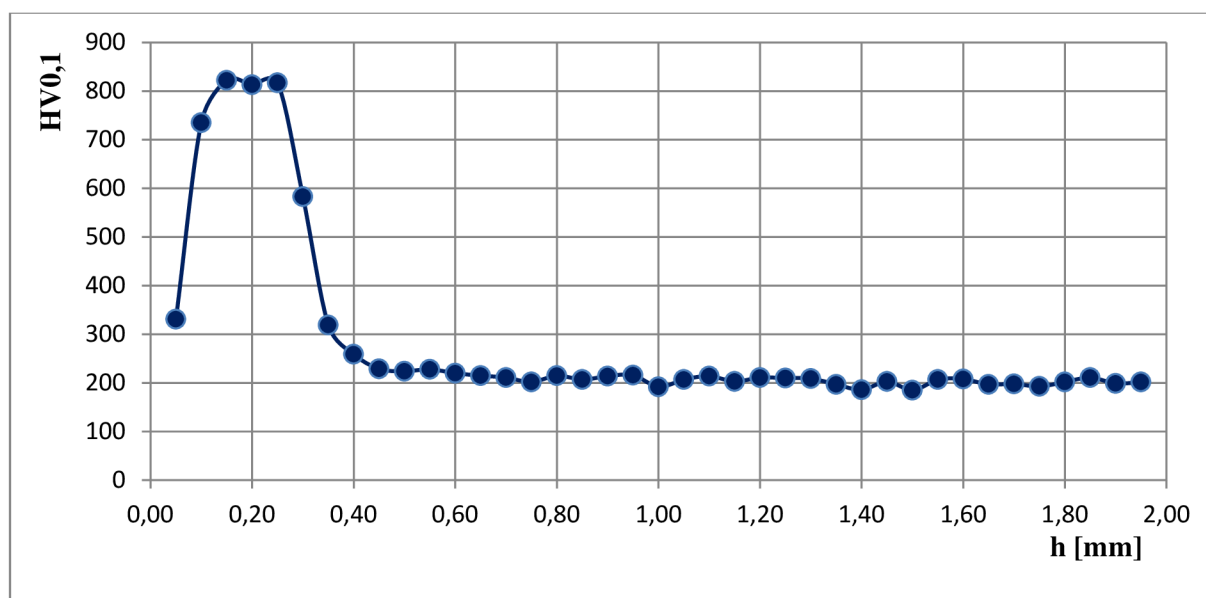
Vzorek K14 dosahuje vyšší maximální hodnoty mikrotvrlosti, nižší hloubky prokalení. U obou vzorků došlo k natavení povrchu. Hloubka natavení je menší u vzorku K14, a zároveň s velmi vysokou tvrdosti nad 600 HV_{0,1}. Procesní rychlost je nižší a posun větší než u vzorku K16.

Významný vliv na končenu mikrotvrlost kalené vrstvy má zvolená procesní rychlost. Pomocí nejnižší zkoumané rychlosti 2000 mm.s⁻¹ byly získány nejvyšší hodnoty větší než 800 HV_{0,1}. Pro vyšší rychlosti byly zaznamenány nižší tvrdosti. Pouze s výjimkou vzorku K06, jehož průběh mikrotvrlosti je uveden na grafu 5.



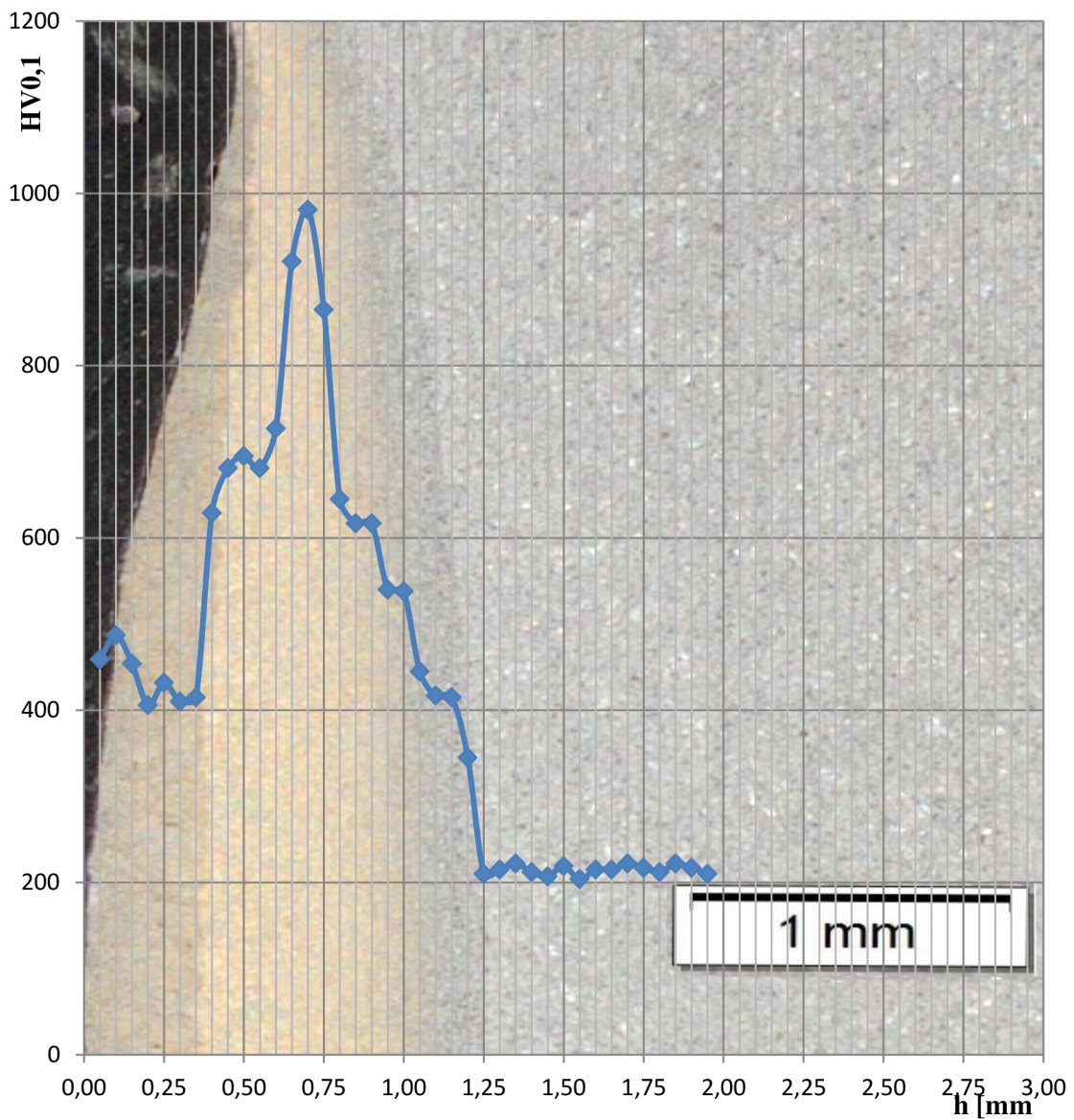
Graf 5: Průběh mikrotvrlosti vzorku K06

U většiny vzorků došlo k natavení povrchu materiálu, pouze v případech vzorků K06 a K15 byly hodnoty vneseného tepla nejnižší a nedošlo v těchto případech nedošlo k natavení nebo pouze minimálnímu. Z výsledků mikrotvrlosti je patrné, že tvrdost materiálu se zvyšuje téměř okamžitě pod povrchem a na snímcích makrostruktury není patrná výrazná změna vzhledu stopy.



Graf 6: Průběh mikrotvrlosti vzorku K15

Na základě včlenění makrostruktury do grafu mikrotvrdosti jsou dobře pozorovatelné jednotlivé oblasti kalené struktury a jejich rozhraní (graf 7).



Graf 7: Srovnání makrostruktury a mikrotvrdosti

7.3 Mikrostruktura

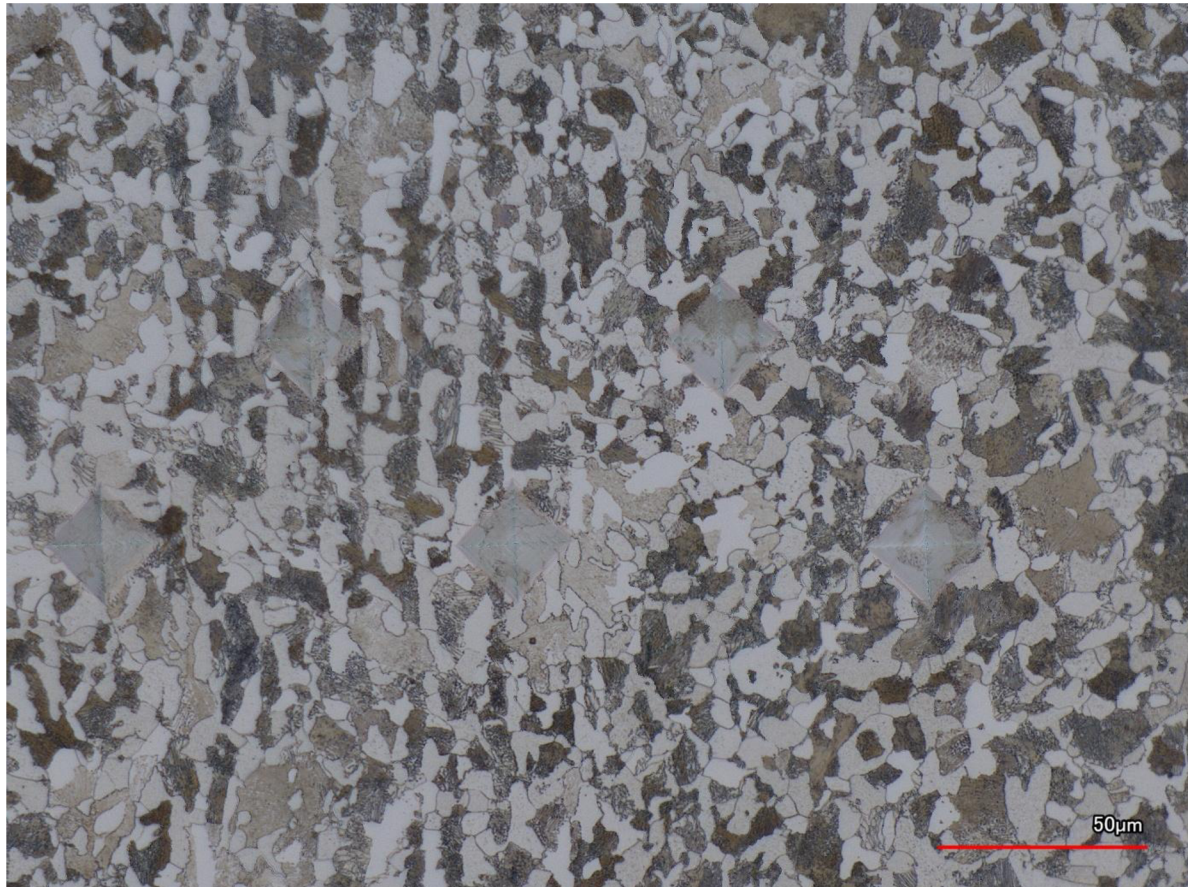
Pro vyhodnocení mikrostruktury byl vybrán pouze jeden vzorek. Konkrétně K07, který dosahuje výrazné hloubky prokalení okolo 1 mm, maximální hodnoty mikrotvrdosti přibližně 800 HV_{0,1} a na povrchu materiálu došlo k natavení do vzdálenosti 0,2 mm. Pro ostatní vzorky je předpokládáno dosažení velmi podobných struktur. Zakalené struktura byla získána bez přítomnosti vad a trhlin.

Na obrázku 48 je možné pozorovat průběh dosažené tvrdosti materiálu pomocí velikosti viditelných vtisků po měření mikrotvrdosti. Přejít jednotlivých struktur začíná od základního materiálu přes přechodovou oblast, kalenou strukturu a nakonec hrubozrnná struktura vzniklá natavením.



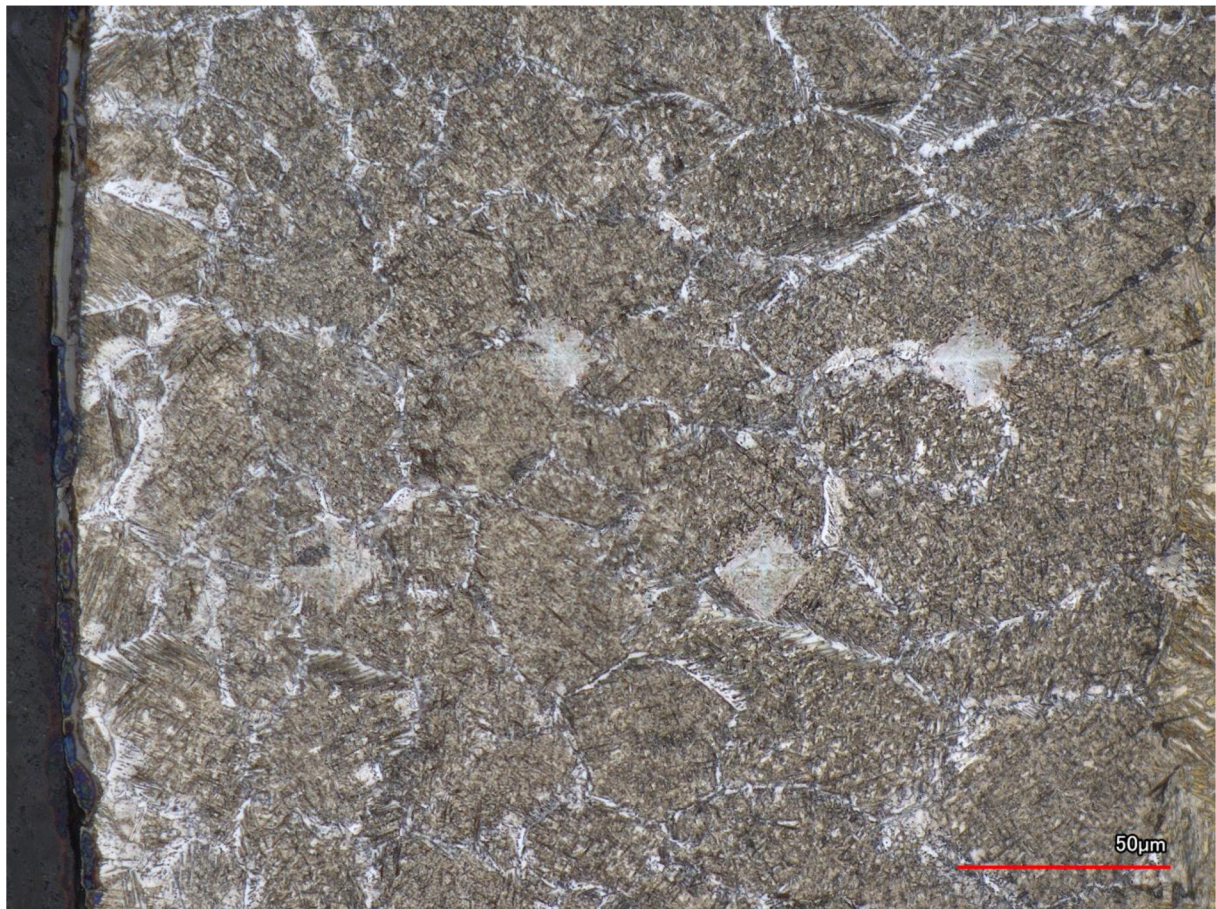
Obr. 48: Mikrostruktura přechodu kalené vrstvy do základního materiálu

Základní materiál obsahuje feriticko-perlitickou strukturu. Na obrázku 49 lze pozorovat světlá zrna, která představují ferit a zbylá zrna náleží lamelárnímu perlitu. Struktura je poměrně jemnozrnná, dle měřítka velikost zrna odpovídá přibližně 10 μm. Zároveň jsou na snímku opět vidět poměrně velké vtisky. Dosahovaná tvrdost základního materiálu je přibližně 200 HV_{0,1}.



Obr. 49: Mikrostruktura základního materiálu

Na obrázku 52 je zobrazena zálková struktura v povrchové části, ve které došlo k natavení. Z důvodu přítomnosti velkého množství tepla došlo k pomalejšímu ochlazení a odpovídajícímu zhrubnutí zrna. Jedná se o hrubozrnnou strukturu s převážnou částí martenzitu, jednotlivá zrna mírně protáhlá ve směru odvodu tepla jsou poměrně dobře viditelná o velikosti přibližně 50 μm . Z taveniny v případě zvoleného materiálu se primárně tvoří δ ferit, který je následně transformován na austenit a poté je možné získat zálkovou strukturu martenzit. Na okrajích zrn je vidět světlou fází představující pravděpodobně feritickou strukturu Widmanstättenova typu s výraznými jehlicemi, která vznikla díky dostatečně rychlému ochlazení. Dosahuje vyšší tvrdosti než původní feriticko-perlitická struktura, ale ne takových hodnot jako martenzit či bainit. Poměrně značné množství této fáze je hlavním důvodem výrazného snížení mikrotvrdosti. Dalším důvodem je již zmíněné zhrubnutí zrna.



Obr. 52: Snímek mikrostruktury přetavené oblasti pod povrchem

8 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

V případě porovnání výše zmíněných metod laserového kalení s pevnou optikou a dynamickým rozkmitem laserového svazku je hlavním rozdílem variabilita šířky kalené stopy v případě skenovací metody. Pomocí pevné optiky je stanovena šířka konstantní pro daný optický integrátor pro všechny operace. Rozhodnutí mezi těmito metodami o začlenění jedné z těchto aplikací do výrobního procesu se odvíjí především od potřeb výroby. Cena skenovacího zařízení, které je výrazně složitější, se pohybuje přibližně na dvojnásobku ceny optického integrátoru.

Použití kalení pomocí pevné optiky se hodí pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Naproti tomu použití kalení s dynamickým rozkmitem svazku je vhodné pro zakázkovou výrobu a výrobu menších sérií.

9 ZÁVĚRY

K hlavním cílům práce náleželo osvojení si příslušných technologií použitých v průběhu experimentu. Především technologie laserového povrchového kalení pomocí rozkmitu laserového svazku. Dále bylo začleněno bezkontaktní měření povrchové teploty s použitím termokamery a výsledné vzorky zakalených vrstev byly metalograficky zkoumány.

Jednotlivé kalené stopy byly tvořeny různými kombinacemi dvou zvolených parametrů příslušné skenovací hlavy. Na základě vyhodnocení makrostruktury, mikrotvrdomosti a mikrostruktury byl zkoumán jejich vliv na výsledné zakalení. V rámci zkoumaných vzorků byly dosaženy vysoké hodnoty mikrotvrdomosti, pro šest vzorků K01, K06, K07, K13, K14 a K15 byla naměřena 800 HV0,1. V případě vzorků K01 a K07 došlo zároveň k zakalení materiálu do hloubky přibližně 1 mm. V rámci mikrostruktury byla dosažena jemnozrnná martenzitická struktura, která dosahuje zmíněné tvrdosti.

Během kalení došlo u většiny vzorků k natavení povrchové vrstvy, což ovlivnilo průběh mikrotvrdomosti a v blízkosti povrchové vrstvy byly zjištěny hodnoty mikrotvrdomosti nižší. Velikost poklesu této tvrdosti záležela na množství specifického vneseného tepla do materiálu, zda mohlo dojít k tvorbě hrubozrnné martenzitické struktury. Pouze pro vzorky K06 a K15 nebylo zjištěno natavení, případně bylo minimální.

Pro první parametr procesní rychlosti svazku byl zjištěn vliv na maximální dosaženou tvrdost kalené vrstvy. Pro nižší rychlosti byly zjištěny vyšší dosažené mikrotvrdomosti. Při hodnocení druhého parametru velikosti posunu svazku byl pozorován zásadní vliv na hloubku prokalení. A také vliv na mikrotvrdomost v oblasti základné struktury vzniklé natavením. Při nižších velikostech posunu, bylo vnášeno do materiálu větší množství tepla a mikrotvrdomost v blízkosti povrchu, kvůli pomalejšímu ochlazení dosáhla velmi malého vytvrzení v porovnání s původním materiálem.

Z uvedených vlivů obou parametrů se jeví pro dosažení maximální tvrdosti jako vhodná volba nižší procesní rychlosti např. $2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a velikost posunu svazku je zvolena na základě potřebné hloubky prokalení. Tato úvaha je platná za předpokladu shodného rozkmitu paprsku s experimentem.

Seznam použitých zdrojů [46]

- [1] MOCEK, Tomáš. Laser: supernástroj člověka 21. století. Praha: Academia, 2017. s. [4]-[5]. ISBN 978-80-200-2691-0. Dostupné z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:2aad9c0-39bf-11e9-8666-005056825209>
- [2] KUSALA, Jaroslav. Aplikace laserů. Vzdělávací program Svět energie [online]. 2004 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap3.htm>
- [3] *Kurz tepelného zpracování: učební texty*. Praha: Ecosond, 2009, s. [1a]. ISBN 978-80-904462-1-2. Dostupné z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:dd7d9ef0-577f-11e7-a0c9-005056825209>
- [4] SKÁLOVÁ, Jana, KOUTSKÝ, Jaroslav, MOTYČKA, Vladislav a Strojní fakulta. *Nauka o materiálech*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. s. 120. ISBN 978-80-7043-874-9. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:42cf8490-5b8d-11e4-90c9-005056825209>
- [5] Indukční kalení a kalící stroje. *Rajmont* [online]. 2021 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-kaleni/>
- [6] DAĐOUREK, Karel. Liberec: KM SF Technická univerzita v Liberci. přednáška Teorie tepelného zpracování. 2007.
- [7] Induction hardening of steel (surface hardening). *TEC-Science* [online]. [cit. 2021-5-1] Dostupné z: <https://www.tec-science.com/material-science/heat-treatment-steel/induction-hardening-surface-hardening/>
- [8] Induction/flame hardening. *Open University* [online]. 2018 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/induction/flame-hardening>
- [9] Gear Flame Hardening; Hardening of Steel And Hardening of Cast Iron. *Flame Treating Systems, Inc* [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://flametreatingsystems.com/gear-flame-hardening-3/>
- [10] RUDNEV, Valery; LOVELESS, Don; COOK, Raymond L. *Handbook of induction heating*. CRC press, 2017. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=dDoPEAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [11] HLUCHÝ, M.; MODRÁČEK, O.; PAŇÁK, R. Strojírenská technologie 1–2. díl Metalografie a tepelné zpracování. 1. vyd. Praha: Scientia, spol. s ro, 2002.
- [12] Plazmová nitridace. High Performance Metals CZ s.r.o. [online]. 2019 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.boehler.cz/technologie/plazmova-nitridace>

- [13] BENKO, Bernard. *Laserové technologie*. Bratislava: Vydavatelství Slovenské technické univerzity, 2000. Edice monografií. ISBN 80-227-1425-9.
- [14] MORAVEC, Jaromír. *Teorie svařování a pájení II: speciální metody svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009, 150 s. ISBN 978-80-7372-439-9.
- [15] Možné dělení typů a druhů laserů. *Leonardo Technology s.r.o.* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [16] 9. dubna 1963 byl spuštěn první československý laser. *Fyzikální ústav AV ČR*. [online]. 2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/aktuality/9-dubna-1963-byl-spusten-prvni-ceskoslovensky-laser>
- [17] SANTISI, Jen. C. Kumar N. Patel In: *National Science & Technology Medal Foundation* [online] [cit. 2021-5-5] Dostupné z: <https://nationalmedals.org/laureate/c-kumar-n-patel/>
- [18] KANNATEY-ASIBU JR, Elijah. Principles of laser materials processing. , Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, 2009 [online]. [cit. 2021-5-4] Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470459300>
- [19] Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2017, **90**, 72-80 [cit. 2021-5-21]. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816616302664>
- [20] FISHER, John C. A Brief History of the Nd: YAG Laser. In: *Advances in Nd: YAG Laser Surgery* [online]. Springer, New York, NY, 1988. p. 7-9. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-3728-02>
- [21] Nd:YAG_laser. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nd:YAG_laser
- [22] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red. *Leonardo Technology s.r.o.* [online]. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [23] Nd:YAG laser. *OneIndustry LEXIKON* [online]. 11.7.2019 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.one/lexikon/ndyag-laser/>
- [24] KOŘÁN, Pavel. Základní přehled průmyslových laserů. *LAO - průmyslové systémy, s.r.o.* [online]. 19.2.2011 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [25] Rozdělení laserů. *LASCAM systems* [online]. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [26] Lasery pro průmysl. *Průmyslové spektrum* [online]. 9.7.2008 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl>

- [27] Historie vývoje laseru. *Leonardo Technology s.r.o.* [online]. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>
- [28] CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. SLO UP a FZÚ AV ČR. Olomouc. 2011. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_4prez.pdf
- [29] Laserové svařování. In: *LaserTherm s.r.o* [online] [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu>
- [30] Laser Heat Treating and Surface Hardening. *TLM Laser Ltd Global HQ* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.tlm-laser.com/laser-applications/laser-heat-treating>
- [31] Scanning lasers offer potential for surface hardening of steel components. *Powder Metallurgy Review* [online]. 14.2.2017 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.pmr-review.com/scanning-lasers-offer-potential-surface-hardening-steel-components/>
- [32] Laserem nebo indukci. *Kovomont Přerov - spol. s r.o.* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.laskal.cz/laserem-nebo-indukci/>
- [33] Kalení efektivně a ekologicky pomocí laseru. *LASCAM systems* [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/kaleni-laserem/>
- [34] Laser Material Processing in Industrial Production. *Laserline GmbH* [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/>
- [35] MRŇA, Libor. Brno: Vysoké učení technické v Brně. přednáška Kalení a navařování laserem. [online]. 2020. [cit. 2021-5-8] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_kaleni_a_navarovani_laserem_2020_mrna.pdf
- [36] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:eb1c06a0-38fb-11e9-844c-005056827e51>
- [37] ČSN 41 2050. Ocel 12 050 [online]. Praha: Český normalizační institut, 1976 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <http://csnonlinevstup.agentura-cas.cz>. Třídící znak 41 2050.
- [38] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002. s. [Ia]. ISBN 80-7204-248-3. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:db2b0bd0-c655-11e6-bf97-005056825209>
- [39] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda* [online]. Praha: Český normalizační institut, 1999 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <http://csnonlinevstup.agentura-cas.cz>. Třídící znak 42 0374.

- [40] ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <http://csnonlinevstup.agentura-cas.cz>. Třídící znak 42 0359.
- [41] ČSN EN ISO 6508-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 1: Zkušební metoda* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <http://csnonlinevstup.agentura-cas.cz>. Třídící znak 42 0360.
- [42] Stacionární termokamery FLIR A300 a FLIR A310. *W-Technika group s.r.o* [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-a300-flir-a310/>
- [43] IPG PHOTONICS [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en>
- [44] ARGES [online]. [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.arges.de/arges-gmbh/>
- [45] IRB 2400. ABB [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-2400>
- [46] *Citace PRO* [online]. Brno: Citace.com, ©2012-2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>Označení</i>	<i>Legenda</i>	<i>Jednotka</i>
D	průměr kuličky indentoru	mm
d, d ₁ , d ₂	průměr, délka vtisku	mm
d _m	průměr paprsku na výstupu z rezonátoru	mm
F	zatěžující síla	N
HB	tvrdost dle Brinnella	-
HRA, HRC, HRD	tvrdost dle Rockwella	-
HV	tvrdost dle Vickerse	-
M _s	teplota martenzit start	°C
Q _s	specifické vnesené teplo	J.mm ⁻¹
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	MPa
R _m	smluvní mez pevnosti	MPa
v _{kal}	kalící rychlost	mm.s ⁻¹
v _p	procesní rychlost	mm.s ⁻¹
λ	vlnová délka záření	mm

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Laserem kalená vrstva [26]</i>	9
<i>Obr. 2: Indukční kalení [8]</i>	10
<i>Obr. 3: Kalení plamenem, metoda otočná [9]</i>	10
<i>Obr. 4: Ukázka cementační vrstvy [3]</i>	11
<i>Obr. 5: Ukázka iontové nitridace [12]</i>	11
<i>Obr. 6: Porovnání různých způsobů vytvrzování [3]</i>	12
<i>Obr. 7: Základní schéma laseru [15]</i>	13
<i>Obr. 8: Gaussův profil rozložení intenzity [19]</i>	14
<i>Obr. 9: Velikost absorpce různých materiálů v závislosti na vlnové délce laseru [15]</i>	15
<i>Obr. 10: Schéma Nd:YAG laseru [21]</i>	17
<i>Obr. 11: Schéma vláknového laseru [24]</i>	18
<i>Obr. 12: Schéma CO2 laseru [26]</i>	18
<i>Obr. 13: Oblasti použití laseru pro jednotlivé aplikace [19]</i>	20
<i>Obr. 14: Ukázka svařování [29]</i>	20
<i>Obr. 15: Ukázka řezání [28]</i>	21
<i>Obr. 16: Ukázka vrtání [28]</i>	21
<i>Obr. 17: Ukázka navařování [29]</i>	22
<i>Obr. 18: Ukázka laserového čištění [29]</i>	22
<i>Obr. 19: Ukázka technologie laser peening shock [31]</i>	23
<i>Obr. 20: Základní diagramy kalení [3]</i>	24
<i>Obr. 21: Závislost dosažitelné tvrdosti nelegovaných ocelí na obsahu uhlíku [4]</i>	24
<i>Obr. 22: Princip Jominiho zkoušky prokalitelnosti [6]</i>	25
<i>Obr. 23: Dělení kalení [4]</i>	25
<i>Obr. 24: Schéma metod martenzitického kalení [4]</i>	27
<i>Obr. 25: Způsoby kladení stop [35]</i>	28
<i>Obr. 26: Transmisivní integrátor paprsku [30]</i>	28
<i>Obr. 27: Schéma režimů kalení pomocí dynamického rozkmitu svazku</i>	29
<i>Obr. 28: ARA diagram oceli 12 050 [36]</i>	30
<i>Obr. 29: Rovnovážný diagram soustavy Fe-C s vyznačeným složením oceli 12050 [38]</i>	31
<i>Obr. 30: Základní metody měření tvrdosti (zleva dle Brinella, dle Rockwella, dle Vickerse) [38]</i>	33
<i>Obr. 31: Pracovní stanoviště pro zvolený experiment</i>	34
<i>Obr. 32: Vláknový laser Yb: YAG</i>	34
<i>Obr. 35: Ukázka náhledu průběhu záznamu termokamery</i>	35
<i>Obr. 33: Skenovací hlava Arges Rhino Fiber [44]</i>	35
<i>Obr. 34: Termokamera FLIR A310 [42]</i>	35
<i>Obr. 36: Robotické rameno ABB[45]</i>	36
<i>Obr. 37: Zobrazení kalené stopy a schéma pohybu laserového svazku</i>	37
<i>Obr. 38: Ukázka vzorků</i>	38
<i>Obr. 39: Vzorek K01 ($\Delta = 0,03 \text{ mm}$; $v = 2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)</i>	39
<i>Obr. 40: Vzorek K03 ($\Delta = 0,03 \text{ mm}$; $v = 4000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)</i>	39
<i>Obr. 41: Vzorek K06 ($\Delta = 0,04 \text{ mm}$; $v = 4000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)</i>	39

<i>Obr. 42: Vzorek K07 ($\Delta = 0,02 \text{ mm}$; $v = 3000 \text{ mm.s}^{-1}$)</i>	39
<i>Obr. 43: Vzorek K09 ($\Delta = 0,02 \text{ mm}$; $v = 5000 \text{ mm.s}^{-1}$)</i>	40
<i>Obr. 44: Vzorek K13 ($\Delta = 0,05 \text{ mm}$; $v = 2000 \text{ mm.s}^{-1}$)</i>	40
<i>Obr. 45: Vzorek K14 ($\Delta = 0,07 \text{ mm}$; $v = 2000 \text{ mm.s}^{-1}$)</i>	40
<i>Obr. 46: Vzorek K15 ($\Delta = 0,1 \text{ mm}$; $v = 2000 \text{ mm.s}^{-1}$)</i>	40
<i>Obr. 47: Vzorek K16 ($\Delta = 0,03 \text{ mm}$; $v = 4500 \text{ mm.s}^{-1}$)</i>	41
<i>Obr. 48: Mikrostruktura přechodu kalené vrstvy do základního materiálu</i>	47
<i>Obr. 49: Mikrostruktura základního materiálu</i>	47
<i>Obr. 50: Přechodová oblast kalené a základní struktury</i>	48
<i>Obr. 51: Jemnozrnná martenzitická struktura</i>	48
<i>Obr. 52: Snímek mikrostruktury přetavené oblasti pod povrchem</i>	49

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 : Vliv stavu povrchu na koeficient absorpce [13]</i>	15
<i>Tab. 2: Porovnání vlastností laserů [28]</i>	19
<i>Tab. 3: Chemické složení v [hm. %] dle ČSN 41 2050 [37]</i>	30
<i>Tab. 4: Mechanické vlastnosti dle ČSN 41 2050 [37]</i>	30
<i>Tab. 5: Oblasti zkušebního zatížení [39]</i>	32
<i>Tab. 6: Optické vlastnosti laseru [43]</i>	34
<i>Tab. 7: Technické parametry [42]</i>	35
<i>Tab. 8: Konkrétní chemické složení oceli 12 050</i>	37
<i>Tab. 9: Konkrétní mechanické vlastnosti oceli 12 050</i>	37
<i>Tab. 10: Vybrané vzorky (zadané parametry, tvrdost dle Rockwella, teplota)</i>	38
<i>Tab. 11: Hloubka prokalení vzorků</i>	38
<i>Tab. 12: Seznam parametrů a hodnot rychlosti kalení a vneseného tepla</i>	42
<i>Tab. 13: Porovnání vzorků K01 a K07</i>	44
<i>Tab. 14: Porovnání vzorků K09 a K13</i>	44
<i>Tab. 15: Porovnání vzorků K14 a K16</i>	44

Seznam grafů

<i>Graf 1: Závislost vneseného tepla na zvolených parametrech</i>	42
<i>Graf 2: Vliv velikosti posunu na mikrotvrdosti</i>	43
<i>Graf 3: Porovnání hodnot vneseného tepla a dosažené hloubky prokalení</i>	43
<i>Graf 4: Porovnání vneseného tepla s maximální dosaženou hodnotou mikrotvrdosti HV 0,1</i> 44	
<i>Graf 5: Průběh mikrotvrdosti vzorku K06</i>	45
<i>Graf 6: Průběh mikrotvrdosti vzorku K15</i>	45
<i>Graf 7: Srovnání makrostruktury a mikrotvrdosti</i>	46

Seznam příloh

- Příloha č. 1: Atest materiálu 1/1

