



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POVRCHOVÉ KALENÍ OCELÍ VÝKONOVÝM POLOVODIČOVÝM LASEREM

SURFACE HARDENING OF STEELS BY HIGH POWER DIODE LASER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Lucie BAZALOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lucie Bazalová

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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:

Povrchové kalení ocelí výkonovým polovodičovým laserem

v anglickém jazyce:

Surface hardening of steels by high power diode laser

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Povrchové kalení laserem je moderní technologie. Za určitých podmínek se dá provádět i pomocí laserové svařovací hlavy při vysokém stupni defokusace. Cílem bude studium těchto podmínek při povrchovém kalení vysoce uhlíkaté oceli s 0,5% obsahu uhlíku. Předpokládá se mechanické a metalografické vyhodnocení zakalené vrstvy.

Cíle diplomové práce:

Seznámení se s možnostmi technologie povrchového kalení laserem. Seznámení se s metodikou návržení svařovacího postupu pro danou technologii a typ materiálu. Seznámit se s metodikou mechanického a metalografického vyhodnocení zakalené vrstvy.

Seznam odborné literatury:

1. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technologie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
3. TURŇA M., Špeciálne metódy zvarovania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9
4. KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
5. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá technologií povrchového kalení pomocí polovodičového laseru. V rámci diplomové práce je provedení experimentu povrchového kalení na oceli 12 050 při různých parametrech rychlosti pohybu laserové hlavy a použitého výkonu. Zpočátku se práce zabývá možnými technologiemi povrchového kalení, průmyslovými lasery a možnými metodami pro měření tvrdosti. Dále je popsán použitý materiál a vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury vzorků a vyhodnocena dosažená tvrdost v závislosti na vzdálenosti od povrchu. Výsledky jsou použity pro posouzení vhodnosti použitých parametrů při kalení.

Klíčová slova

laser, ocel 12 050, makrostruktura, mikrostruktura, tvrdost

ABSTRACT

The master thesis deals with the technology of surface hardening of steels by high power diode laser. The thesis is an experiment of surface hardening of steel 12 050 on various parameters of speed movement of the laser head and used power. At first, the work deals with the possible technology of surface hardening, industrial lasers and possible methods for measuring hardness. It describes the material used and the evaluation of the macrostructure and microstructure of the samples and evaluates the achievement of hardness, depending on the distance from the surface. The results are used to assess the suitability of the parameters during quenching.

Key words

laser, steel 12 050, macrostructure, microstructure, hardness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BAZALOVÁ, Lucie. *Povrchové kalení ocelí výkonovým polovodičovým laserem*. Brno 2014. 58 s., 1 příloha, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Povrchové kalení ocelí výkonovým polovodičovým laserem** vypracovala samostatně pod vedením Doc. RNDr. Libora Mrňi, Ph.D. a s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Lucie Bazalová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji panu Vojtěchovi Říháčkovi za pomoc při měření tvrdosti. Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017) "ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií" a tento je dále podpořen z Národního programu udržitelnosti I.- NPU I (LO1212), jehož cílem je podpora výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků.

OBSAH**Abstrakt****Prohlášení****Poděkování****Obsah**

Úvod	10
1 Zpracování povrchu	11
1.1 Povrchové kalení	11
1.1.1 Kalení plamenem	12
1.1.2 Indukční kalení.....	13
1.1.3 Kalení laserem.....	14
1.1.4 Modifikace laserového paprsku pro laserové kalení.....	16
1.1.5 Absorpce laserového paprsku.....	17
1.2 Průmyslové lasery.....	20
1.2.1 Tyčový laser (Nd-YAG).....	23
1.2.2 Diskový laser	24
1.2.3 Vláknový laser.....	25
1.2.4 Plynový laser (CO ₂)	26
1.2.5 Polovodičový laser	28
1.2.6 Příklady laserových aplikací	29
1.3 Vyhodnocení zakalené vrstvy	33
1.3.1 Metoda měření tvrdosti podle Brinella	33
1.3.2 Metoda měření tvrdosti podle Vickerse.....	34
1.3.3 Metoda měření tvrdosti podle Rockwella.....	35
1.3.4 Metoda měření tvrdosti Knoop	36
2 Zkoušený materiál	37
3 Použité metody při Experimentu	39
3.1 Použité zařízení při experimentu	39
3.1.1 Laserový zdroj.....	39
3.1.2 Průmyslový robot.....	40
3.1.3 Laserová kalící hlava	41
3.1.4 Tvrdoměr Zwick.....	41
3.1.5 Elektrohydraulický lis	42
3.1.6 Metalografická leštička.....	42

4	Experiment.....	43
4.1	Makrostruktura	45
4.2	Mikrostruktura	49
4.3	Vyhodnocení tvrdosti	53
4.4	Energetické zhodnocení	55
5	Technicko – ekonomické zhodnocení	57
6	Závěr.....	58

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam Obrázků

Seznam tabulek

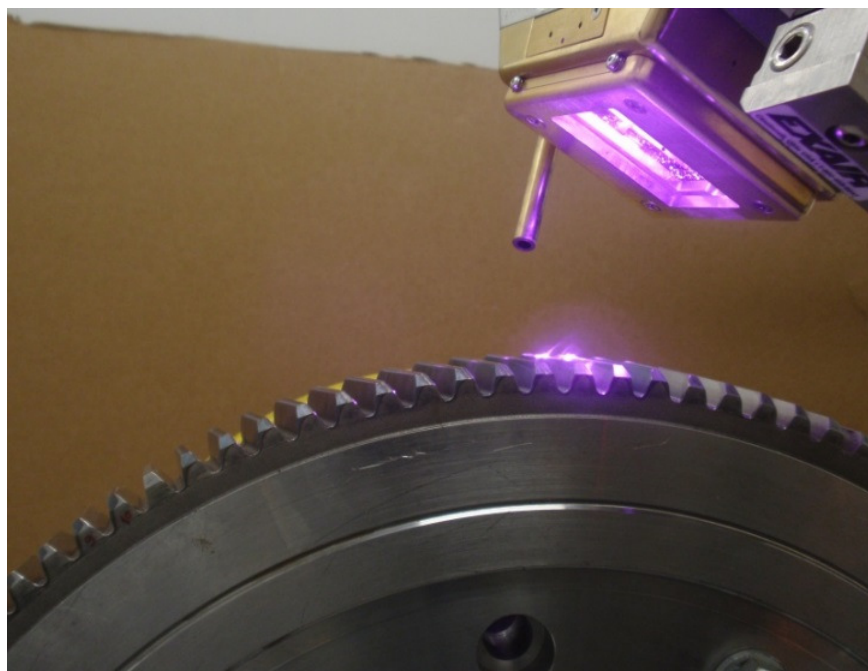
Seznam příloh

ÚVOD [4], [18], [19]

Laser ušel od svého vzniku v roce 1960 obrovský kus cesty, odkdy pronikl do všech možných odvětví lidské činnosti. Dnes je běžnou součástí lidského života a to není řeč jen o zábavní technice, počítačové CD-ROM a laserových ukazovátkách. V medicíně, ve vědě a výzkumu, elektronice a mnoha jiných oborech se staly lasery nenahraditelné a stejně tomu je i ve strojírenském průmyslu, ve kterém se uplatnily při značení dílů, řezání, svařování, povlakování, pájení, kalení a mnoha dalších aplikacích.

Průmysl vyžaduje použití součástí s vysokou odolností proti opotřebením z důvodů stále se zvyšujícího zatížení. Důležitý je také požadavek na zvýšení odolnosti pouze v určitém místě namáhání a zachování základních vlastností ve zbylé části materiálu. Z možných metod zlepšení odolnosti povrchových vrstev, jako jsou chemicko-tepelné způsoby zpracování cementace a nitridace, nebo další způsoby jako jsou navařování, povlakování, se jako nejjednodušší způsob jeví povrchové kalení.

Se zvyšujícími se nároky na rychlost a kvalitu zakalení daného povrchu má laserové kalení co nabídnout. Pomocí laserového kalení jsme schopni zakalit součásti ale i místa, která by jinou metodou, např.: indukčně, zakalit nešla, ať už z důvodu nemožnosti se do daného místa dostat nebo z důvodu následných deformací.



Obr. 1 Kalení ozubení laserovým paprskem [19]

1 ZPRACOVÁNÍ POVRCHU [4], [36], [42]

Existuje celá řada způsobů, kterými lze zvýšit životnost zatěžovaných povrchů. Jedním z nich je použití povrchového kalení, jehož pomocí docílíme získání vysoké tvrdosti povrchu a dostatečné houževnatosti jádra. Každý způsob zpevňování povrchu obnáší určitá omezení a specifické vlastnosti. Mimo chemicko-tepelných způsobů zpracování oceli, jako jsou nitridace a cementace, se uplatňuje povrchové kalení neboli zpevnění povrchu fázovou transformací.

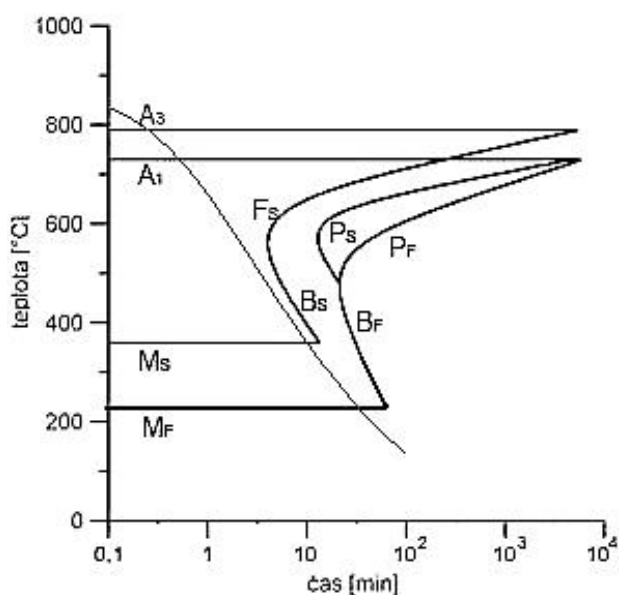
1.1 Povrchové kalení [4], [7], [36], [42], [53]

Nejdříve byl k ohřevu používán plamen, následně indukce. V současné době je moderní způsob kalení pomocí laserového paprsku a elektronového svazku. Ačkoli je průběh transformace struktury na martenzit ve všech metodách shodný, pomocí kalení s použitím laseru se dosahuje značně rozdílných vlastností oproti konvenčním metodám. Vysoká tvrdost povrchu je dosažena rychlým ohřevem resp. austenitizací povrchové vrstvy a jejím zakalením.

Kalení obecně je způsob tepelného zpracování, jehož cílem je dosažení nerovnovážných stavů ocelí, lze je rozdělit podle převažující strukturní složky na kalení martenzitické a bainitické. Schopnost oceli získat martenzitickou strukturu se nazývá *kalitelnost*, oceli pak označujeme jako kalitelné. Další důležitou materiálovou charakteristikou je *zakalitelnost*, ta je zpravidla hodnocena podle tvrdosti oceli získané po zakalení. Maximální dosažitelná hodnota zakalitelnosti je dána tvrdostí martenzitu, ta závisí na obsahu uhlíku v austenitu. Jako schopnost oceli získat po zakalení tvrdost odpovídající její zakalitelnosti v určité hloubce pod povrchem je označována *prokalitelnost*. Cílem kalení je dosažení martenzitické struktury, při tom platí, že rychlost ochlazování musí být větší než rychlost kritická v ARA diagramu (Obr. 2).

Zakalená povrchová vrstva má martenzitickou strukturu, zatímco v jádru součásti zůstává houževnatější, měkčí výchozí struktura, protože zde nedošlo k překrytí. Aby došlo k ohřátí na kalicí teplotu jen povrchové vrstvy, musí být ohřev dostatečně intenzivní, což znamená velkou rychlost ohřevu v krátkém čase. Rychlost ohřevu se pohybuje u obvyklého povrchového kalení několik set °C za vteřinu, přičemž tloušťka zakalené vrstvy a rychlost ohřevu jsou nepřímo úměrné.

V porovnání s objemovým kalením, povrchové kalení vyžaduje až o 200 °C vyšší teploty pro vytvoření austenitu s vyhovující chemickou homogenitou v podmínkách rychlého plynulého ohřevu. Se zvyšující se rychlostí ohřevu narůstá i rychlost nukleace zárodků austenitu, toto způsobuje, že povrchové kalení vede ke zjemnění



Obr. 2 ARA diagram pro podeutektoidní oceli s vyznačením kritické rychlosti [53]

velikosti austenitického zrna a tím i výsledné martenzitické struktury. Zjemnění vede ke zvýšení tvrdosti i houževnatosti martenzitu v povrchové vrstvě a ten je poté méně náchylný ke vzniku a následnému šíření trhlin. Martenzit má větší objem než ferit, proto je v povrchové vrstvě vždy tlakové vnitřní napětí, toto napětí může dosahovat až 60 MPa a způsobuje značný vzrůst únavové pevnosti, neboť brání vzniku trhlin při tahovém namáhání povrchu. U litiny, která je křehká, by mohlo toto napětí vyvolat vznik povrchových trhlin.

Zpravidla se pro povrchové kalení používají podeutektoidní uhlíkové nebo nízkolegované oceli s obsahem uhlíku větším než 0,35 hm. %. Nejčastěji se povrchově kalí součásti normalizované, při větších požadavcích na pevnost a zejména houževnatost jádra se součásti zušlechťují před povrchovým kalením.

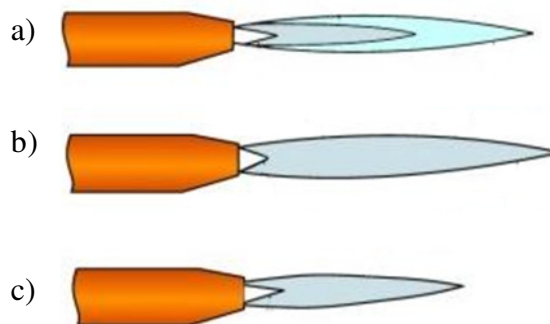
K zakalení povrchu součásti se jako chladicí médium používá voda, olej nebo se kalí na vzduchu. Voda je vhodná pro uhlíkové a olej pro nízkolegované oceli. Kalení s ochlazením na vzduchu, resp. odvodem tepla do jádra materiálu vedením, se používá při ohřevu laserem a elektronovým svazkem. V povrchové vrstvě jsou vlivem velkého teplotního gradientu a strukturní nehomogenity při kalení předmětu s pomocí vody nebo oleje vyvolány značná vnitřní pnutí, proto obvykle následuje popouštění na teplotu ~ 200°C.

1.1.1 Kalení plamenem [7], [36], [42], [47]

Kalení plamenem je nejstarší metoda povrchového kalení. Povrchová vrstva předmětu je ohřívána obvykle kyslíko-acetylenovým plamenem. Nejmenší dosažená zakalená vrstva při jednorázovém kalení je 3 mm, při postupném kalení pak zhruba 1,5 mm. V porovnání s indukčním ohřevem jsou dosahované rychlosti při ohřevu plamenem menší, rovnoměrnost struktury zakalené vrstvy horší a celková tloušťka zakalené vrstvy větší.

Nevýhodou při kalení plamenem je špatné řízení procesu, kdy je určení teploty zcela závislé na zkušenostech obsluhy, teplota je odhadována pouze podle barvy povrchu. Výsledná struktura nedosahuje rovnoměrné tvrdosti a dochází ke ztrátě vlastností, neboť byl ovlivněn celý kus. Výhodou jsou nižší pořizovací náklady na zařízení, ze kterých plyne i oblast využití. Chlazení probíhá za pomoci vodní sprchy.

Druhy kyslíko – acetylenového plamene využívaného při kalení se podle poměru míšení plynů dělí na neutrální, redukční a oxidační viz Obr. 3. Neutrální plamen (poměr 1:1, $O_2 : C_2H_2$) se používá pro běžné svařování. Redukční plamen nauhličuje svarový kov, má přebytek acetylenu. Oxidační plamen s přebytkem kyslíku. Podle výstupní rychlosti může být plamen měkký (výstupní rychlost 70-100 m·s), střední (výstupní rychlost 100-120 m·s), ostrý (výstupní rychlost více než 120 m·s).



Obr. 3 Schéma vzhledu a) redukčního, b) neutrálního, c) oxidačního plamene [47]

1.1.2 Indukční kalení [4], [7], [36], [42]

Princip indukčního kalení spočívá v ohřívání povrchové vrstvy předmětu indukovanými proudy o střední nebo vysoké frekvenci pomocí induktoru (Obr. 4). Použitá frekvence se pohybuje při střední frekvenci 1 až 15 kHz nebo při vysoké frekvenci 150 kHz až 2 MHz. Induktor je tvořen cívkou nebo smyčkou, do které se daný předmět vkládá. Pomocí střídavého proudu procházejícího induktorem se indukuje v daném předmětu, který musí být elektricky vodivý, magnetické pole a vznikají Foucaultovy vířivé proudy. Výsledné magnetické pole a vířivé proudy mají největší intenzitu na povrchu předmětu, povrchová vrstva je tedy nejvíce ohřívána Joulovým teplem. Tloušťka ohřáté vrstvy se pohybuje obvykle v rozmezí 1 až 6 mm, je závislá na rychlosti a době ohřevu a nepřímo úměrná frekvenci proudu (Tab. 1). Indukční kalení je velice dobře regulovatelné.

Tab. 1 Doporučené frekvence pro indukční povrchové kalení ocelí [7]

Hloubka ohřáté vrstvy [mm]	Optimální frekvence [kHz]
1	60
1,5	25
2	15
3	7
4	4
6	1,5
10	0,5

Hloubka h průniku střídavého magnetického pole a vzniku vířivých proudů vlivem elektromagnetické indukce pro magnetické pole o frekvenci f je rovna:

$$h = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}} \quad (1.1)$$

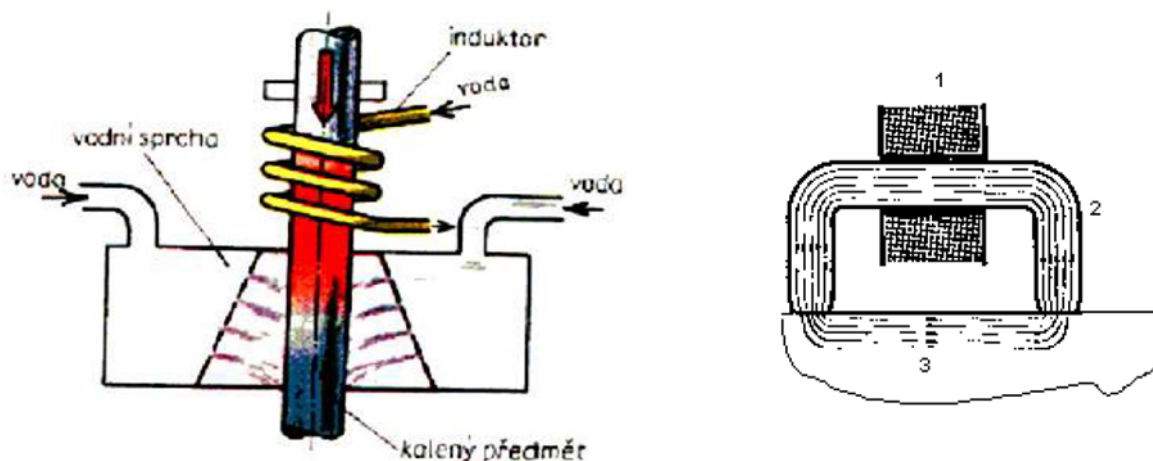
kde ρ - specifický elektrický odpor [$\Omega \cdot m$]

μ - relativní magnetická permeabilita kovu [-], pro většinu kovů $\mu=1$

f - frekvence [Hz]

Zakalení povrchové vrstvy u indukčního kalení se může uskutečňovat buď přetržitým (jednorázovým) nebo nepřetržitým (postupným) způsobem. Při přetržitém, jednorázovém, způsobu se ohřeje na kalící teplotu celý kalený povrch a následně se ochladí vodní sprchou nebo ponorem do lázně. Při nepřetržitém způsobu kalení je těsně za induktor začleněna vodní sprcha, která ihned po ohřevu části povrchu daný povrch ochladí. Nevýhodou tohoto způsobu kalení je tzv. šev neboli měkké místo. K němu dochází na začátku a na konci kalené vrstvy nebo při překryvu postupně kalených částí povrchu, kdy dojde k popuštění zakalené vrstvy.

Nevýhodou indukčního kalení je závislost na zkušenostech obsluhy. Navíc je nutný induktor příslušného tvaru a velikosti v závislosti na kaleném výrobku, proto je vhodné použití této metody pro menší plochy a velké série výrobků, neboť pořizovací náklady jsou relativně vysoké. Výhodná je možnost automatizace při hromadné výrobě, kdy lze celý proces povrchového kalení zařadit do výrobní linky.



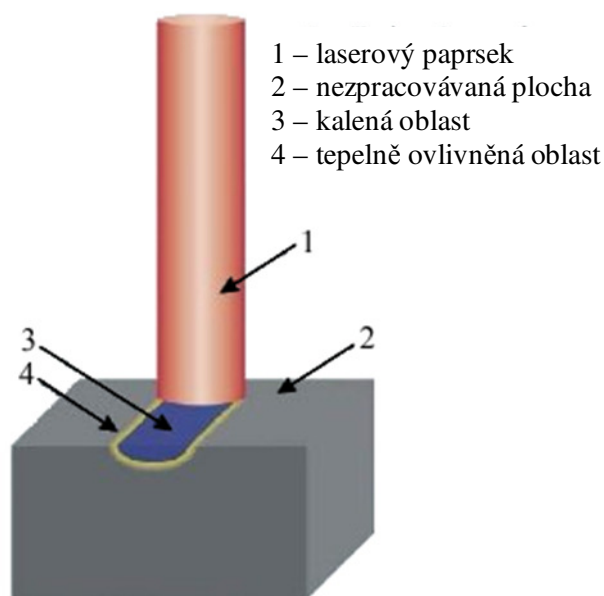
Obr. 4 Schéma indukčního kalení [7]

Cívkou (1) protéká proud, v jádře (2) je soustředováno magnetické pole a v povrchové části součásti vznikají vířivé proudy (3), viz Obr. 4 vpravo. Jádru musí být co nejbližší ke kalené součásti.

1.1.3 Kalení laserem [2], [3], [4], [8], [20], [21], [22], [35], [36], [42], [45]

Pomocí rozostřeného laserového paprsku nebo modifikovaného paprsku pomocí beam integrátoru, případně rozmítaného svazku, se dodá materiálu vysoce koncentrovaná energie, následným ochlazením dochází k vytvoření tenké vrstvy s lepšími mechanickými vlastnostmi, než nabízí základní materiál. V podstatě se jedná o martenzitické kalení, s výslednou jemnozrnnou a relativně houževnatou martenzitickou strukturou, při kterém dochází k uvolnění uhlíku vlivem krátkého a lokalizovaného zahřátí daného materiálu nad austenitizační teplotu. Vhodné materiály k laserovému kalení jsou běžně kalitelné oceli, dále pak oceli s obsahem uhlíku od 0,3 % a všechny druhy litin.

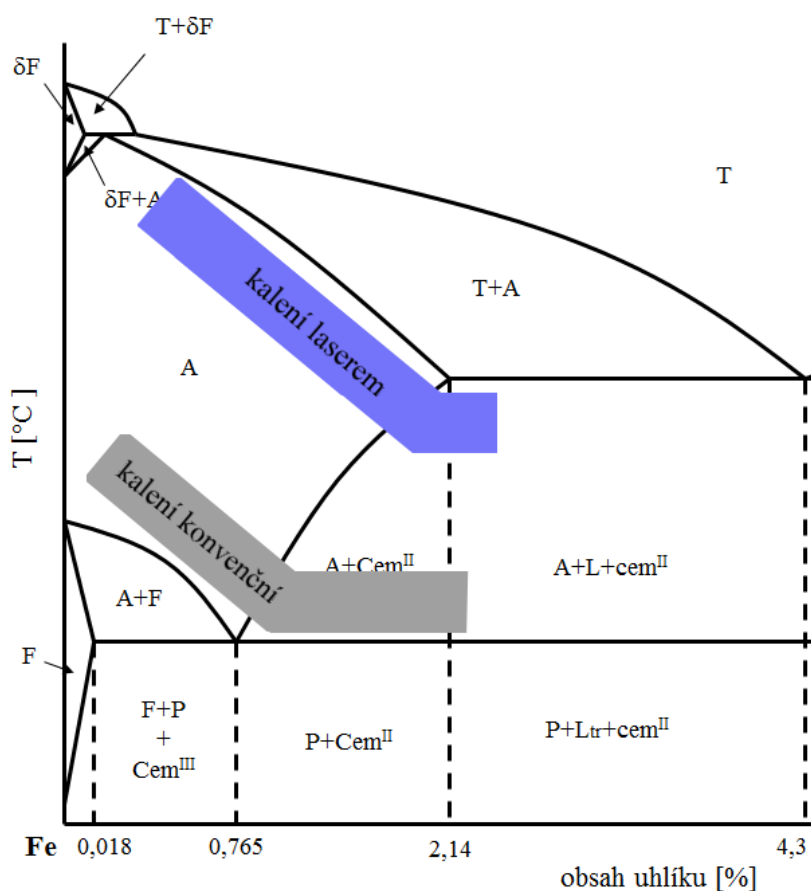
Bezkonkurenční výhoda kalení za pomoci laseru spočívá v rychlosti předání tepla a rychlosti zakalení. Ovlivnění základního materiálu v okolí zakalené vrstvy je minimální (Obr. 5), takže i deformace součásti jsou minimální. Na rozdíl od konvenčních metod, kde se ochlazování provádí za pomoci vodní sprchy, laser zpravidla nevyžaduje dodatečné ochlazování zakalené vrstvy. Teplo je odváděno směrem do materiálu (vedením), dá se také označit jako samozakalení, tím se dosahuje vyšší tvrdosti a menší oxidace kaleného



Obr. 5: Schéma povrchového kalení [4]

povrchu. Výsledkem je příznivější gradient teploty (má vliv na vzniklé napětí a vznik trhlin), zbytková pnutí a vznik velice jemné struktury s drobnými karbidy, malou velikostí zrn a krátkými martenzitickými jehlicemi. Proto se dají bezproblémově kalit i náročné součásti, kde indukční kalení opakovaně selhává, resp. vznikají kalící trhliny.

Při kalení laserem se dosahuje zejména výhodnější lomové chování kalených vrstev před cementovanými a také lepší odolnost laserem kalených vrstev před kalením objemovým nebo povrchy kalenými indukčně. U kalení laserem odpadá řada problémů, neboť velikost kalící stopy lze modifikovat jednoduchou výměnou optické čočky. Pro větší šířky kalení se používají liniové rozdělovače intenzity.



Obr. 6: Vyznačené kalící oblasti v Fe-Fe₃C diagramu [35],[45]

Řízení a monitorování procesu provádí řídicí jednotka pomocí pyrometru nebo termokamery, která zvyšuje a snižuje výkon laseru tak, aby byla zachována konstantní teplota kaleného povrchu. Konstantní teplotou kalení se docílí i konstantní tvrdosti u kaleného povrchu. Některé součásti jsou kalitelné jen díky tomuto řízení výkonu, neboť by se při jiné metodě povrchového kalení mohly součásti při samotném procesu upálit. Navíc odpadá lidský faktor, pohyb kalící hlavy ve 3D zvolené trajektorii zajišťuje robot.

Pyrometr je bezdotykový teploměr, který určuje teplotu měřeného tělesa z teplotního záření, je vhodný pro měření teplot nad 600°C. Při laserovém kalení se dosahuje právě těchto vyšších hodnot (Obr. 6). Termočlánek, tvoří dva vodiče z různých kovů nebo slitin, které jsou vzájemně izolovány a na jednom konci spojeny. Pokud ve spoji termočlánek je jiná teplota než na jeho volných koncích, vzniká na volných koncích napětí. Napětí je měřeno pomocí počítače a hodnota teploty je použita pro regulaci kalícího procesu.

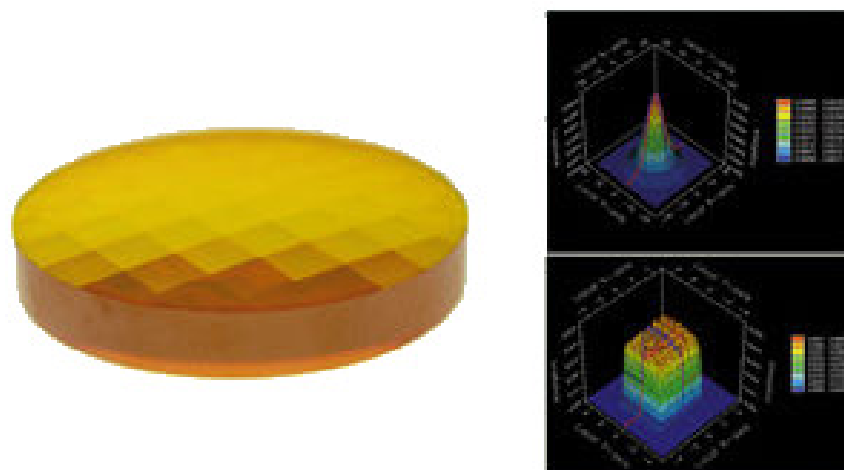
Laserové kalení se používá na ložiskové, pružinové, zušlechťovací, korozivzdorné a nástrojové oceli, dále pak na povrchové úpravy částí motorů, převodovek, povrchy nástrojů a vodících lišt.

Laserový paprsek ve srovnání s ostatními konvenčními metodami kalení intenzivně zahřívá pouze povrchovou vrstvu materiálu pod teplotu tavení a okolní materiál zůstává na teplotě prostředí. Přehled kalících teplot pro kalení laserem a konvenční kalení je vyznačen na Obr. 6.

Používaná výkonová hustota pro laserové kalení je 10^3 - 10^4 W·cm⁻² při působení po dobu 0,8 až 8 sekund. Dosahovaná hloubka prokalení průměrně dosahuje 0,8 až 1,5 mm, lze však dosáhnout i větších hloubek prokalení, neboť hloubka je závislá na výkonové hustotě a době interakce s materiálem.

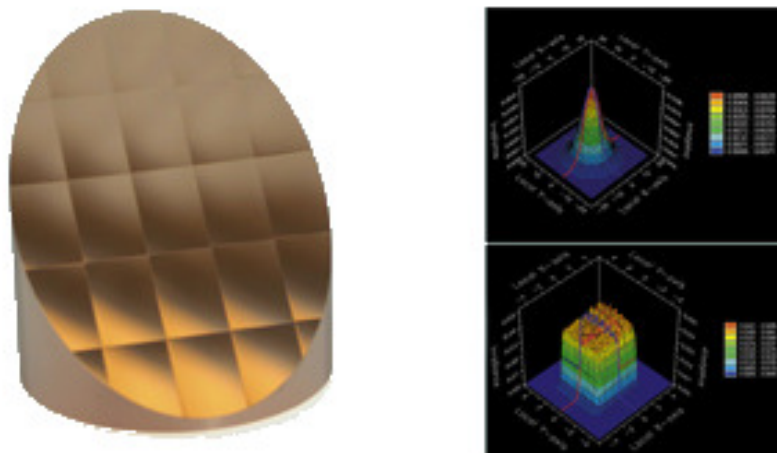
1.1.4 Modifikace laserového paprsku pro laserové kalení [8],[23]

Výstupní laserový svazek je primárně kruhového průřezu, který je vhodné dále modifikovat na čtvercový nebo obdélníkový průřez. U CO₂ laseru je k této přeměně potřeba sada tzv. prizmatických zrcadel. Na rozdíl od CO₂ laserů využívají pevnolátkové lasery tzv. beam integrátor, který na rozdíl od prizmatických zrcadel umožňuje snadnější integraci do zařízení.



Obr. 7 Transmisivní beam integrátor [8]

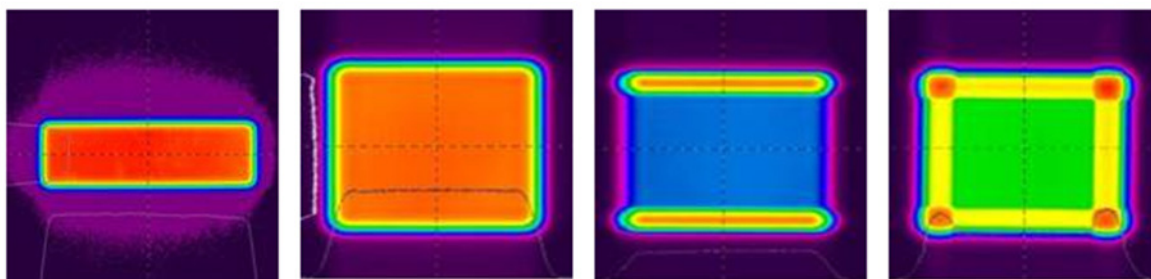
Beam integrátor je tvořen broušeným zrcadlem (Obr. 7) respektive průchozím optickým elementem (Obr. 8) o maximálním průměru 75 mm, respektive 100 mm s jednotlivě broušenými fazetami (2 až 8 mm) ideálními pro vysoce výkonové lasery. Tyto nejlépe pracují s laserovými paprsky o nižší koherenci záření, přičemž produkují relativně ploché profily intenzity. Výsledná velikost paprsku je minimálně 2 mm, což je vhodné pro svařování, navařování a tepelné zpracování materiálů. Beam integrátory jsou vyráběny z ZnSe, ZnS a Ge. Jsou vhodné pro vlnovou délku laserového paprsku 0,8 až 1,0 μ m.



Obr. 8 Reflexní beam integrátor [8]

Další možností je použít rozostřený laserový paprsek, ale tento způsob není zcela efektivní. Velice zajímavý moderní způsob u laserového kalení je použití rozmítaného svazku (Obr. 32), který se používá běžně v laserovém značení, jeho nezanedbatelnou výhodou je možnost průběžně a plynule měnit šířku zakalené oblasti.

Vhodné profily výstupního laserového svazku, jak liniové, tak obdélníkové, vhodné pro povrchové kalení jsou znázorněny na Obr. 9.



Obr. 9 Možné tvary profilu laserového paprsku pro povrchové kalení [23]

1.1.5 Absorpce laserového paprsku [2],[10]

Předpokladem pro efektivní využití laserového paprsku pro zpracování materiálů je absorpce záření daného materiálu a následná přeměna na teplo. Důležitým ukazatelem při laserovém zpracování kovů je přeměna světelné energie v tepelnou a účinnost pohlcení daným materiálem. Materiálová charakteristika udává optické vlastnosti těchto látek, ty jsou výrazně závislé na parametrech laserového paprsku.

Koeficient odrazu R nebo také reflexe je pro oblasti nízkých intenzit, definovaných do $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, nejvíce závislý na elektrických vlastnostech kovu:

$$R = \frac{1 - \epsilon}{1 + \epsilon} \quad (1.2)$$

kde ϵ - dielektrická permeabilita

Nebo také lze reflexi udávat ve tvaru:

$$R = 1 - \sqrt{\frac{2\nu}{\pi\sigma}} \quad (1.3)$$

kde ν – frekvence dopadajícího záření
 π – Ludolfovo číslo
 σ – elektrická vodivost materiálu

Určení koeficientu absorpce podle Bramsona zohledňuje změnu elektrického odporu materiálu v závislosti na teplotě zpracovávaného povrchu:

$$A(T) = 0,365 \sqrt{\frac{R(T)}{\lambda_1}} - 0,0667 \frac{R(T)}{\lambda_1} + 0,006 \left(\frac{R(T)}{\lambda_1}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.4)$$

kde $A(T)$ – koeficient absorpce
 $R(T)$ – elektrický odpor materiálu při teplotě T
 λ_1 – vlnová délka laserového paprsku [m]

Vznik tepla na povrchu materiálu se dá popsat tak, že reakce elektromagnetického vlnění s atomy na povrchu daného tělesa způsobuje vznik elektrického proudu. Elektrická vodivost tělesa je však omezená a Joulovo teplo způsobí vzrůstání teploty na povrchu. Energie dopadajícího paprsku se dělí na absorbovanou, odraženou a procházející. Procházející energie je pro neprůhledné materiály nulová.

Zákon Wiedemann - Franzovhův udává, že poměr vodivosti elektrické a tepelné je konstantní. Z toho vyplývá, že kovy s dobrou vodivostí mají koeficient absorpce nízký. Při zvýšení teploty se zvýší i absorpce u daného materiálu, neboť u kovů klesá elektrická vodivost. Elektrická vodivost ve střídavém elektromagnetickém poli je závislá na frekvenci a tudíž laserový paprsek s rozdílnou pracovní vlnovou délkou bude vykazovat rozdílnou absorpci ve stejném materiálu. Ve skutečnosti má vliv na hodnotu absorpce mimo vlnové délky laserového paprsku a materiálových charakteristik hlavně stav zpracovávaného povrchu, viz Tab. 2.

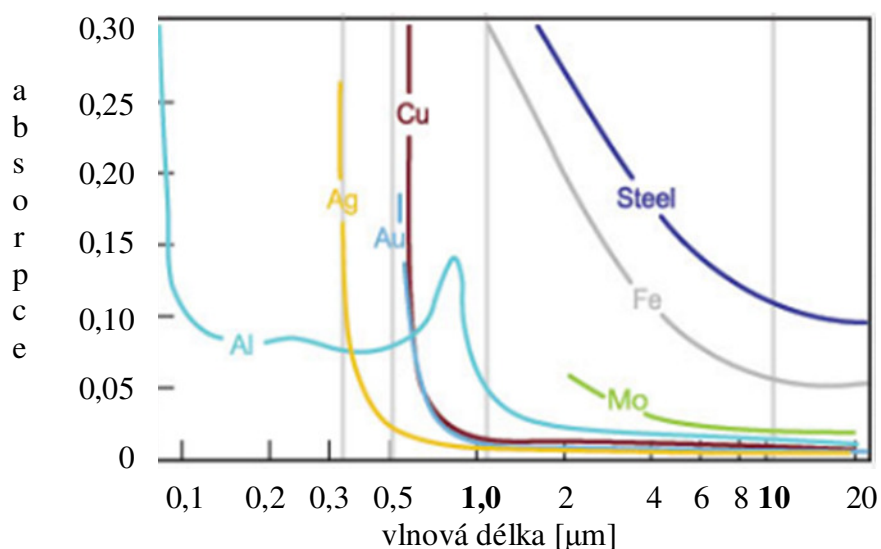
Tab. 2 Vliv zpracování povrchu na koeficient absorpce pro ocel [2], [10]

Zpracování povrchu	Průměrná drsnost povrchu Ra [μm]	Absorpce [%] CO ₂ laseru λ = 10,6 μm	Absorpce [%] pevnolátkového laseru λ = 1,06 μm
Vyleštěný	0,02	~ 5,20	~ 30
Broušený	0,21	~ 7,5	~ 40
Válcovaný	0,87	~ 6,0	~ 34
Válcovaný	3,35	~ 12,6	~ 51,5
Pískovaný	1,65	~ 34,0	~ 68,3

Zvýšení účinku procesu laserového kalení lze dosáhnout:

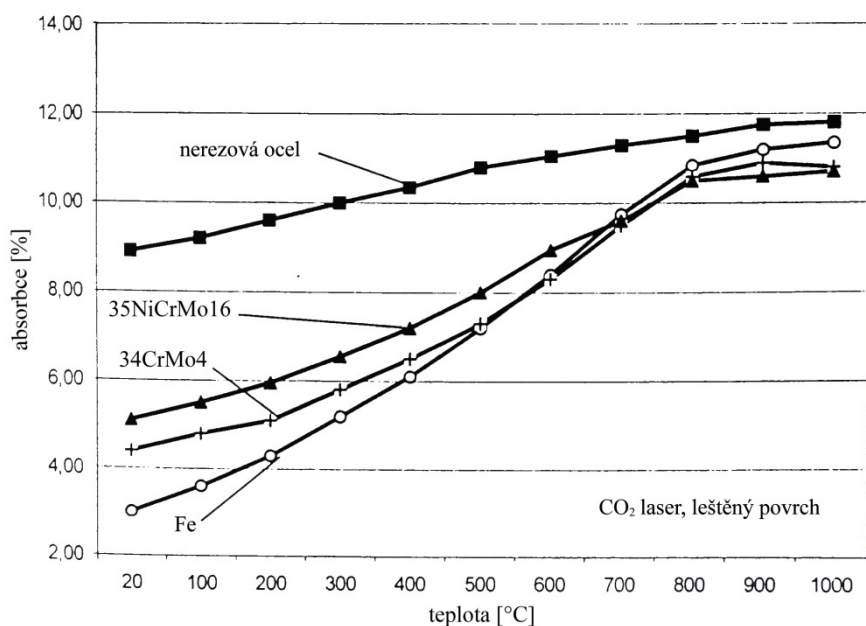
- zvýšení drsnosti povrchu např. pískováním
- použití tzv. absorbéru, nanesení materiálu s vyšším koeficientem absorpce
- povrchová úprava povrchu - černění
- dodržení kolmého dopadu paprsku na kalený povrch

Graf závislosti absorpce na vlnové délce (Obr. 10) znázorňuje hodnoty absorpce pro jednotlivé prvky a ocel (steel). Běžně v průmyslu používané CO₂ plynové lasery pracují na vlnové délce 10 μm. Oproti tomu pevnolátkové lasery, tedy i polovodičové lasery, mají vlnovou délku kolem 1 μm. Graf ukazuje vyšší dosahovanou absorpci u hliníku na vlnové délce 1 μm než na vlnové délce 10 μm. Dále poukazuje na stále se rozvíjející trend použití pevnolátkových laserů v průmyslu, neboť při pracovní vlnové délce 1 μm se u oceli dosahuje výrazně vyšší absorpce než na vlnové délce 10 μm.



Obr. 10 Závislost absorpce na vlnových délkách [10]

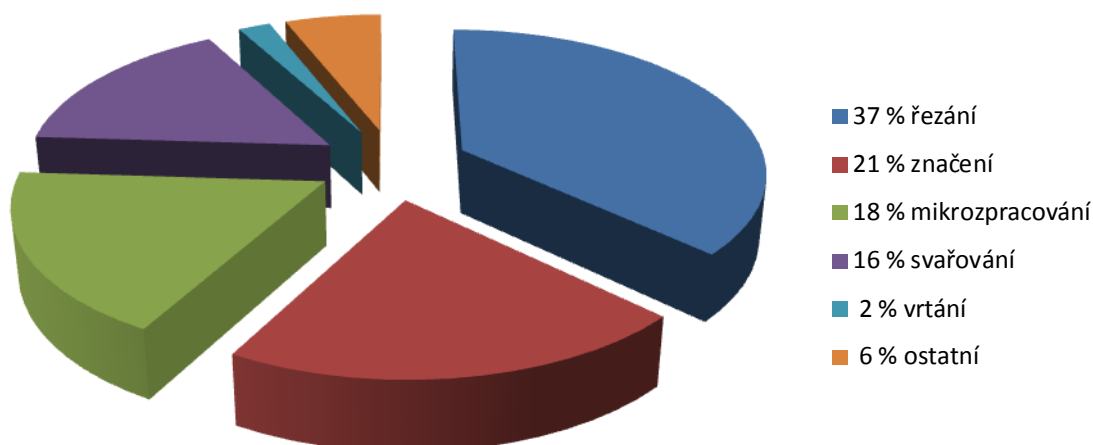
Závislost absorpce leštěného povrchu různých ocelí při zpracování na CO₂ laseru je zobrazeno na Obr. 11. Při zvýšení teploty kovu (kaleného materiálu) vzrůstá i absorpce laserového paprsku materiálem, neboť elektrická vodivost kovů se vzrůstající teplotou klesá. Hodnota absorpce je závislá na vlastnostech materiálu, vlnové délce použitého laseru (Obr. 10) a stavu povrchu.



Obr. 11 Závislost absorpce na teplotě materiálu [2]

1.2 Průmyslové lasery [1], [2], [9], [16], [18], [50]

Slovo „Laser“ je složené z prvních písmen anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ což v překladu znamená „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Laser je přístroj generující záření zcela unikátních vlastností, které našlo využití v nesčetném množství aplikací, jako jsou řezání, značení, svařování nebo vrtání, jejich podíl využití je zobrazen v grafu, viz Obr. 12.



Obr. 12: Procentuální podíl základních laserových aplikací v průmyslu [2]

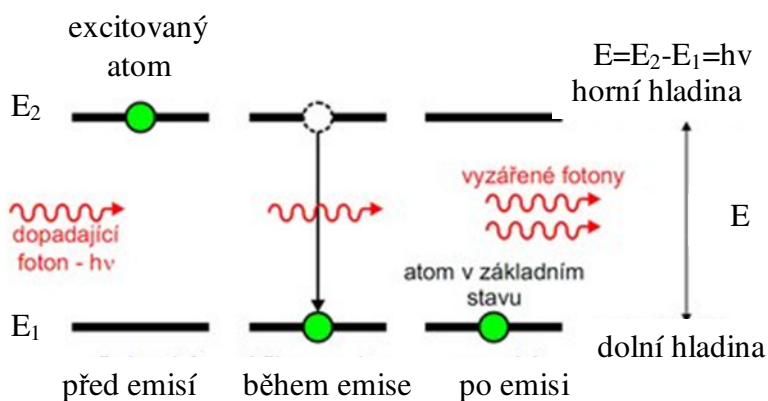
Základní pojmy v oblasti laserové techniky:

- **Aktivní prostředí** – obsahuje element, který se nachází v základním nebo vybuzeném (excitovaném) stavu s vyšší energií, při přechodu z vyšší do nižší energetické hladiny tento element vyzáří foton
- **Buzení** – dodává do laseru energii, převádí aktivní prostředí do excitovaného stavu, kde většina elementů se nachází ve stavu s vyšší energií (tento stav se označuje jako inverze populace)
- **Rezonátor** – nejčastěji je tvořen odraznými zrcadly, vyzářené fotony v něm putují od jednoho zrcadla k druhému, jejich počet výrazně narůstá, dochází k lavinovitému efektu a průchodu energie v podobě proudu fotonů (laserový svazek) přes polopropustné zrcadlo
- **Laserový zdroj** – základní funkční část laseru, kde dochází k přeměně energie buzení na laserové záření
- **Spontánní emise** – zářivý kvantový přechod z vyšší energetické hladiny na nižší, není závislý na vnějším elektromagnetickém záření
- **Relaxační přechody** – přechody vyvolané různými mechanismy např. srážkami částic
- **Stimulovaná emise** – zářivý kvantový přechod z vyšší energetické hladiny na nižší, je podmíněn budícím elektromagnetickým zářením
- **Optický systém** – soustava optických prvků vedoucí laserový paprsek do laserové hlavy (optické vlákno, soustava zrcadel)

Základní rozdělení laserů:

- Podle druhu aktivního prostředí
 - o Pevnolátkové
 - Tyčové
 - Diskové
 - Vlákňové
 - Polovodičové
 - o Kapalínové
 - o Plynové
- Podle způsobu čerpání
 - o Optické čerpání
 - o Elektrický výboj
 - o Chemická reakce
- Podle režimu provozu
 - o Kontinuální
 - o Pulzní
- Podle vyzařované vlnové délky
 - o Infračervené
 - o V oblasti viditelného světla
 - o Ultrafialové
 - o Rentgenové

Laserový paprsek je vlnění optického charakteru, které spadá do skupiny elektromagnetického záření. Běžné světelné záření obsahuje vlny různých vlnových délek (barevné záření), spontánně vyzařující rovnoměrně do všech směrů. U laseru se podařilo ve vhodném aktivním prostředí vlivem určitého budícího zařízení potlačit spontánní emisi a podpořit stimulovanou emisi. U spontánní emise dojde k přechodu bez vnějšího působení elektromagnetického záření, zatímco u stimulované emise (Obr. 13) je k přechodu z vyšší energetické hladiny na nižší nutno budícího zdroje. Při přechodu z vyšší energetické hladiny na nižší se vyzáří nabuzený foton, který má stejné vlastnosti jako foton, který emisi stimuloval.



Obr. 13 Stimulovaná emise [18]

Tímto způsobem získané laserové záření je koherentní (vnitřně uspořádané), monochromatické (jednobarevné), může interferovat a divergence (rozbíhavost svazku) záření je velice malá za vysoké spektrální hustoty záření. Ve výsledku to znamená, že dostáváme záření ve formě úzkého paprsku o malém průměru, jedné barvě, kde největší výhodou je, že lze zaostřit do bodu oproti klasickým zdrojům, kde šel zaostřit do plošky.

Laser je zařízení, které snižuje entropii soustavy, přičemž spotřebovává určité množství energie. Elektromagnetické vlnění určité frekvence přinutí k přechodu elektrony z vyšší

hladinu na nižší hladinu, čímž se zesílí vstupní vlna. Bohrov vztah vyjadřuje energetický rozdíl mezi hladinami:

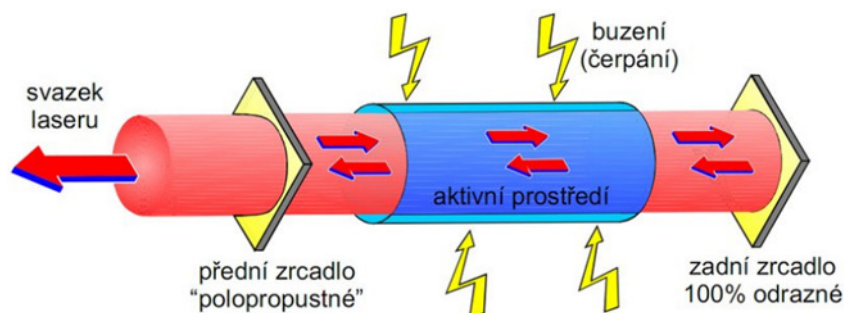
$$(1.5)$$

kde E – energetický rozdíl mezi hladinami
 h – Planckova konstanta
 ν – frekvence vyzářeného fotonu (elektromagnetické vlny)

K přechodu atomů do nižších energetických hladin je nutné vnější působení, to se nazývá čerpání. Pro čerpání můžeme použít optického buzení, chemickou nebo tepelnou reakci, elektrický výboj atd.

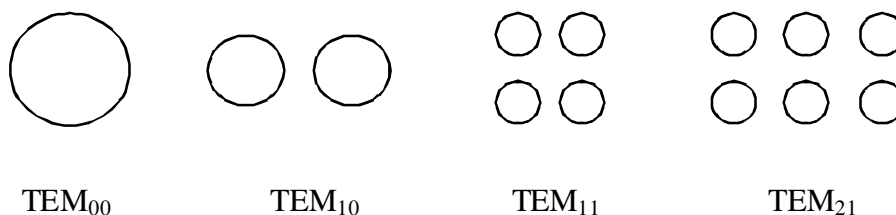
Každý laserový generátor obsahuje tři základní části:

- aktivní prostředí (slouží pro zesilování záření)
- zdroj čerpání (excitace aktivního prostředí)
- rezonátor (vytváří zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím, jeho délka je určena vzdáleností zrcadel), viz Obr. 14.



Obr. 14: Základní schéma laseru – rezonátor [18]

V rezonátoru existuje i elektromagnetické pole, které rozdělujeme podle amplitudy a fáze vzniklého vlnění, toto rozdělení ovlivňuje transverzální elektromagnetický mód (TEM) rezonátoru. Příčný mód může být definovaný v kartézských souřadnicích (TEM_{mn}), nebo v cylindrických souřadnicích (TEM_{pl}). Indexy m , n jsou označovány počty minim na průřezu paprsku ve vertikálním a horizontálním (resp. radiálním a úhlovém) směru. Mód reprezentuje možné struktury záření v rezonátoru a má velký vliv na velikost stopy fokusovaného paprsku, čím je index vyšší, tím je vyšší řád módu. TEM_{00} (Obr. 15) je mód nejnižšího řádu, má Gaussovské rozložení intenzity s maximem v ose, tento mód není vhodný pro kalení, proto se používají optické integrátory pro upravení intenzity na plochý mód, který je vhodný pro kalení

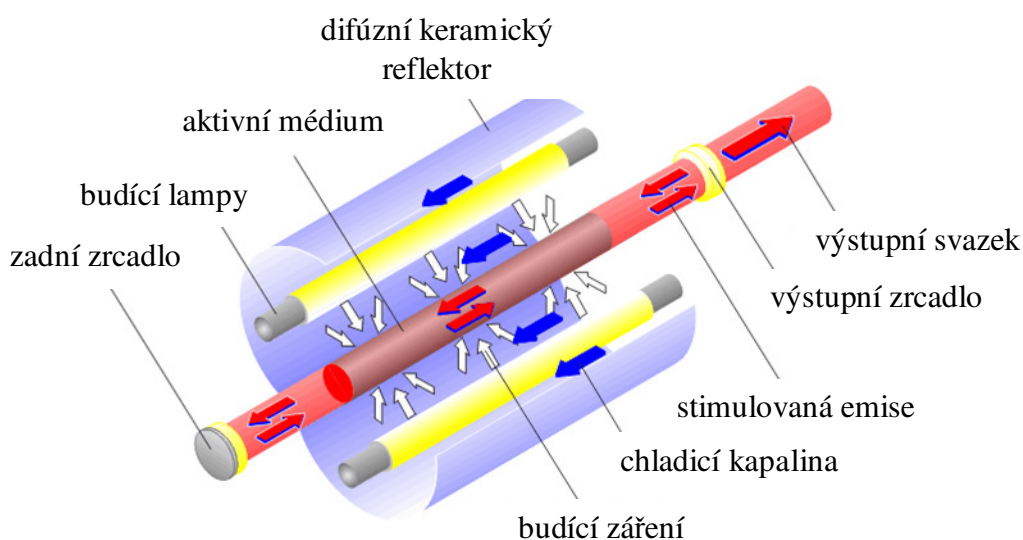


Obr. 15 Transverzální elektromagnetické módy [2]

1.2.1 Tyčový laser (Nd-YAG) [14], [18], [39], [48], [50]

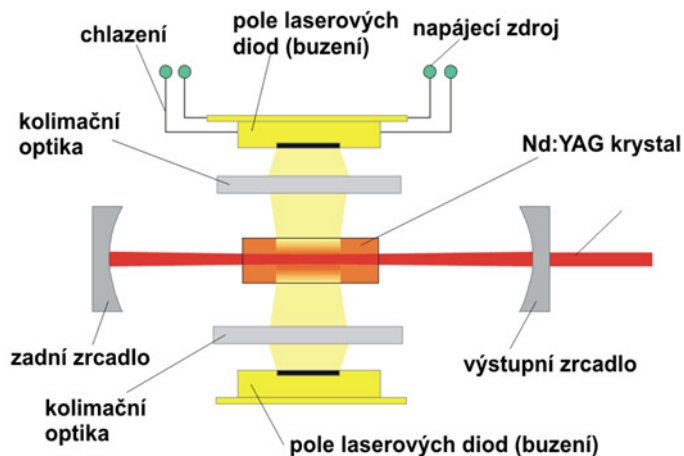
Aktivním prostředím u pevnolátkových laserů je pevná látka, nejčastěji monokrystal. Základním principem je buzení krystalu vzácných zemin budícími diodami, tím v soustavě zrcadlové dráhy vzniká koherentní laserové záření. Velkou výhodou pevnolátkových laserů je možnost vedení paprsku ve flexibilním optickém vláknu od zdroje až k pracovní optice. Pevnolátkové lasery dosahují kvalitnějšího a užšího svazku a disponují proto dostatečně vysokou hustotou výkonu.

Nejstarší typ pevnolátkového laseru je tyčový Nd-YAG laser, který využívá jako aktivní prostředí tyčinku o délce 15-20cm, průměr řádově v mm. Materiálem tyčinky je krystal neodymem dopovaného yttrium aluminium granátu (Obr. 16). Nemalou výhodou je i vyšší absorpce záření nižších vlnových délek neželeznými kovy, při nichž se dosahuje lepších výsledků při zpracování. Používají se dva typy buzení Nd:YAG laserů, první typ je buzení výbojkami (LPSS – Lamp Pumped Solid State) nebo druhý typ buzení laserovými diodami (DPSS – Diode Pumped Solid State).



Obr. 16: Schéma pevnolátkového Nd: YAG laseru [18]

Nd:YAG lasery buzené výbojkami (LPSS) mají nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, velká část energie výbojky se přemění na teplo, které není žádoucí. Další nevýhody jsou nízká účinnost, vysoké provozní náklady, krátká životnost výbojek (kolem 1000 hod) a velké nároky na chlazení. Tyto lasery dosahují vysokých energií v pulsu, toho se využívá při jejich použití. V dnešní době se používají zejména pro laserové svařování v pulsním režimu, dále pro aplikace s požadavkem hlubokého průvaru a malé tepelně ovlivněné oblasti, vrtání (ušlechtilé oceli a litiny).

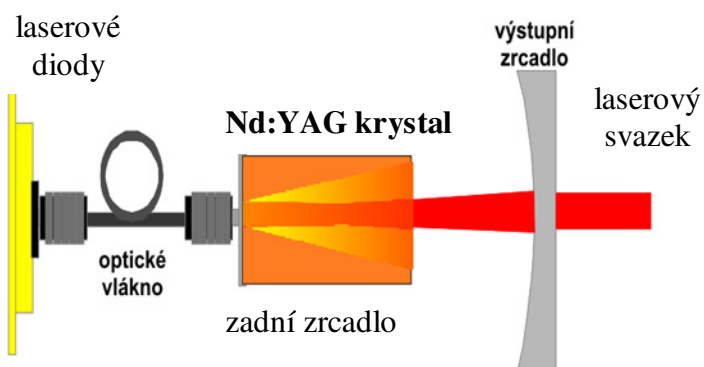


Obr. 17: Boční buzení Nd: YAG laseru [18]

Nd:YAG lasery buzené laserovými diodami (DPSS) mohou být dle uspořádání rezonátoru dvojího typu a to s bočním (transversálním) buzením (Obr. 17) nebo se zadním buzením (tzv. end pumped) - Obr. 18. Zadní buzení dosahuje lepší kvality svazku, ale nižších výkonů. Boční buzení naopak dosahuje vyšších výkonů, ale při nižší kvalitě svazku.

Hlavní využití laserů buzených laserovými diodami je ve značení a gravírování kovů, plastů aj. materiálů. V porovnání s lasery buzenými výbojkami dosahují vyšší účinnosti, mají delší životnost a menší nároky na chlazení.

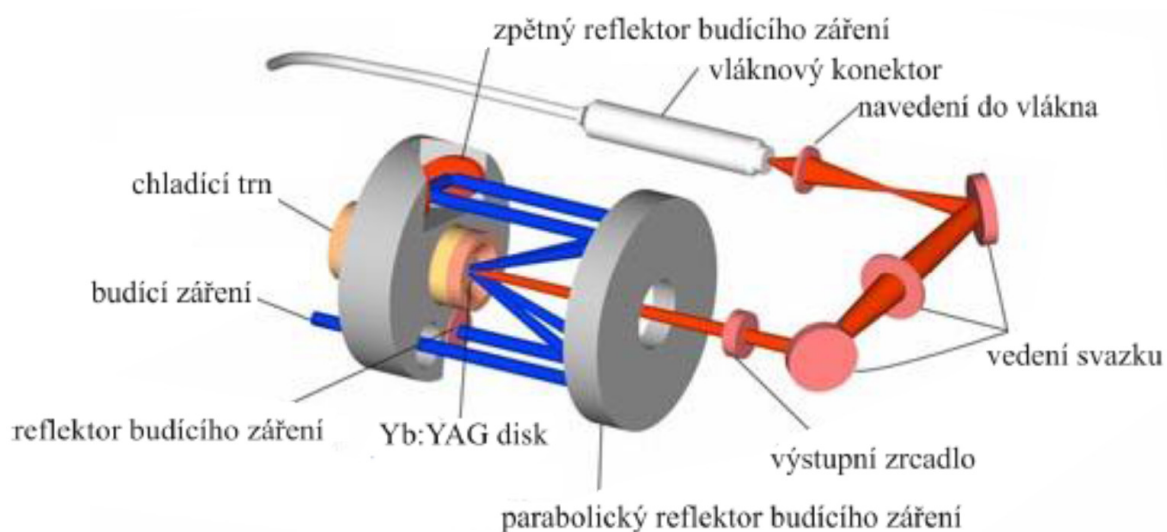
Nicméně tyto lasery jsou nahrazovány vláknovými pulsními lasery, které nabízejí více výhod. Lasery se zadním buzením mohou být mylně zaměňovány s vláknovými lasery, neboť budící záření z laserových diod se vede do YAG krystalu optickým vláknem, diody mohou být výhodně umístěny mimo rezonátor.



Obr. 18 Zadní buzení Nd: YAG laseru [18]

1.2.2 Diskový laser [1], [39], [48]

U diskového (nebo také kotoučového) typu Yb-YAG laseru je dosaženo lepší stability módu a kompaktnější konstrukce. Jedná se v podstatě o modifikaci Nd:YAG laserů. Výhodou disku jako aktivního prostředí je rovný teplotní profil po celém disku, který umožňuje dosáhnout vysokých výkonů (až 16 kW). Aktivní prostředí obsahuje 30 % ytterbia, je ve tvaru válce o výšce několik desetin milimetrů a průměru většinou do 100 mm, schéma diskového laseru je zobrazeno na Obr. 19.



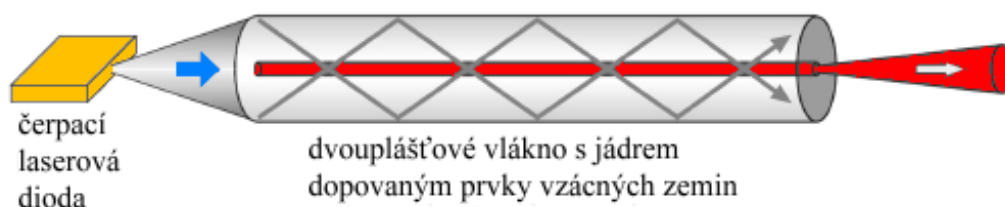
Obr. 19 Schéma diskového laseru [1]

Čerpání aktivního prostředí se uskutečňuje vícenásobnými dopady záření laserových diod o vlnové délce 940 nm, které je přiváděno optickým vláknem do rezonátoru. Účinnost čerpání dosahuje 90 %, neboť budící záření je absorbováno celou tloušťkou aktivního prostředí. Chlazení je uskutečňováno vzduchem pomocí celoplošného kontaktního chladiče, který je napojen na zadní stranu disku, i při vyšších výkonech laseru zajišťuje rovnoměrné a intenzivní chlazení. To vede k homogennímu rozdělení intenzity ve svazku a výsledkem je svazek s vysokou kvalitou.

Výhodou diskového laseru je, že kvalita svazku nezávisí na výkonu laseru. Nevýhodou je menší celková účinnost (15-20%) a nižší životnost než lasery vláknové. Dosahované výkony jednokotoučových laserů jsou kolem 500 W, pro získání vyšších výkonů je používáno sériové spřažení více kotoučů do výstupního vlákna, tím se dá zvýšit výkon až na několik kilowatt. Diskový laser je vhodný pro výkonově náročné operace, jako jsou řezání a svařování kovů.

1.2.3 Vláknový laser [1], [21], [39], [48]

Vláknový (fiber) laser je nejmodernějším typem pevnolátkových laserů. Jako aktivní prostředí slouží dlouhé křemíkové optické vlákno s průměrem jádra několik mikrometrů a délce několik metrů, dopované nejčastěji ionty erbia, thulia nebo ytterbia. Schéma vláknového laseru je zobrazuje Obr. 20. Vlnová délka výstupního svazku je závislá na použitém prvku dopování. Při použití erbia je vlnová délka svazku od 1,54 μm do 1,62 μm , u thulia od 1,72 μm do 2,0 μm a ytterbia od 1,06 μm do 1,12 μm . V současnosti je nejvýkonnější typ s dopováním ytterbiem, jehož výkon dosahuje desítek kilowatt, oproti tomu erbiové a thuliové lasery dosahují řádově desetkrát nižších výkonů.



Obr. 20 Schéma vláknového laseru [48]

K buzení slouží laserové diody, které dosahují vysoké účinnosti čerpání až 80 % a celkovou vysokou účinností až 35 %, díky tomu se aktivní látka tolik nezahřívá jako u ostatních typů laserů, teplo se rovnoměrně rozloží po celé délce vlákna a nehrozí tudíž zhoršení kvality svazku nebo jiné poškození. Chladí se obvykle vzduchem nebo vodou. Výsledkem je velice kvalitní a stabilní mód, svazek lze fokusovat na velmi malý průměr, který je pro většinu průmyslových aplikací dostatečný.

Vláknové lasery mají obrovskou výhodu ve své jednoduchosti, modularitě, mohou postupně navyšovat výkon spojováním laserových modulů (200 W) až na výkon 80 kW. Stává se, že se zvyšujícím se výkonem laseru se zvyšuje taktéž rozbíhavost svazku, čímž se snižuje jeho kvalita, toto platí pro extrémní aplikace, které vyžadují velké výkony. Vláknové lasery dosahují vysoké životnosti (až 100 000 hod) a mají malé nároky na prostor, protože zdroj je v podstatě jen „skříň“.

Tyto lasery jsou téměř bezúdržbové a provozní náklady jsou nejnižší z uváděných typů. Své uplatnění nachází vláknové lasery v celé řadě odvětví, jsou vhodné pro přesné řezání, gravírování, bodové svařování a vrtání. Mimo to se používají v chirurgii, dermatologii a také v telekomunikační technice.

1.2.4 Plynový laser (CO₂) [2], [14], [18], [21], [31], [48], [50]

Aktivní prostředí u plynových laserů je tvořeno plyny nebo směsí plynů a par. Dosahované výkony jsou od mW až po desítky kW, vlnové délky záření jsou od ultrafialových, přes viditelné až po infračervenou oblast. Čerpání plynových laserů je možné pomocí elektrického výboje, elektronovým svazkem nebo chemickou reakcí. Plynové lasery mohou pracovat jak v kontinuálním tak i pulzním režimu, převážně však pracují v kontinuálním režimu, v pulzním režimu dosahují výkonů maximálně stovek W.

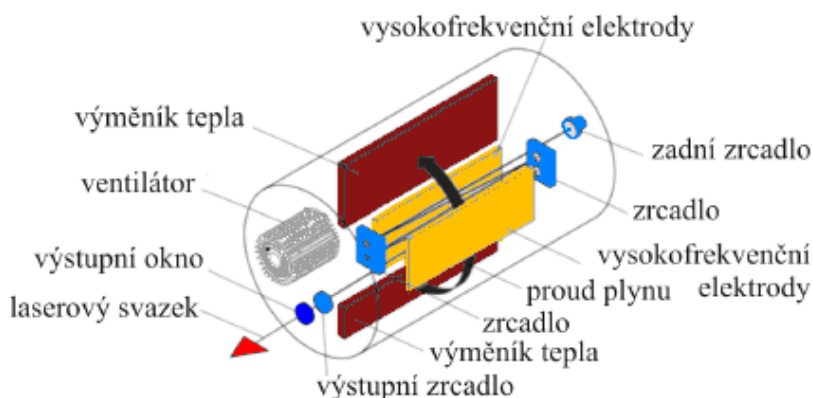
Nevýhodou těchto laserů je nemožnost vedení záření pomocí optických vláken, vedení je možné pomocí soustavy zrcadel, což je náročnější na pravidelné kalibrace, nároky na čistotu a údržbu zrcadel. Obvykle se tedy používají pro 2D operace řezání a svařování. Další nevýhodou jsou dosahované výkony, které jsou závislé na velikosti objemu aktivního prostředí, proto výkonné plynové lasery dosahují značných rozměrů.

Představitelem plynového laseru je CO₂ laser. Aktivní prostředí tvoří směs plynů CO₂, He a N₂ obvykle v poměru 1:5:4. Elektrickým výbojem (vysokonapětovým nebo vysokofrekvenčním) se vybudí molekuly dusíku do vyššího energetického stavu, nepružnými srážkami dojde k přenosu energie na molekuly oxidu uhličitého, tím dochází k excitaci a k vyzáření světelného paprsku při sestupu. Vyzařovaná pracovní vlnová délka je 10,6 μm, z důvodu velké vlnové délky dochází k velké reflexi paprsku a většímu rozměru stopy fokusovaného paprsku. Helium se dále podílí na návratu molekul CO₂ do základního stavu, aby se mohl celý proces opakovat.

Dosahované výkony zařízení jsou do 20 kW, při nichž se dosahuje účinnosti 5-10%. Je nutné použití speciální optiky, refrakční optika ZnSe, GaAs, Ge, reflexní optika Si/Cu s Au, nelze použít sklo. Tento laser je používán v řezacích aplikacích, značení a gravírování. Řezat lze kovy i nekovy (plast, papír, sklo, kůže aj.).

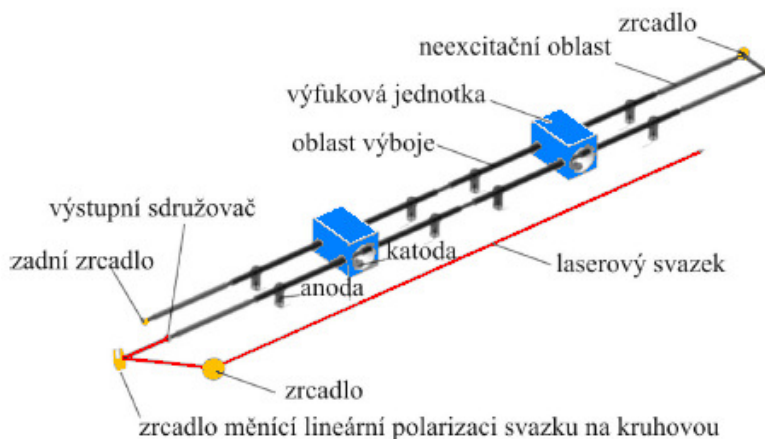
Podle způsobu proudění směsí pracovních plynů v trubici rozlišujeme CO₂ lasery s příčným a podélným prouděním pracovní látky. Přehled vlastností a aplikací typů CO₂ laserů je v Tab. 3.

Lasery s příčným prouděním poskytují svazek menší kvality ($K > 0,18$), může za to nízká rychlost proudění plynů kolmo k ose rezonátoru. Schéma uspořádání laseru, viz Obr. 21. Tento typ nemůže pracovat v pulzním režimu z důvodu špatné ovladatelnosti při čerpání. Výstupní svazek není vhodný pro řezání, jejich použití je spíše ve svařování a tepelném zpracování. Tento typ má výrazně menší spotřebu plynů, proto jsou i provozní náklady nižší.



Obr. 21 Schéma příčného proudění CO₂ laseru [48]

Lasery s podélným prouděním jsou buzeny elektrickým výbojem v ose trubice, výsledkem je svazek o vysoké kvalitě ($K > 0,4$), mohou pracovat jak v kontinuálním tak pulzním režimu, výkony se pohybují do 5kW. Tento typ s podélným prouděním je vhodný pro řezací aplikace z důvodů vyšší kvality svazku. Schéma uspořádání laseru, viz Obr. 22.



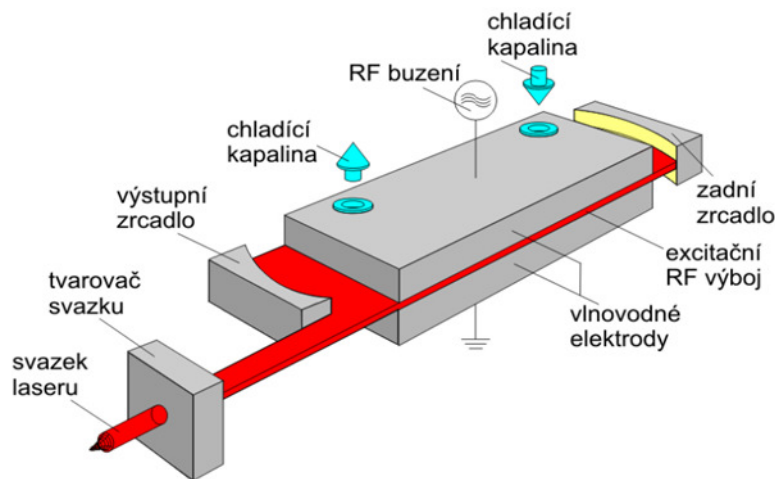
Obr. 22 Schéma podélného proudění CO₂ laseru [48]

Difúzně chlazený

deskový SLAB laser

je nejmodernějším typem CO₂ laseru (Obr. 23), obsahuje zásobník na zdroj plynové směsi (10 l), který pokryje

zhruba rok nepřetržitého provozu, to značně snižuje náklady na údržbu i servis mimo jiné i proto, že u tohoto typu nejsou pohyblivé části. Odvod tepla je zajištěn na vodou chlazených vysokofrekvenčních elektrodách. Oproti starším typům CO₂ laserů má novější konstrukci rezonátoru, díky tomu se zmenšili rozměry zdroje u vyšších výkonů. Výstupní svazek dosahuje vysoké kvality ($K > 0,8$), vysoké hustoty výkonu a menší tepelně ovlivněné oblasti.



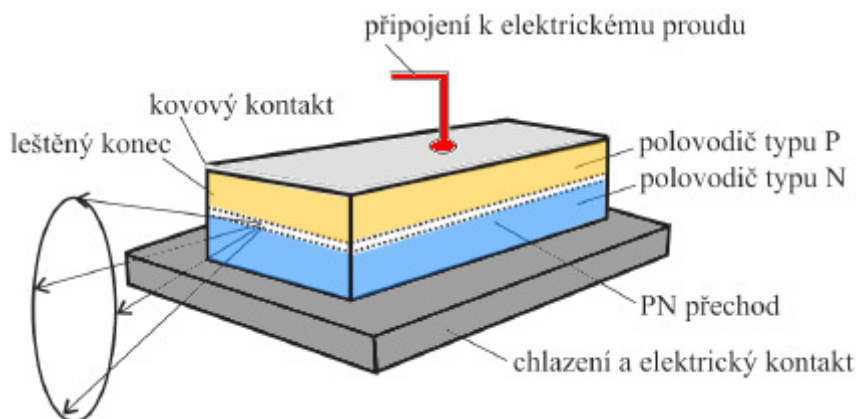
Obr. 23 Princip SLAB laseru [18]

Tab. 3 Přehled vlastností typů CO₂ laserů [18], [48]

Typ CO ₂ laseru	Vln. délka	Režim	Výkon	Kvalita výstupního svazku	Aplikace
podélné proud.	10,6 μm	kontinuální a pulzní	5 kW	$K > 0,4$	vyšší kvalita svazku řezání
příčné proud.	10,6 μm	kontinuální	10 kW	$K > 0,18$	méně kvalitní svazek svařování
SLAB	10,6 μm	kontinuální a pulzní	5 kW	$K > 0,8$	vysoká kvalita svazku řezání svařování

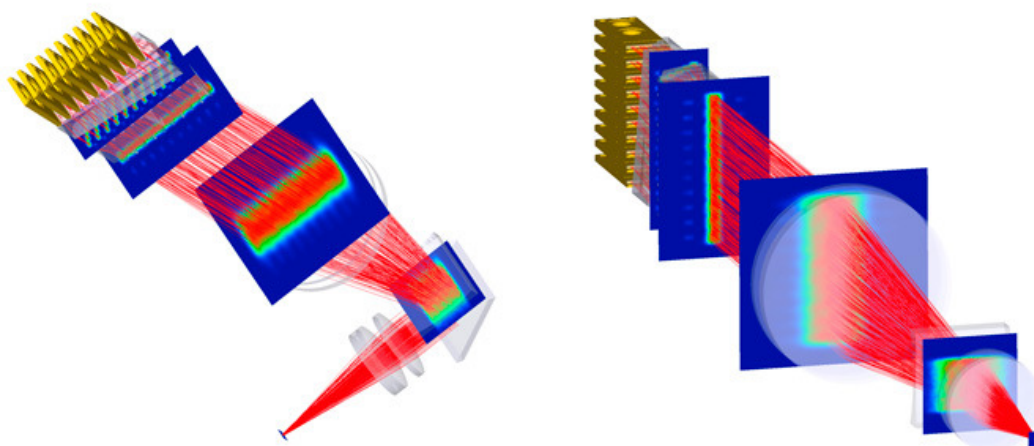
1.2.5 Polovodičový laser [21], [23], [48], [50]

Patří do skupiny pevnolátkových laserů. Dnes patří polovodičové lasery k nejrozšířenějším laserům. Pokud je aktivní prostředí laseru tvořeno silně dopovaným polovodičem, označují se jako laserová dioda. Aktivní prostředí je tedy tvořeno krystalem a má tvar hranolu, ten musí být opracován tak, aby jeho čelní stěny byly kolmé na tento PN přechod, viz Obr. 24. Tímto se vytvoří Fabry - Perotův rezonátor.



Obr. 24 Laserová dioda – schéma [48]

Oproti jiným laserům nepracují s přechodem elektronů mezi diskretními hladinami, ale s elektronovým přechodem mezi vodivostním a valenčním pásmem polovodiče. Čerpání aktivního prostředí je uskutečňováno průchodem elektrického proudu. Záření emitované z PN přechodu, o plošce řádově 10^{-6} mm², je ve viditelné červené a infračervené oblasti, vzniklé záření se šíří v rovině přechodu a pomocí opakovaných odrazů se zesiluje. Získaný výkon se pohybuje v miliwattech. Pro získání větších výkonů se řady laserové diody slučují do sloupců a bloků, potom získáváme polovodičový (diodový) laser požadovaného výkonu v řádech několika kW.



Obr. 25 Princip modifikace paprsku [23]

Výstupní svazek z rezonátoru má velkou divergenci a různý profil, který je navíc rozdílný ve směru os x a y. Z tohoto důvodu se na stěnu bloku umísťují válcové mikročochy, ze kterých svazek už vystupuje v rovnoběžném stavu. Obr. 25 znázorňuje modifikace laserového paprsku, tento způsob přetvoření profilu se používá u

polovodičových laserů, které jsou umístěny přímo na rameni robota. Pokud polovodičový laserový zdroj je umístěn poblíž pracovního prostoru pracoviště, je laserový paprsek veden z tohoto zdroje do laserové hlavy pomocí optického vlákna. Při vedení paprsku ze zdroje do laserové hlavy pomocí optického vlákna se používá pro vytvoření obdélníkového profilu beam integrátor.

Kvalita generovaného laserového svazku polovodičovým laserem v porovnání s ostatními typy laserů je výrazně nižší a jeho použití je tedy především v aplikacích, u kterých není požadovaný úzký svazek a kde není nutné svazek fokusovat na malou plochu. Naopak se využívá větší průměr popř. obdélníkový průřez. Svoje uplatnění polovodičové lasery tudíž nacházejí v povrchových úpravách materiálů, svařování, dále se používají pro již zmiňované čerpání pevnolátkových laserů, v telekomunikacích, výpočetní technice a také v dermatologii.

Vlnová délka laseru se pohybuje kolem 1 μm , je dána koncentrací legujících prvků v polovodiči, nejpoužívanějším typem je GaAs laser generující záření na vlnové délce 808 nm, dále jsou využívány GaN, AlGaInP, GaN, InAsSb lasery. Dosahovaný výkon polovodičového laseru je do 10 kW při dosahované účinnosti až 40%. Polovodičové lasery tedy mají hlavní výhodu ve vysoké účinnosti, nízké hmotnosti, jsou kompaktní a nesčetnou výhodou je možnost vedení svazku optickým vláknem z rezonátoru až k optice laserové hlavy. Jejich kompaktnost umožňuje umístění na rameno robota, čehož se využívá při svařování tvarově náročných součástí v automobilovém průmyslu.

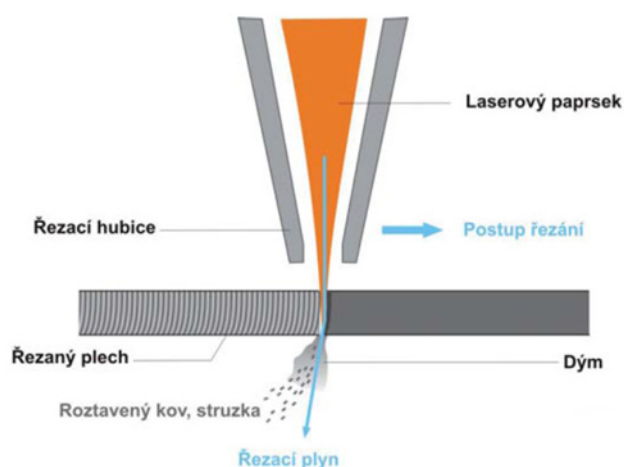
Ze všech typů průmyslových laserů se pro povrchové kalení využívá CO₂ laser, který je v současnosti nahrazován právě polovodičovými lasery s dosahovanou vyšší účinností. Pevnolátkové vláknové a diskové lasery mají velmi kvalitní výstupní laserový paprsek a bylo by nevhodné použití takto kvalitního svazku pro povrchové kalení.

1.2.6 Příklady laserových aplikací [2],[14],[20],[24],[25],[29],[34],[40],[44],[49],[50],[51],[52]

Průmyslových aplikací s využitím laserů je dnes nepřehledné množství a bylo by nemožné je všechny vyjmenovat. Tato podkapitola je věnována základním laserovým aplikacím používaných běžně v průmyslu pro obecný přehled využití průmyslových laserů.

● Řezání

Pomocí laserového řezání lze dosáhnout velmi úzkých, hladkých a přesných řezů bez okují. Vzniklé hrany jsou kolmé a zpravidla nebývá nutné jejich další opracování. Hloubka řezu je závislá na výkonu laseru, řezaném materiálu, jakosti a na optických a tepelných vlastnostech. Absorpci záření lze zvýšit vhodným povlakem, dále u hrubého povrchu je absorpce vyšší než u leštěného povrchu. Řezaný materiál je v místě řezu nataven laserovým paprskem a tavenina následně odstraněna proudem vysokotlakého plynu. Efektivně lze řezat materiály s malou tepelnou



Obr. 26 Laserové řezání [14]

vodivostí. Při řezání se pohybuje buď řezací hlava po obrobku, nebo obrobek vůči řezací hlavě. Druhá možnost je využívána častěji. Pro laserové řezání jsou vhodné CO₂, diskové a vláknové lasery.

• *Laserové svařování*

Při působení laserového svazku o velké plošné hustotě výkonu dochází k rychlému lokálnímu ohřevu v místě svaru. Následně proběhne ohřev, natavení, spojení a ochlazení velmi rychle, díky čemuž se vytváří úzká tepelně ovlivněná oblast, tudíž i menší deformace. Obvykle se svařuje bez přídavného materiálu, ale je možné svařovat i s přídavným materiálem. Výhodami jsou vysoká kvalita svaru (čistota svaru), vysoká rychlost svařování, vysoká pevnost, velký poměr hloubky a šířky svaru, možnost svařovat materiály s velmi rozdílnými teplotami tavení. Pro svařování je potřeba speciální optiky namontované na rameno robota, tato optika je ve vzdálenosti 100 až 1000 mm od svařovaného povrchu. Jako u

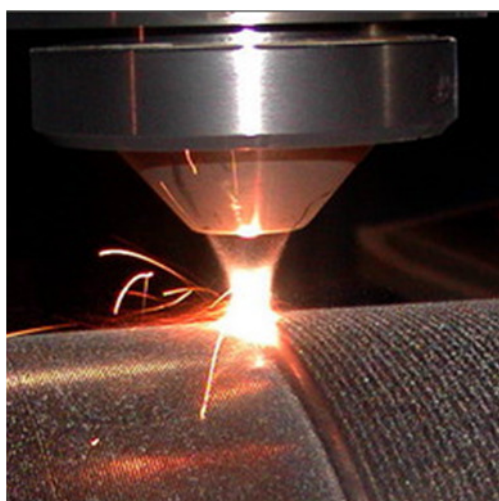


Obr. 27 Metody laserového svařování [20]

penetrační a keyhole svařování, viz Obr. 27. Ke svařování jsou nejčastěji používány Nd:YAG a CO₂ lasery a v poslední době především diodové lasery.

• *Laserové navařování*

Laserové navařování (Obr. 28) je technologie v oblasti vytváření návarů pro zlepšení povrchových vlastností (otěruvzdornost, žáruvzdornost, korozivzdornost), opravy opotřebovaných dílů (navarování hřídel, dělicích rovin forem) ale i výroba nových součástí (lopatky turbín leteckých proudových motorů). Používané přídavné materiály jsou na bázi Ni, Fe, Co, Cu, Ti a jiné. Přídavný materiál ve formě prášku je nataven před dopadem na povrch a je metalurgicky propojen se základním materiálem díky laserovému záření. Celý proces probíhá velmi rychle, podkladový materiál je málo tepelně ovlivněn což vede k rychlému odvodu tepla z vytvořené vrstvy a vzniku jemnozrnné struktury s vyšší tvrdostí než je běžné u ostatních metod. Dosahovaná tloušťka navařované vrstvy je 0,2 až 2 mm, vrstvy lze klást na sebe, je možné navařit tvarově rozmanitou linii i souvislé plochy. Návary a povlaky mají nízkou porozitu a malé tepelné ovlivnění povlakovaných součástí.



Obr. 28 Laserové navařování [25]

● *Pájení*

Pájení je difuzní spojování dílů nataveným přídavným materiálem při nižší teplotě, než je teplota tavení spojovaných dílů. Pro pájení se používají pevnolátkové Nd:YAG lasery a modernější diodové lasery, které mají vhodnější pravoúhlý průřez s téměř konstantním rozdělením intenzity záření. Pevnolátkové lasery mají kruhový profil intenzity. Polovodičový laser umožňuje při správném směřování paprsku předejít pájených míst a pájku drží déle v tekutém stavu. Zároveň dochází k zahřívání jen úzké stopy a minimální tepelně ovlivněné oblasti. Při laserovém pájení je možné používat jak měkkou pájku, tak i tvrdou pájku. Tvrdé pájení má přednost oproti technologii svařování ve vyloučení deformace z důsledku tepelného ovlivnění spojovaných dílů, je vhodné i pro spojování dílů se speciální povrchovou úpravou (např. pozinkované plechy), kterou pájení nenarušuje, dále je možné spojovat nesourodé materiály a Al s jeho slitinami.



Obr. 29 Laserové pájení [52]

● *Texturování*

Texturování je další možné tepelné zpracování povrchu za pomoci laseru, v tomto případě se pomocí laserového svazku vytváří na povrchu materiálu pravidelný vzor (Obr. 30). Takto vzniklá povrchová vrstva může ovlivňovat drsnost povrchu nebo její odrazivost. Využití texturování je například při výrobě fotovoltaických článků.



Obr. 30 Příklady texturování [24]

● *Laserové legování*

Další průmyslovou aplikací je laserové legování (Obr. 31), kde použitím vyšší výkonové hustoty svazku dochází k natavení povrchu materiálu. Jestliže je během natavení do taveniny dodáván ještě další materiál, který se roztaví, dochází po ztuhnutí ke vzniku velmi malé povrchově legované vrstvy 1 až 2 μm , která je homogenní směsí dodaného a základního materiálu. Vlastnosti vytvořené vrstvy jsou odvislé od základního a přidávaného materiálu, proto bývá povrch materiálu sycen niklem, chromem a molybdenem u ocelí nebo uhlíkem, dusíkem, niklem nebo křemíkem u hliníku. Výhodná je malá hloubka ovlivněné vrstvy a malá tepelně



Obr. 31 Úprava povrchu vysoce namáhaných tvářecích nástrojů [29]

ovlivněná oblast, díky čemu se může legovat lokálně bez ovlivnění okolního povrchu. Metoda se používá pro zápustky, formy pro tlakové lití hliníku nebo pro nástroje pro hluboké tažení.

• Značení

Používá se k vytvoření obrazu na povrchu materiálu. Obraz je nejčastěji vytvořen rozmítáním svazku po povrchu značeného materiálu (Obr. 32). Interakcí laserového svazku s materiálem dochází k lokálnímu odpaření materiálu nebo změně barvy. Značení je prováděno vysokou rychlostí, bezkontaktně díky čemuž nedochází k jakémukoli jinému poškození popisovaného objektu. Popisovací rychlost dosahuje až 4 000 mm/s v závislosti na druhu materiálu s rozlišením cca 0,002 mm. Laserové značení je jedním z nejrychlejších procesů značení. Materiály vhodné k laserovému značení jsou nejen kovy a plasty, ale třeba i lakovaný papír.

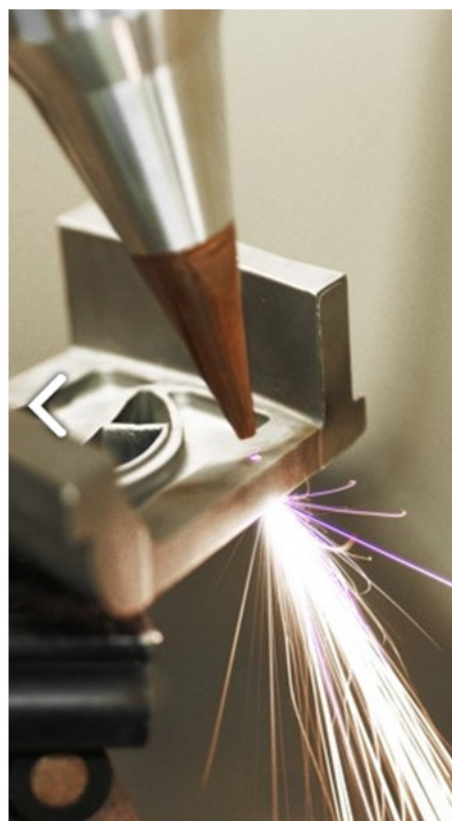
Rozmítaný laserový svazek se používá také u povrchového kalení, s jehož použitím je možné kalit pouze definované části povrchu, což je velice nekonvenční, ale při takovémto využití lze dosáhnout výborných výsledků.

• Vrtání

Vrtání za pomoci laseru (Obr. 33) je založeno na odstraňování materiálu jeho odpařováním. Lasery pro vrtání vyžadují vysokou výkonovou hustotu dopadajícího fokusovaného laserového paprsku, po dopadu tohoto paprsku se materiál lokálně ohřeje na teplotu varu a dojde k jeho částečnému odpaření. Dochází k vytvoření dutiny, která se dále prohlubuje díky odrazům záření uvnitř dutiny. Pro vrtání se používají především pulzní lasery, protože intenzita laserového paprsku musí být vyšší než pro jiné aplikace. Vrtat lze kovy, plasty, sklo, keramika, dřevo a jiné materiály. Výhodou laserem vrtaných otvorů je jejich přesnost, lze vytvářet i velmi malé přesné otvory i v místech kde to je pomocí jiných metod obtížné nebo nemožné.



Obr. 32 Značení pomocí rozmítaného svazku [44]



Obr. 33 Laserové vrtání [26]

1.3 Vyhodnocení zakalené vrstvy [27], [28], [32], [41]

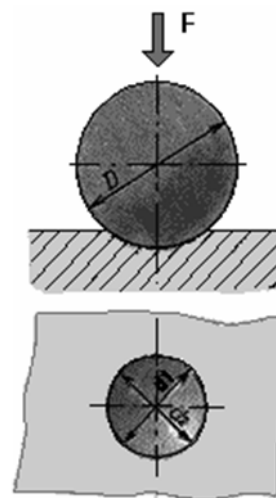
Při povrchovém kalení dochází vlivem ohřátí povrchové vrstvy ke vzniku jemnozrnné martenzitické struktury o vyšší tvrdosti, než kterou vykazuje základní materiál. Proto se při vyhodnocení zakalených vrstev používá mimo hodnocení makrostruktury a mikrostruktury také zkouška tvrdosti. Tvrdost je měřena na kaleném vzorku v podélném směru, následně je možné z naměřených hodnot zhodnotit, jak byla součást hluboko zakalená.

Tvrdost je obecně definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Zkouška tvrdosti spočívá ve vlačování indentoru (vnikajícího tělesa) definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu. U statických metod podle Brinella, Vickerse a Knoop je měřítkem tvrdosti velikost plastické deformace, u metody podle Rockwella je měřítkem tvrdosti velikost elasticko - plastické deformace. Indentor bývá jednoduchého geometrického tvaru, jako jsou koule, kužel nebo jehlan.

1.3.1 Metoda měření tvrdosti podle Brinella [27], [28], [41]

Podstatou zkoušky je vlačování indentoru, což je ocelová kulička nebo kulička z tvrdokovu o průměru D , do měřeného povrchu materiálu, následuje změření průměru vtisku d , který zůstal v materiálu po odlehčení, viz Obr. 34. Pro materiály s tvrdostí podle Brinella větší než 450 se používá ocelová kulička, do tvrdosti podle Brinella 650 se používá kulička z tvrdokovu. Zkouška se provádí na Brinellově tvrdoměru, který může mít různé velikosti a provedení od velkých stabilních přístrojů po malé jednoduché přístroje. Zkouška tvrdosti podle Brinella je předepsána evropskou normou ČSN EN ISO 6506-1.

Doba působení síly je závislá na struktuře zkoušeného materiálu, obecně je u slitin železa doba působení zkušební síly od 10 do 15 sekund a u neželezných slitin od 10 do 180 sekund. Měření vtisku je poměrně nepřesné, vtisk může být nesouměrný a nezřetelný. Další nepřesností může být samotná deformace vlačované kuličky. Výpočtový vztah pro tvrdost podle Brinella je:



Obr. 34 Měření tvrdosti podle Brinella [28]

(1.6)

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

Tab. 4 Zápis tvrdosti podle Brinella [27]

Číslo tvrdosti	Označení	Průměr kuličky / velikost zkušebního zatížení / doba působení (pouze rozdílná od normy)
300	HBW nebo HBS	5/750

1.3.2 Metoda měření tvrdosti podle Vickerse [27], [28]

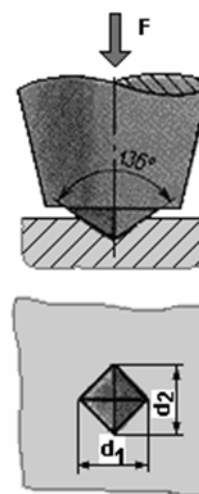
Do zkušebního materiálu je vlačován diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s daným vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami 136° , viz Obr. 35. Indentor je vlačován do materiálu vzorku zatížením F , které působí kolmo k povrchu. Následně je změřena uhlopříčka vtisku, která zůstane ve vzorku po odlehčení zkušebního zatížení. Zatěžující síly se pohybují od 10 do 1000 N a doba zatížení je od 10 do 180 sekund. Zkouška tvrdosti podle Vickerse je předepsána normou ČSN EN ISO 6507-1 pro kovové materiály.

Měření tvrdosti podle Vickerse lze použít pro měření všech tvrdostí, metoda je minimálně závislá na zatížení a je velice přesná.

Výsledná tvrdost je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (1.7)$$

kde F – zkušební zatížení [N]
 d – aritmetický průměr dvou délek uhlopříček [mm]



Obr. 35 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [28]

Tab. 5 Zápis hodnoty tvrdosti podle Vickerse [27]

Číslo tvrdosti	Označení	Číslo použitého zatížení
500	HV	5

Tab. 6 Oblasti zkušebního zatížení [27]

Oblast zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Označení
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až $< HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až $< HV 0,2$	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

1.3.3 Metoda měření tvrdosti podle Rockwella [27], [28]

Indentorem při této metodě je diamantový kužel nebo ocelová kulička (Obr. 36). Při doteku povrchu zkoušeného materiálu se nejprve předběžně zatíží silou 100 N a pozvolna se zatěžovací síla zvětšuje tak, aby se za 3 až 8 sekund dosáhlo předepsaného zatížení daného normou ČSN EN ISO 6508-1. Celkové zatížení je součtem předběžného zatížení 100 N a zkušebního zatížení.

Kulička má předepsaný průměr 1,5875 mm, tvrdost změřená pomocí kuličky je označována HRB, používané celkové zatížení je 1000 N. Použití kuličky jako indentoru je vhodnější pro měkčí kovy o tvrdosti 25 až 100 HRB. Diamantový kužel, který má vrcholový úhel 120° a poloměr kulové části 0,2 mm, je oproti kuličce vhodnější pro slinuté karbidy a tenké povrchové vrstvy. Pokud celkové zatížení pro určení tvrdosti pomocí diamantového kužele je 600 N, označuje se výsledná tvrdost HRA, pokud je 1500 N, označuje se HRC.

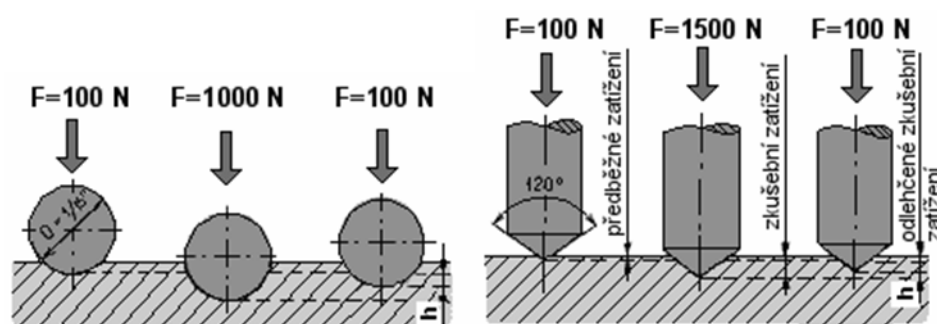
Tab. 7 Základní přehled zkoušky tvrdosti podle Rockwella [27]

Indentor	Označení	Celkové zatížení	Měřená hodnota
Diamantový kužel	HRA	600 N	Hloubka vtisku
	HRC	1500 N	
Ocelová kulička	HRB	1000 N	

Zkoušený povrch musí být hladký, rovný, bez okujené vrstvy a zcela bez mazadel. Měří se hloubka vtisku pomocí měřicího zařízení na zkušebním stroji. Zkouška je rychlá a snadná, je vhodná pro kontrolu výrobků při sériové výrobě a tam, kde Brinell už není použitelný.

Doba působení zkušebního zatížení u materiálů:

- 1 až 3 sekundy – nevykazující závislost plastické deformace na čase
- 1 až 5 sekund – vykazující omezenou závislost plastické deformace na čase
- 10 až 15 sekund – vykazující silnou závislost plastické deformace na čase



Obr. 36 Metoda měření tvrdosti podle Rockwella [28]

Tab. 8 Zápis tvrdosti podle Rockwella [27]

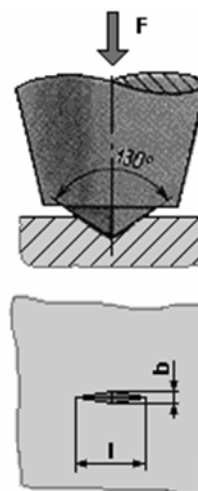
Číslo tvrdosti	Označení	Označení tvrdosti
60	HRA / HRB / HRC	/ HR s uvedením stupnice tvrdosti

1.3.4 Metoda měření tvrdosti Knoop [27], [28]

Do povrchu zkoušeného materiálu je vtlačován čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovými úhly 130° a $172,5^\circ$ a poměrem uhlopříček 7:1 definovanou silou F (Obr. 37). Poměr délky uhlopříčky k hloubce vtisku je 30, pro srovnání u metody Vickerse je tento poměr 7. Vtisk ve zkoušeném materiálu má tvar protáhlého kosočtverce a měří se pouze delší z uhlopříček. Metoda patří mezi metody měření mikrotvrdosti.

Metoda je vhodná pro měření velmi tenkých vrstev např. nitridovaných, dále pro tenké kovové a plastové desky a křehké materiály.

Tvrdost určena pomocí Knoop je definována jako podíl zatěžovací síly a druhé mocniny délky delší uhlopříčky.



Obr. 37 Metoda Knoop [28]

(1.8)

kde F – zatěžovací síla [N]
 d – délka delší uhlopříčky [mm]

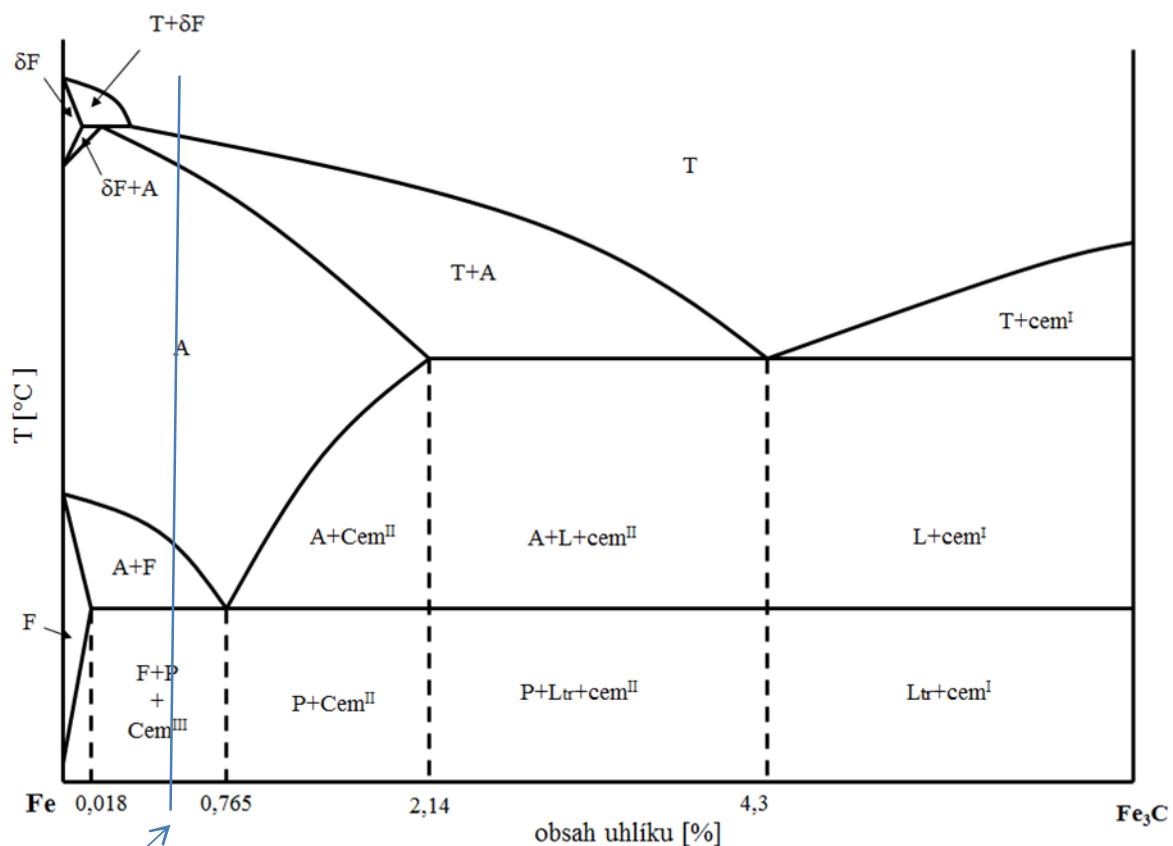
Tvrdost velmi často slouží jako výchozí hodnota k přibližnému stanovení i jiných mechanických vlastností. Příklad možného převodu:

kde k – koeficient závislý na materiálu, pro ocel $k = 3,1$ až $4,1$

2 ZKOUŠENÝ MATERIÁL [6], [12], [15], [37], [45]

Pro experiment byla použita nelegovaná konstrukční uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení, označována dle ČSN 12 050. Tento materiál je používán na hřídele těžních strojů, karuselů, turbokompresorů dále pak na větší ozubená kola, šneky, ojnice, pístnice, vřetena, plunžry, písty kompresorů, čepy, šrouby, lamely spojek, kladičky, zarážky, kolíky, spojovací součásti, vahadla, západky, vrtací tyče a frézovací trny.

Vhodné materiály k laserovému kalení jsou běžně kalitelné oceli, dále pak oceli s obsahem uhlíku od 0,3 % a všechny druhy litin, z tohoto hlediska použitý materiál s 0,5 % C zcela vyhovuje. Existuje prakticky lineární závislost mezi množstvím uhlíku a výslednou tvrdostí, čím více je v kaleném materiálu uhlíku, tím vyšší je dosažená tvrdost, to ovšem platí do obsahu uhlíku 0,4 %. Proto se pro povrchové kalení obvykle používají oceli s obsahem uhlíku 0,4 až 0,5 %. Vliv uhlíku lze také podpořit dalšími prvky, jako jsou Mn, Mo nebo Cr.



Obr. 38 Ocel 12 050 vyznačená v Fe – Fe₃C diagramu [45]

Rovnovážný diagram metastabilní soustavy Fe – Fe₃C, viz Obr. 38, vykresluje oblast s obsahem uhlíku do 6,67 %. V diagramu je vyznačena ocel 12 050 s obsahem uhlíku 0,5 %. Z diagramu je patrné, že základní materiál má výchozí feriticko - perlitickou strukturu.

Tab. 9 Označení materiálu [6]

Označení materiálu dle ČSN	Porovnání označení materiálu s ČSN EN
12 050	C45, C45E, C45R

Materiál nebyl dodán s příslušným atestem, proto není zcela jednoznačné chemické složení a tepelné zpracování. Také převod do ČSN EN není zcela jednoznačný (Tab. 9). Dle České technické normy odpovídá ocel označení 12 050 a dle ČSN EN C45, C45E a C45R. Symbol E předepisuje maximální obsah síry, symbol R předepisuje pouze rozsah pro obsah síry. Barevné označení materiálu je kombinace zelená, červená a černá. Použitý materiál je tedy nelegovaná konstrukční ocel se středním obsahem Mn pod 1 %. Chemické složení dle ČSN je v následující tabulce.

Tab. 10 Chemické složení oceli 12 050 ČSN [12]

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

Pozn. Hodnoty v tabulce jsou v hm. %

Kalení je založeno na důležité vlastnosti železa tzv. polymorfii. Konstrukční oceli mají při nízkých teplotách uspořádané atomy do mřížky prostorově středěné. Při ohřevu nad určitou teplotu se mřížka transformuje na mřížku kubickou plošně středěnou, příslušná teplota je závislá na chemickém složení dané oceli. Nově vytvořená mřížka má oproti počáteční mřížce jinou vzdálenost mezi sousedními atomy, nastává tzv. austenitizace, kdy zároveň dochází k rozpouštění karbidů a uhlík se přesouvá do volnějších míst v mřížce. Následné rychlé ochlazení transformuje mřížku do původní podoby, ale vlivem krátkých časů přeměny, se transformuje do ne zcela rovnovážných a pravidelných poloh.

Tab. 11 Základní mechanické vlastnosti [12]

Mez kluzu R_e [MPa] min.	355
Mez pevnosti R_m [MPa] min.	600
Tažnost A_5 [%] min.	15

Při povrchové kalení je obzvláště důležitá výchozí struktura. Čím jemnější, stejnoměrnější a rovnoměrněji rozložené jsou karbidy ve struktuře, tím se snáze rozpouštějí a austenit se lépe homogenizuje. Vhodnou výchozí strukturou je jemný lamelární perlit. Při rychlém ohřevu vzniká austenitické zrna, které má jemnozrnnou strukturu.

Předepsané hodnoty základních mechanických vlastností pro uhlíkovou ocel k zušlechťování a povrchovému kalení jsou znázorněny v Tab. 11.

3 POUŽITÉ METODY PŘI EXPERIMENTU

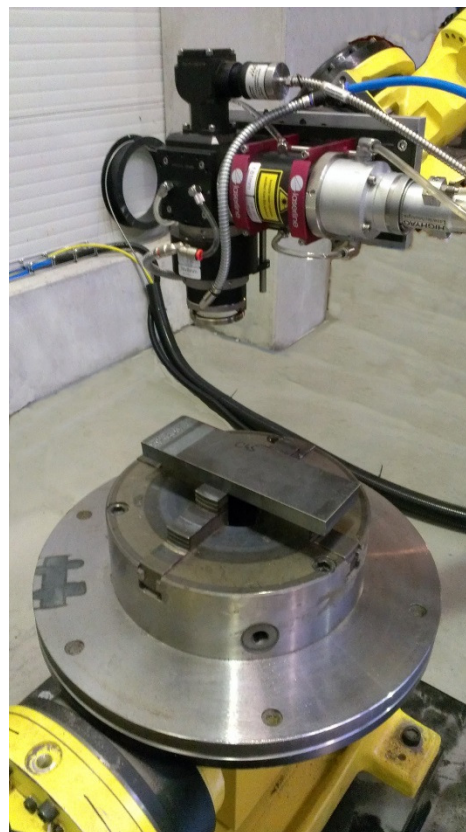
Experiment byl proveden na laserovém pracovišti ve firmě Fermat (Obr. 39), kde pomocí změny parametrů výkonu a rychlosti pohybu kalící hlavy bylo získáno 13 vzorků povrchového kalení oceli výkonovým polovodičovým laserem. Tyto vzorky byly následně rozřezány pomocí vodního paprsku, dále zalisovány, vyleštěny a vyleptány. Dále byla změřena získaná tvrdost po kalení, která je posuzována a porovnávána s makrostrukturou i mikrostrukturou a s použitými parametry při experimentu.

3.1 Použité zařízení při experimentu

Základní části laserového pracoviště jsou laserový zdroj, průmyslový robot, na jehož konci je umístěna kalící hlava, 2-osé polohovadlo. Dále bylo při zpracování vzorků použito elektrohydraulického lisu, metalografické leštičky a Vickersova tvrdoměru.

3.1.1 Laserový zdroj [23]

Pracoviště obsahovalo výkonový polovodičový laser od firmy Laserline typ LDF 6000-100 (Obr. 41). Tento laserový zdroj je vhodný pro kalení a navařování materiálu. Režim kalení nebo navařování je dán použitou laserovou hlavou. Laserový paprsek je z tohoto zdroje veden do laserové hlavy pomocí 0,6 mm optického vlákna, z důvodu velké tloušťky je tento průměr vlákna pro řezání nevhodný. Parametry laserového zdroje jsou uvedeny v Tab. 12.



Obr. 39 Laserové pracoviště

Tab. 12 Technické parametry použitého laserového zdroje [23]

Výrobce	LaserLine
Typ	LDF 6000-100
Výkon	6 kW
Pracovní vlnová délka	900 - 1070 nm
Min. kvalita laserového svazku	40 mm·mrad
Potřebná teplota okolí	10 - 45°C
Účinnost	Více než 45 %
Rozměry (délka x výška x šířka)	950 x 770 x 1700 [mm]
Hmotnost	600 kg



Obr. 41 Laserový zdroj Laserline [23]



Obr. 40 Průmyslový robot Fanuc [11]

3.1.2 Průmyslový robot [11]

O pohyb laserové hlavy se stará manipulační průmyslový robot od firmy Fanuc typ M-710 i C 50 (Obr. 40). V případě daného experimentu je na jeho konci umístěna kalicí hlava s možností manipulace v šesti stupních volnosti. Další technické parametry manipulačního robota jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 13 Technické parametry průmyslového robota [11]

Výrobce	Fanuc
Typ	M-710 i C 50
Stupně volnosti	6
Dosah	2050 mm
Nosnost	50 kg
Hmotnost	560 kg
Opakovatelnost	$\pm 0,07$
Stupeň krytí proti vniknutí prachu a vody (IP)	54

3.1.3 Laserová kalící hlava [23]

Kalící hlava od firmy Highyag Technologie je sestavena z modulárních komponent. Díky možnosti širokého výběru lze hlavu sestavit do podoby odpovídající dané aplikaci a potřebám uživatele. Ukázka katalogového listu pro sestavení laserové hlavy od firmy Laserline je uveden v příloze 1. Daná laserová kalící hlava neobsahuje tzv. cross jet, což je zařízení na ochranu optiky.



Obr. 42 Kalící hlava

3.1.4 Tvrdoměr Zwick

Byl využit Vickersův tvrdoměr značky Zwick 3212, který je umístěn na Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně. Přístroj umožňuje měření v rozsahu HV0,2 až HV30. Tvrdost je vyhodnocena pomocí PC, kde je promítnut vtisk zkoušky a software testXpert dopočítá hodnotu HV z rozměrů vtisku.

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je univerzální metoda pro velké rozmezí tvrdostí, je velice přesná a minimálně závislá na použitém zatížení. Při experimentu bylo použito zatížení 50 N.



Obr. 43 Tvrdoměr Zwick na Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně

3.1.5 Elektrohydraulický lis [46]

Zalisování vzorků probíhalo na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky (AV ČR) na elektrohydraulickém lisu CITO PRESS 1.1 od firmy Struers (Obr. 44). Zalisování vzorků bylo provedeno při 250 barech za teploty 180°C. 1 cyklus zalisování vzorku na průměr 30 mm trvá 5 minut včetně 2 minut chlazení.

Postup pro zalisování je následující, nejprve se napudrují kontaktní plochy, následně se vloží vzorek, provede se zasypání zalévací hmotou Struers Multifast, zašroubuje se, spustí se program a po 5 minutách je vzorek zalisován. V poslední fázi se odšroubuje pracovní prostor a očistí se kontaktní plochy.



Obr. 44 Elektrohydraulický lis Struers [46]

3.1.6 Metalografická leštička [46]

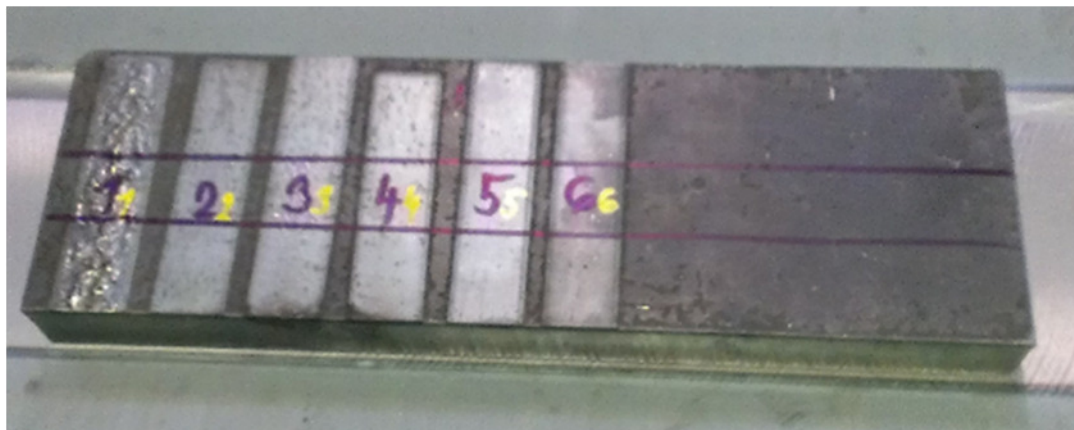
Pro leštění vzorků bylo použito metalografické leštičky od firmy Struers typ Tegramin-20 (Obr. 45), která se nachází na Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Vzorky jsou po čtyřech kusech nejprve broušeny smirkem o zrnitosti 120 a poté leštěny na leštícím kotouči s hrubostí 9 μm a 3 μm s použitím kapaliny DiaDuo. Poté byly vzorky vyleptány.



Obr. 45 Metalografická leštička [46]

4 EXPERIMENT

Experiment byl proveden na laserovém pracovišti ve firmě Fermat, kde bylo pomocí změny parametrů výkonu a rychlosti pohybu kalící hlavy získáno 13 vzorků povrchového kalení oceli dle ČSN 12 050. Fotografie jednotlivých vzorků po aplikování laserového kalení jsou uvedeny na Obr. 46 a Obr. 47, parametry kalení poté v Tab. 14.



Obr. 46 Vzorky 1 až 6 po povrchovém kalení

Vzorky číslo 1 až 6 byly kaleny konstantním výkonem 5 kW, při rychlosti laserové kalící hlavy od $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ do $2,0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Vizuální kontrola vzorků poukazuje viditelné přepálení povrchové vrstvy u vzorku číslo 1. Vykazuje tudíž nevhodnou použitou rychlost pohybu kalící hlavy pro daný výkon, tudíž rychlost $1,0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ je příliš nízká pro výkon 5 kW a dochází k přepalování povrchu. Podle vizuálního zhodnocení by bylo pro výkon 5 kW vhodné použít rychlosti 1,2 až $2,0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 47 Vzorky 7 až 14 po povrchovém kalení

Vzorky číslo 7 až 12 byly kaleny konstantním výkonem 6 kW, použité rychlosti kalící laserové hlavy byly od $1,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ do $2,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Provedené vzorky číslo 7, 8, 9, 10 a částečně i 11 při vizuální prohlídce vykazují přetavení povrchové vrstvy. Příčinou může být jak použitý vyšší výkon, tak nízká rychlost pohybu kalící hlavy. Při rychlosti $2,0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a výkonu 6 kW už materiál nevykazuje takové natavení povrchu. Vzorek číslo 12 vypadá vizuálně v pořádku, nevykazuje natavení povrchové vrstvy. Z vizuálního

zhodnocení povrchové vrstvy je pro výkon 6 kW ideální rychlost pohybu kalící hlavy $2,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

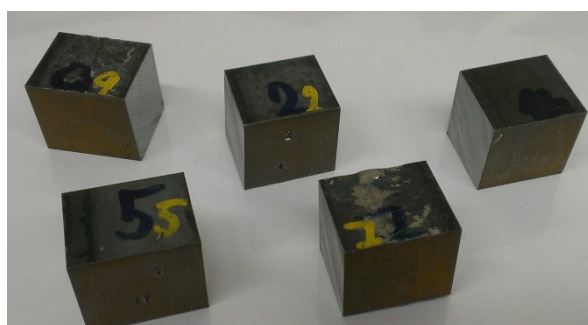
Vzorek číslo 14 byl kalen rychlostí $2,0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ při proměnném výkonu podřízenému držení konstantní teploty 1200°C pomocí pyrometru. Z vizuálního zhodnocení je viditelná určitá tepelně ovlivněná oblast, ale v porovnání se vzorkem číslo 12 je méně výrazná.

Tab. 14 Svařovací parametry použité při experimentu

Číslo vzorku	Výkon [kW]	Rychlost* [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Číslo vzorku	Výkon [kW]	Rychlost* [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
1	5	1	8	6	1,4
2	5	1,2	9	6	1,6
3	5	1,4	10	6	1,8
4	5	1,6	11	6	2
5	5	1,8	12	6	2,2
6	5	2	13	-	-
7	6	1,2	14	**	2

Pozn. :* rychlost pohybu laserové hlavy, ** držení konstantní teploty 1200°C

Vzorky byly očíslovány a rozřezány vodním paprskem na malé kostky, viz Obr. 48. Následně byly vzorky znovu číselně označeny, zalisovány na elektrohydraulickém lisu Struers, vyleštěny na metalografické leštičce a vyleptány (Obr. 49). Následně byly vyfoceny snímky makrostruktury, mikrostruktury a byla změřena tvrdost zakalené vrstvy.



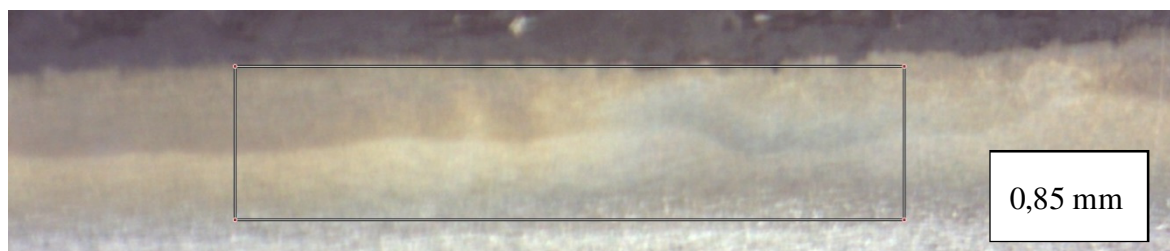
Obr. 48 Rozřezané vzorky



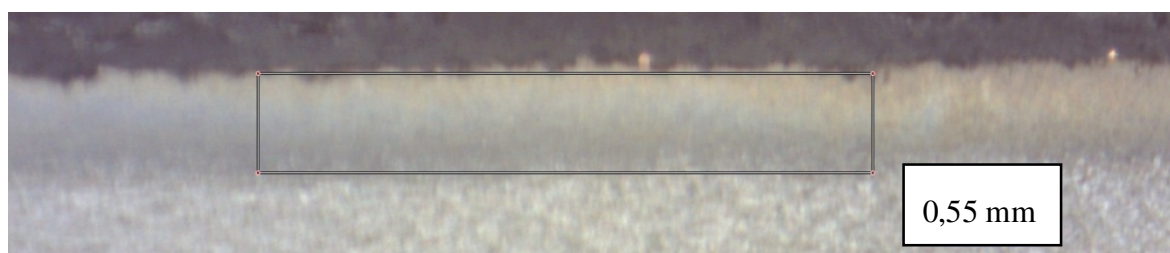
Obr. 49 Zalisované vzorky

4.1 Makrostruktura

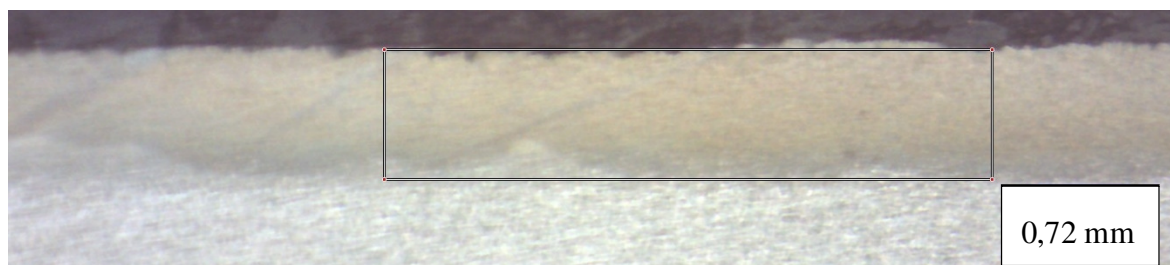
Po zalisování, vyleštění a vyleptání vzorků byly provedeny fotky makrostruktury a následné změření hloubky prokalení. Na snímcích (Obr. 50 až Obr. 62) je možné vidět vzorky s výraznou, nevýraznou a zcela chybějící zakalenou vrstvou. Obdélníkem vyznačená oblast na snímku slouží pro objektivnější měření hloubky zakalené oblasti (oproti vyznačení přímkou). Z makrostruktury vzorků 7, 8 a 9 je patrné výrazné přetavení povrchu. Naopak makrostruktura vzorku číslo 14 nevykazuje žádnou zakalenou vrstvu.



Obr. 50 Makrostruktura vzorku číslo 1, výkon 5 kW, rychlost $1,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 51 Makrostruktura vzorku číslo 2, výkon 5 kW, rychlost $1,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 52 Makrostruktura vzorku číslo 3, výkon 5 kW, rychlost $1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



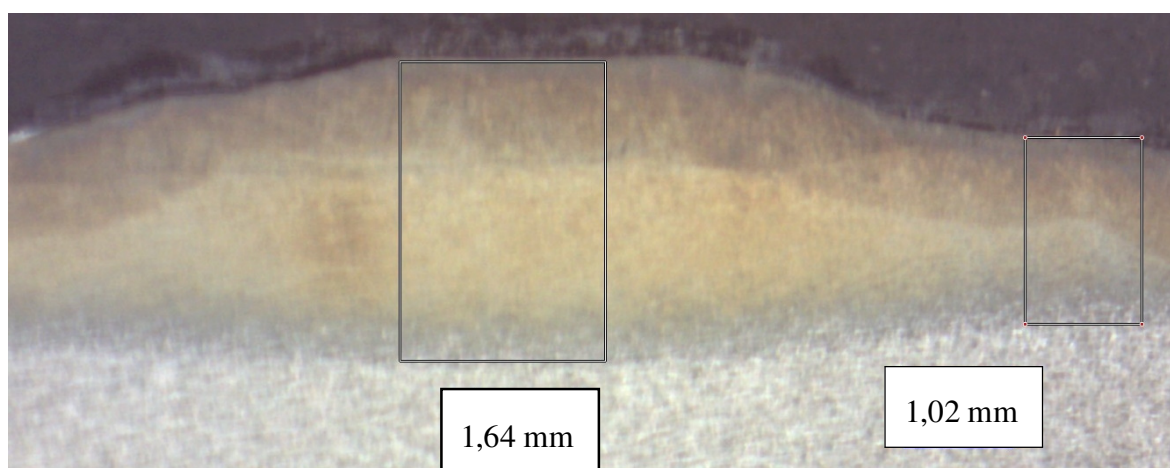
Obr. 53 Makrostruktura vzorku číslo 4, výkon 5 kW, rychlost $1,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



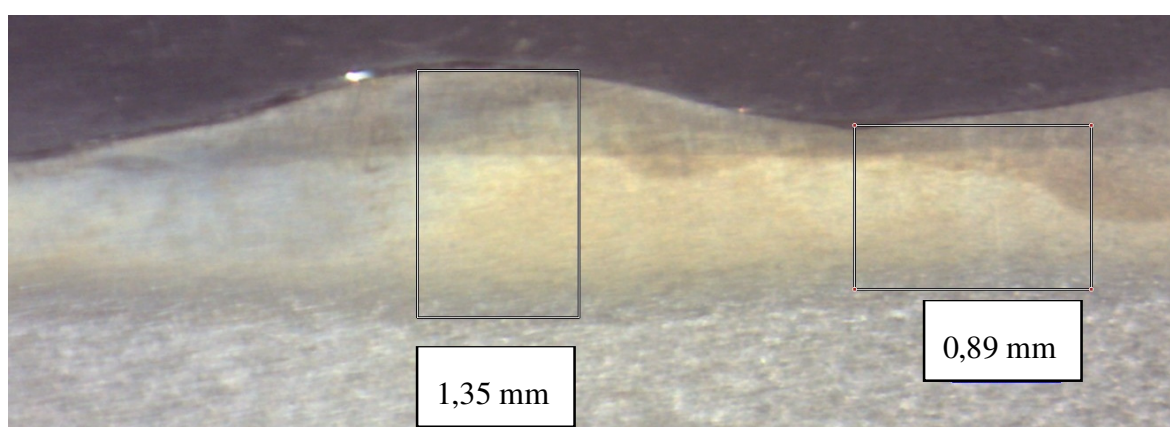
Obr. 54 Makrostruktura vzorku číslo 5, výkon 5 kW, rychlost $1,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$



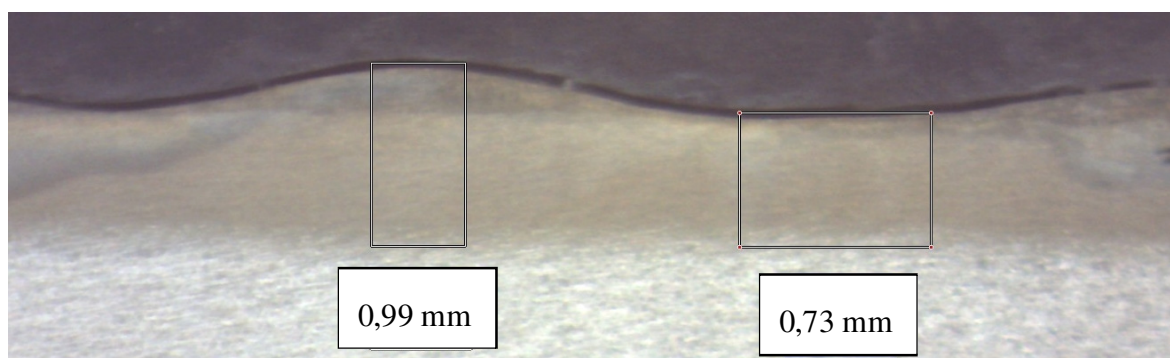
Obr. 55 Makrostruktura vzorku číslo 6, výkon 5 kW, rychlost $2,0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$



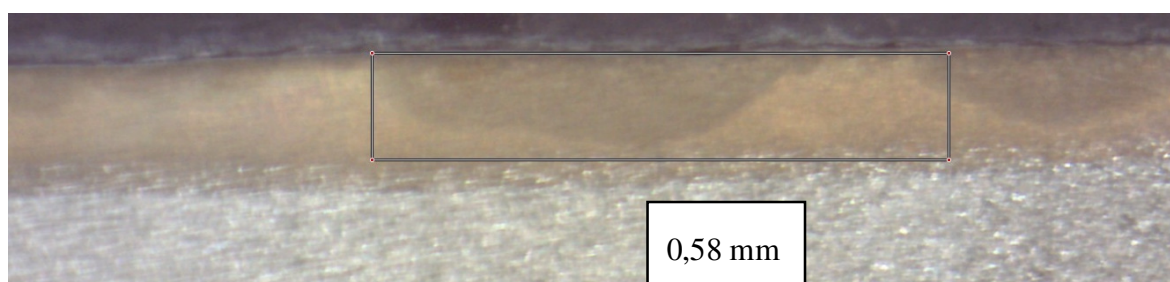
Obr. 56 Makrostruktura vzorku číslo 7, výkon 6 kW, rychlost $1,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$



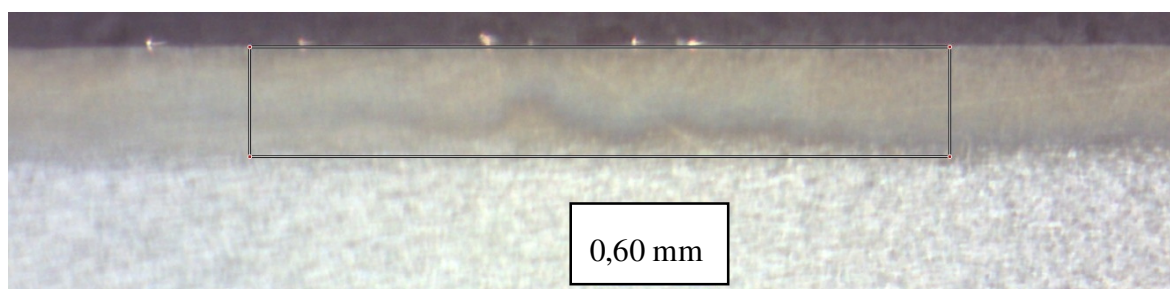
Obr. 57 Makrostruktura vzorku číslo 8, výkon 6 kW, rychlost $1,4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$



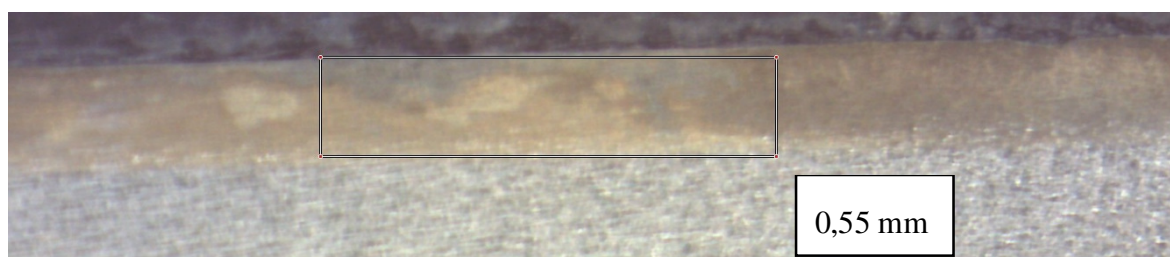
Obr. 58 Makrostruktura vzorku číslo 9, výkon 6 kW, rychlost 1,6 m·min⁻¹



Obr. 59 Makrostruktura vzorku číslo 10, výkon 6 kW, rychlost 1,8 m·min⁻¹



Obr. 60 Makrostruktura vzorku číslo 11, výkon 6 kW, rychlost 2,0 m·min⁻¹



Obr. 61 Makrostruktura vzorku číslo 12, výkon 6 kW, rychlost 2,2 m·min⁻¹



Obr. 62 Makrostruktura vzorku číslo 14, teplota 1200°C, rychlost 2,0 m·min⁻¹

Z jednotlivých snímků makrostruktury vzorků byla změřena hloubka zakalené oblasti a zanesena do tabulky, viz Tab. 15. Pro použitý výkon 5 kW je dosažená hloubka zakalené oblasti od 0,41 do 0,85 mm, zde, až na vzorek 1, nebyla povrchová vrstva přetavena. Příslušné rychlosti od 1,2 do 2,0 m·min⁻¹ vyhovují.

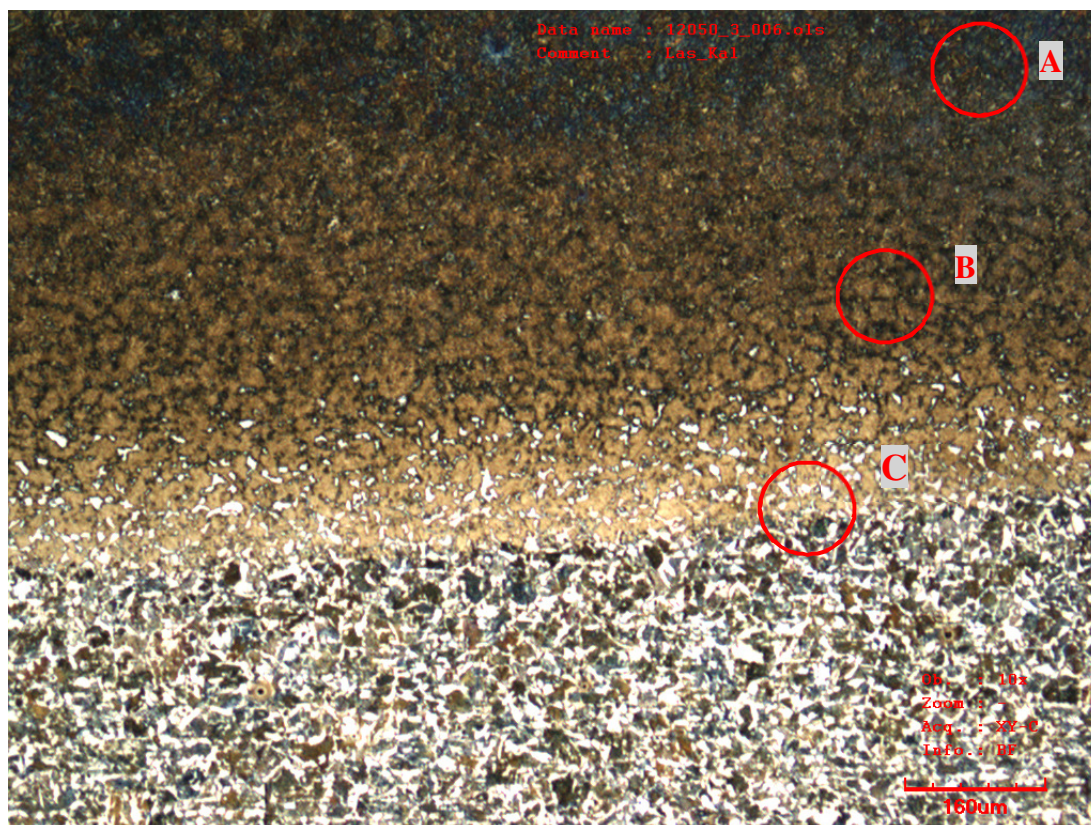
Tab. 15 Hodnoty hloubky zakalené oblasti a použité svařovací parametry

Číslo vzorku	Hloubka zakalené oblasti [mm]	Svařovací parametry	
		Výkon [kW]	Rychlost pohybu hlavy [m·min ⁻¹]
1	0,85	5	1
2	0,85	5	1,2
3	0,72	5	1,4
4	0,53	5	1,6
5	0,53	5	1,8
6	0,41	5	2
7	1,02 - 1,64	6	1,2
8	0,89 - 1,35	6	1,4
9	0,73 - 0,99	6	1,6
10	0,58	6	1,8
11	0,6	6	2
12	0,55	6	2,2
14	0	x	2

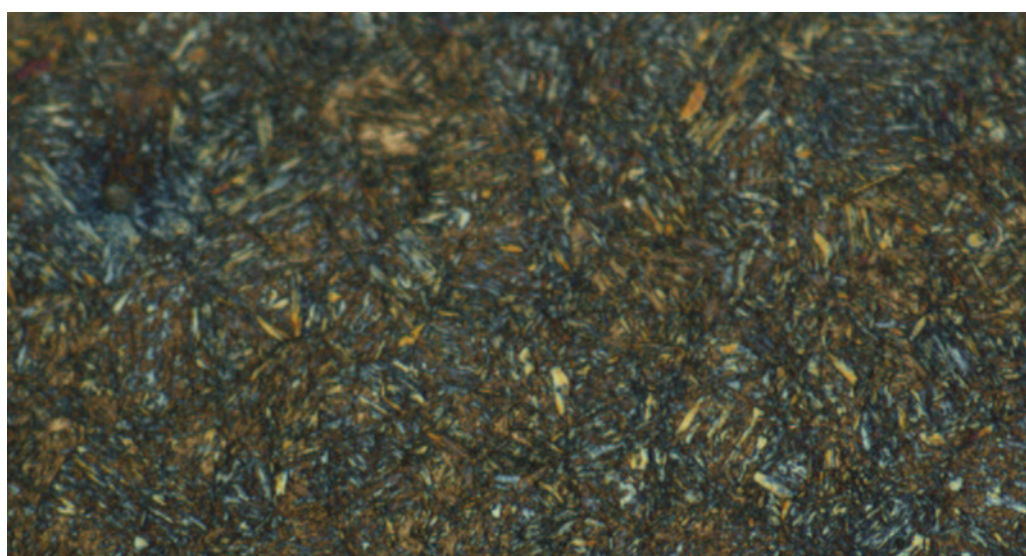
Z naměřených hodnot hloubky zakalené části by nejlépe vyhovovaly vzorky 1,2 a 3. Vzorky 7,8 a 9 dosahují sice větších hodnot zakalené oblasti, ale na makrosnímčích jsou patrné výrazné nerovnosti povrchu. Tyto nerovnosti značí přetavení materiálu, což může znamenat oduhličení povrchu a následný pokles tvrdosti v povrchové vrstvě, který by byl nežádoucí. Navíc při přetavení povrchu je nutné absolvovat dodatečný proces odstranění nerovností povrchu oproti vzorku s nepřetaveným povrchem. Toto je nevýhodné ať už z technologického tak i ekonomického aspektu výroby. V případě nepřetaveného povrchu není nutné tyto dodatečné úpravy aplikovat.

4.2 Mikrostruktura [13]

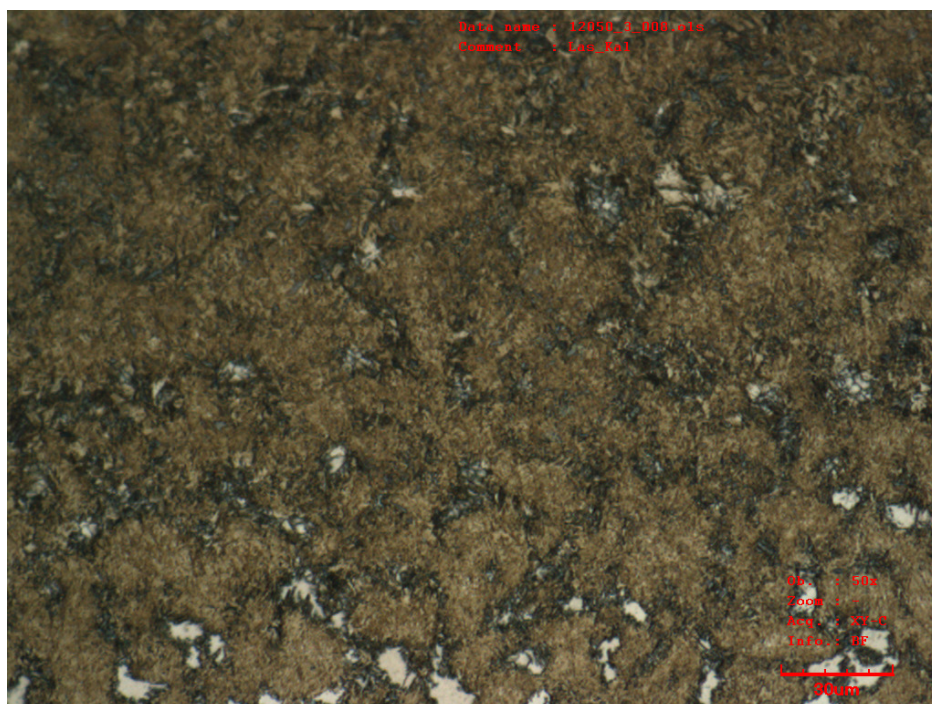
Rozbor mikrostruktury byl proveden pouze na vzorcích 3 a 9 a to nafocením na elektronovém mikroskopu při mnohonásobném zvětšení až 1200x.



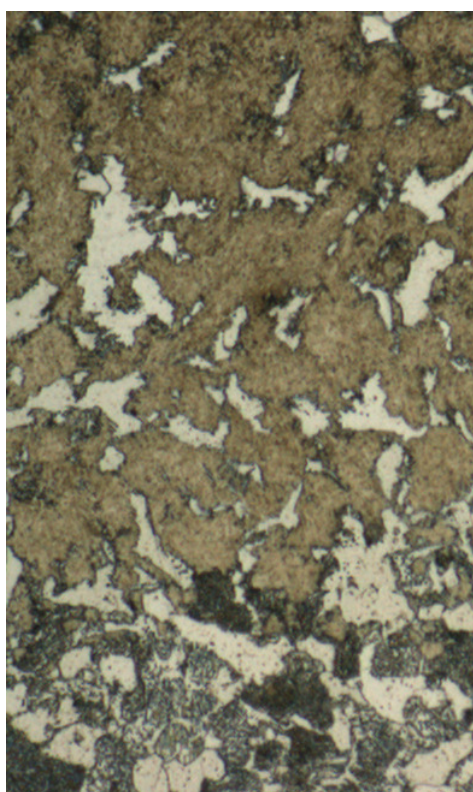
Obr. 63 Mikrostruktura vzorku číslo 3, při zvětšení 240x



Obr. 64 Detail A - Martenzit v povrchové vrstvě, zvětšení 1200x



Obr. 65 Detail B – TOO, zvětšení 1200x

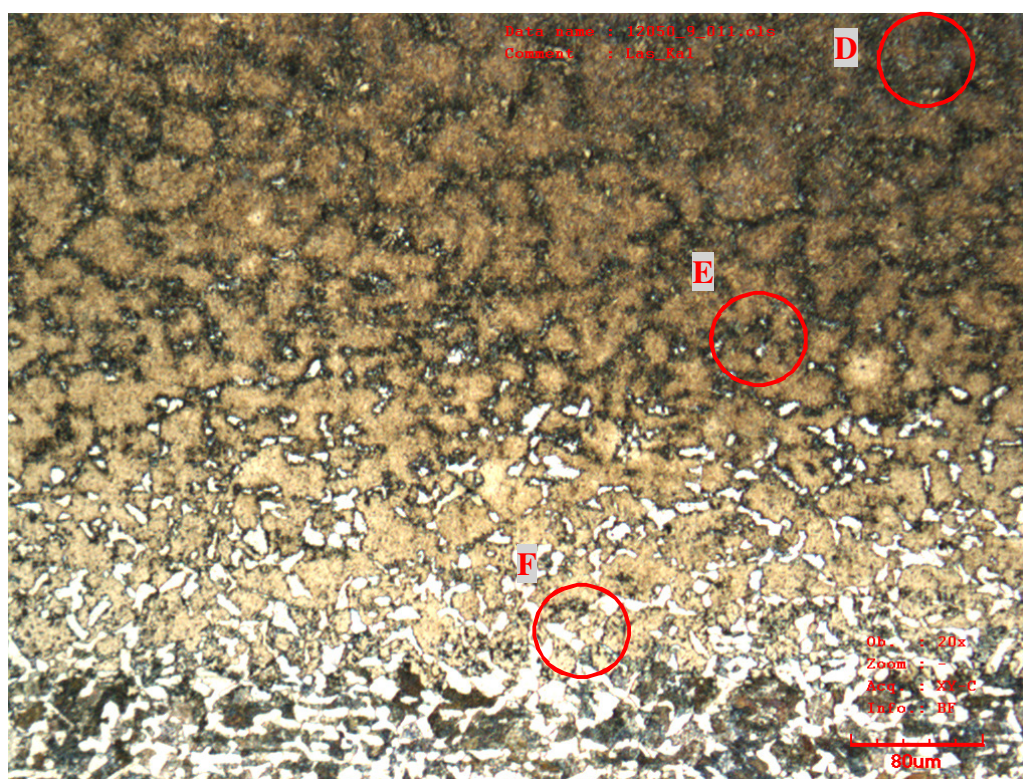


Obr. 66 Detail C - Přechod TOO
a ZM, zvětšení 1200x

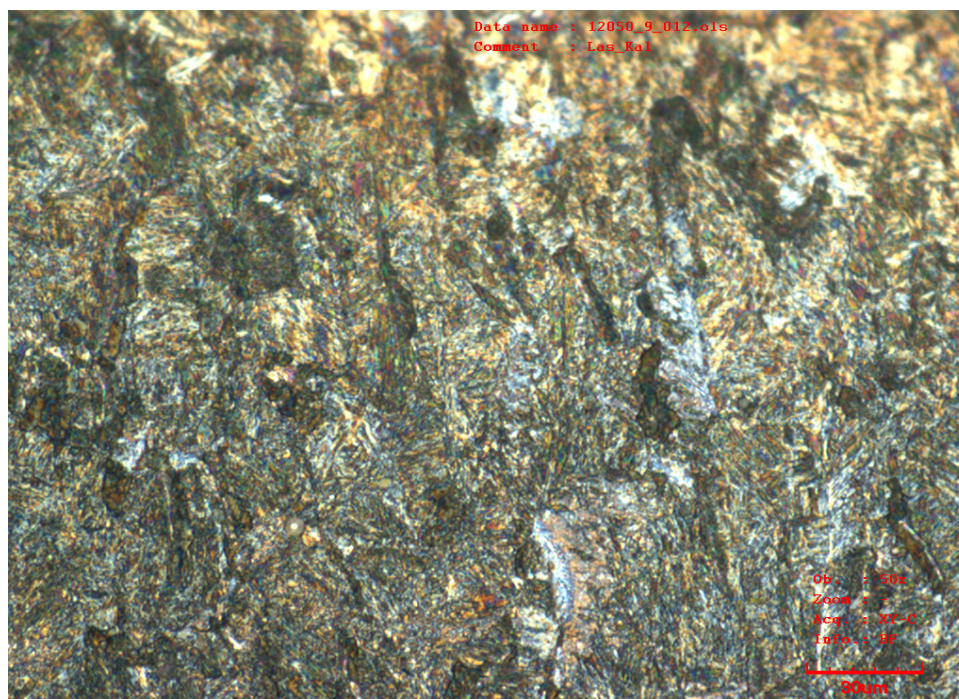
Pro vyhodnocení mikrostruktury byl vybrán vzorek číslo 3 (Obr. 63), který podle naměřené tvrdosti, viz Obr. 71, vykazoval vhodné výsledné hodnoty tvrdosti a dále nevykazoval viditelné přetavení povrchu, viz Obr. 46.

Povrchová vrstva je tvořena téměř 100 % martenzitickou strukturou, ta je charakteristická svými jemnými jehlicemi, viz Obr. 64. Tepelně ovlivněná oblast, viz Obr. 65, je tvořena bainitem, na spodní části snímku jsou viditelné zrna feritu (bílé útvary), které postupně nabývají na intenzitě směrem od povrchu a na Obr. 66 už je patrný přechod z tepelně ovlivněné oblasti do základního materiálu. Základní materiál je tvořen feriticko – perlitickou strukturou (ferit – bílé zrna, perlit – tmavé zrna).

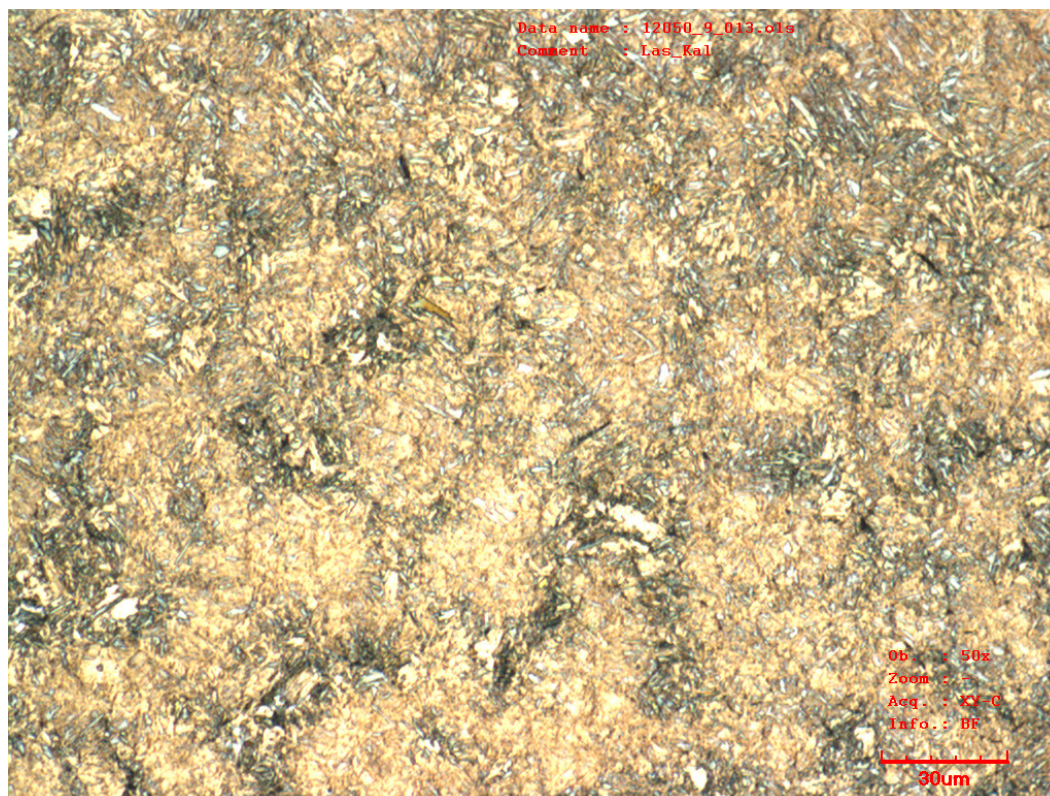
Jako druhý vzorek byl vybrán vzorek číslo 9, který podle naměřené tvrdosti vykazuje pokles tvrdosti na povrchu, viz Obr. 67.



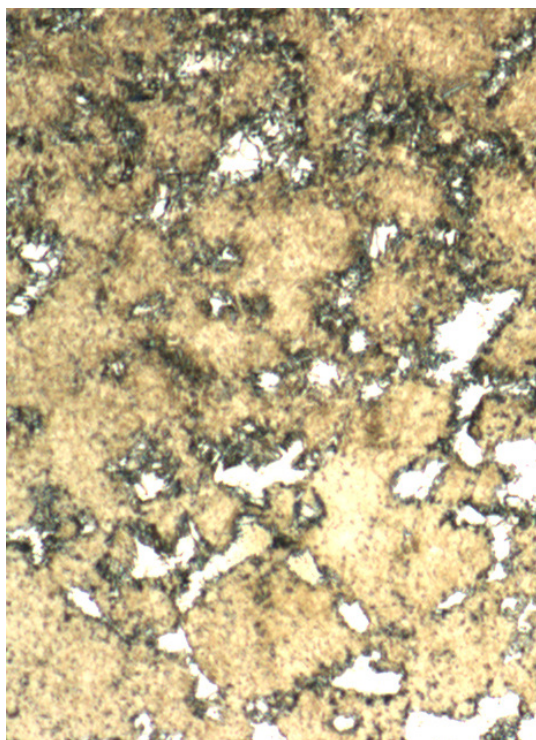
Obr. 67 Mikrostruktura vzorku číslo 9, zvětšení 480x



Obr. 68 Detail D - povrchové vrstvy, zvětšení 1200x



Obr. 69 Detail E - přechodové oblasti tavenina a TOO, zvětšení 1200x



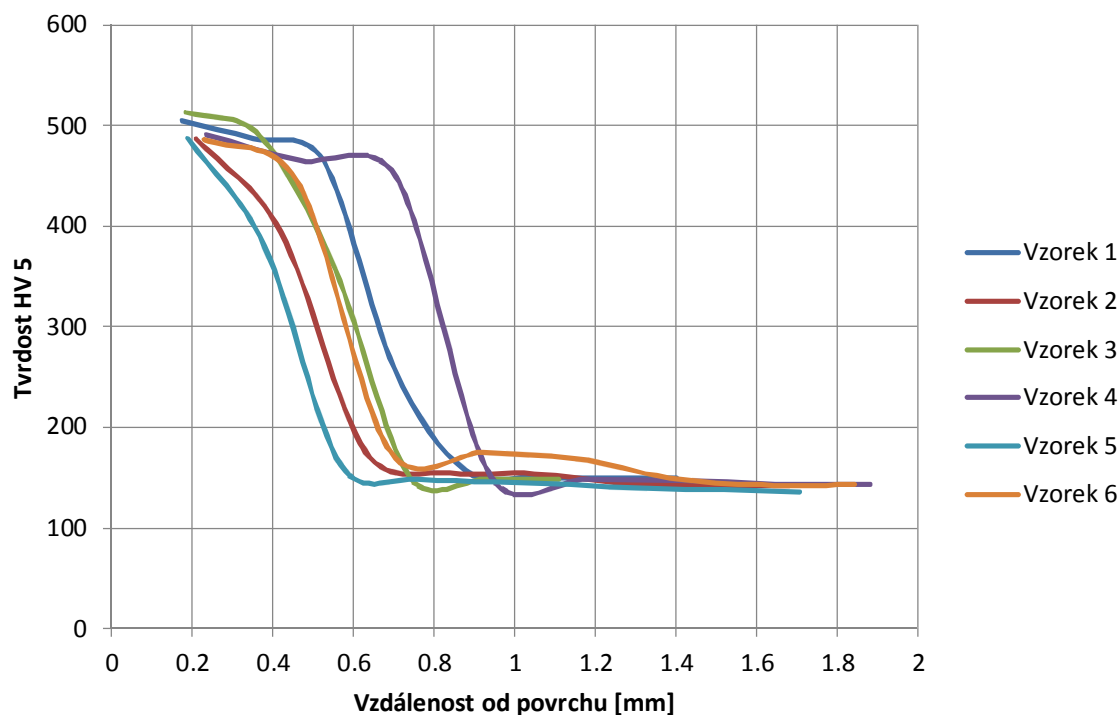
Obr. 70 Detail F - TOO, zvětšení 1200x

V povrchové části se vlivem přetavení vytvořily dendrity, tato licí struktura se tvoří z taveniny a vytváří se kolmo k povrchu, viz Obr. 68 (tmavá místa). Vytvoření těchto dendritů je důkazem přetavení povrchu. S postupným vzdalováním se od povrchu je viditelná martenzitická struktura (Obr. 69), která ovšem není ve 100 % zastoupení jako u vzorku 3, ale pouze zhruba 40 %. Toto je pravděpodobně způsobeno menší ochlazovací rychlostí. Dále je patrný vzniklý bainit a na Obr. 70 se objevují bílá místa feritu, která přechází k feriticko – perlitické struktuře základního materiálu.

Pro hodnocení mikrostruktury neexistuje v České republice ani v Evropské unii příslušná norma. Jedinou možnou normou je GOST 8233-56, což je Ruská národní norma z roku 1957, tato norma byla v roce 2004 přeložena do anglického jazyka.

4.3 Vyhodnocení tvrdosti [15], [17]

Tvrdość povrchově kalené vrstvy je zpravidla vyšší než tvrdost dosažená u stejné oceli při běžných způsobech kalení. Je to způsobeno nepřítomností zbytkového austenitu a pnutí v povrchové vrstvě.



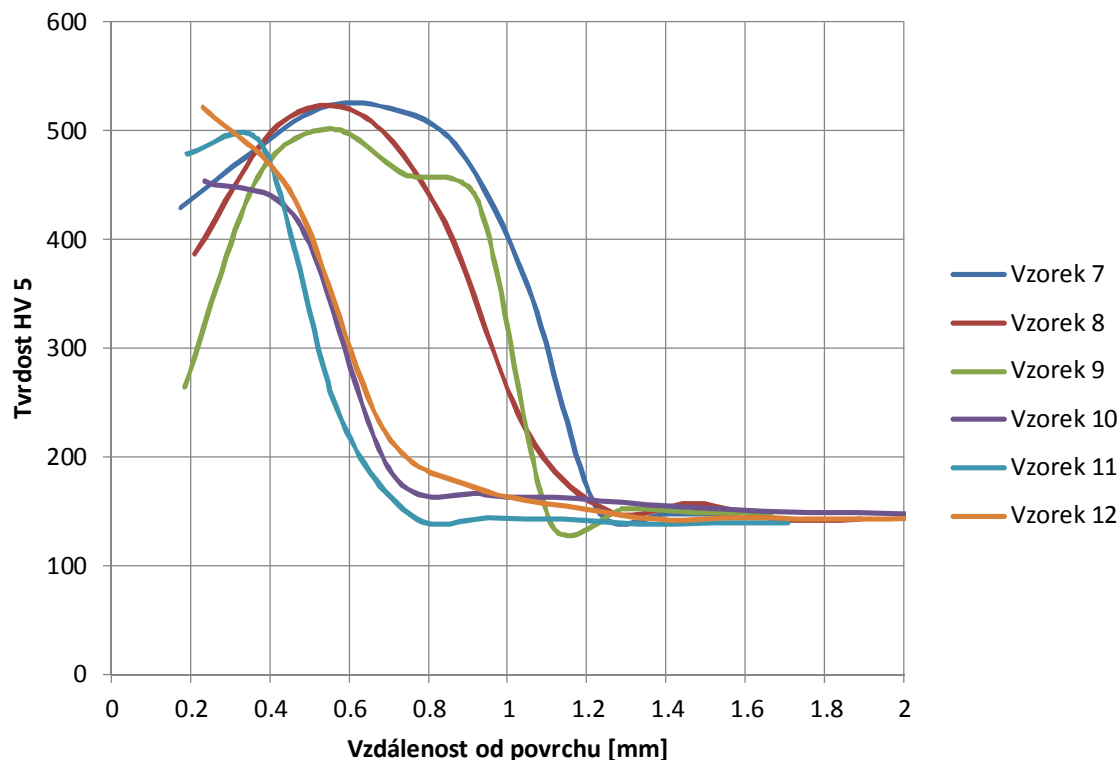
Obr. 71 Získaná tvrdost v závislosti na vzdálenosti od kaleného povrchu, pro vzorky 1 až 6

Graf, viz Obr. 71, obsahuje naměřené tvrdosti vzorků 1 až 6 v závislosti na vzdálenosti od kaleného povrchu. Dané vzorky byly kaleny při výkonu 5 kW a rychlostech od 1,0 do 2,0 m·min⁻¹. Nejvyšší tvrdosti v povrchové vrstvě dosáhl vzorek číslo 3, kalen rychlostí 1,4 m·min⁻¹, oproti tomu vzorek číslo 5 dosáhl nejnižší tvrdosti v povrchové vrstvě z daných vzorků, ale i tak dosahuje vysoké tvrdosti. Z tohoto hlediska by se dalo říct, že všechny vzorky vyhovují.

Dalším důležitým faktorem je dosažená hloubka zakalení. Největší hloubky zakalení dosáhl vzorek číslo 4, kalen rychlostí 1,6 m·min⁻¹, tento vzorek má výrazně větší dosaženou hloubku prokalení oproti zbývajícím vzorkům. Nejmenší hodnotu hloubky zakalení vykazuje vzorek číslo 5, který byl kalen rychlostí 1,8 m·min⁻¹.

Vzorek číslo 1 byl na povrchu přetaven, použitá kalící rychlost byla pravděpodobně příliš malá a došlo k přetavení povrchové vrstvy. Přetavení povrchové vrstvy se projevuje poklesem tvrdosti, ale vzorek nevykazuje dle grafu výrazné snížení tvrdosti, pouze nepatrné snížení zhruba do vzdálenosti 0,4 mm a následný mírný vzrůst. Obdobně nepatrné snížení tvrdosti vykazuje vzorek číslo 4 ve vzdálenosti 0,5 mm od povrchu.

Vzorky číslo 7 až 12 byly kaleny výkonem 6 kW a rychlostí od 1,2 do 2,2 m·min⁻¹. Křivky zanesené v grafu závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu (Obr. 72) se na rozdíl od křivek tvrdostí při výkonu 5 kW značně liší.



Obr. 72 Získaná tvrdost v závislosti na vzdálenosti od povrchu, pro vzorky 7 až 12

Tvar křivek 7,8,9 vypovídá o přetavení povrchové vrstvy a vzniku nové struktury o nižší tvrdosti. Křivky vysvětlují vzhled vzorku po provedení experimentu (Obr. 47), které jsou na povrchu přetavené. Důvodem snížení tvrdosti a přetavení povrchu je použitý vyšší výkon nebo i nízká použitá rychlost pohybu kalící hlavy. Paradoxně vzorky číslo 7,8,9 dosahují největší hloubky prokalení oproti všem ostatním vzorkům. Z hlediska největší dosažené zakalené hloubky a dosažené maximální tvrdosti by byly ideální.

Vzorek číslo 12 dosahuje z daných vzorků (7-12) největší povrchovou tvrdost, která klesá se vzdáleností od povrchu. Vzorek číslo 10 má o něco nižší hodnoty tvrdosti, ale na vzdálenosti zhruba do 0,4 mm konstantního charakteru.

Kalící rychlosti od 1,2 do 1,6 m·min⁻¹ nejsou pro výkon 6 kW zcela optimální, dosahují sice největších hodnot zakalené oblasti, ovšem přetavují povrchovou vrstvu kaleného materiálu. Pro výkon 6 kW se z grafu ukazuje jako vhodná rychlost od 1,8 do 2,2 m·min⁻¹ (vzorky 10-12).

Následující tabulka zaznamenává jednotlivé hodnoty vtisků tvrdosti podle Vickerse, viz

Tab. 16. Použitá mezera mezi jednotlivými vpichy je 0,3 mm, nicméně vpichy nebyly prováděny kolmo k povrchu ale cca pod úhlem 45°. HV 5 značí použité zatížení 50 N.

Tab. 16 Hodnoty naměřené tvrdosti

Číslo vzorku	Vtisk č. 1	Vtisk č. 2	Vtisk č. 3	Vtisk č. 4	Vtisk č. 5	Vtisk č. 6	Vtisk č. 7	Vtisk č. 8	Vtisk č. 9
1	505	487	465	259	158	151	150	150	-
2	487	394	176	155	154	145	142	142	-
3	513	489	357	151	149	149	-	-	-
4	491	465	449	151	149	147	144	143	-
5	487	380	162	149	146	143	140	138	136
6	486	445	176	175	169	150	143	143	-
7	430	479	521	521	484	357	152	148	148
8	387	505	515	416	222	150	158	143	143
9	265	458	502	460	436	139	153	149	149
10	454	417	186	166	162	155	151	149	148
11	479	487	244	146	144	143	139	140	140
12	522	438	223	172	155	143	145	143	145

Pozn. Vzorek 14 nebyl zakalen.

Zjištěné hodnoty tvrdosti lze také použít pro orientační stanovení mechanických vlastností. Pro materiál 12 050 norma uvádí minimální hodnotu meze pevnosti R_m 600 MPa. Podle konverzní tabulky pro převod tvrdosti na pevnost v tahu, hodnoty tvrdosti 510 odpovídají hodnotě meze pevnosti 1665 MPa, 500 ~ 1630 MPa, 490 ~ 1595 MPa, 480 ~ 1555 MPa.

4.4 Energetické zhodnocení [30]

Vzdálenost laserové kalící hlavy od povrchu byla během celého experimentu konstantní, 151 mm nad kaleným povrchem. Důležitým faktorem u laserového kalení je šířka kalící stopy, která byla 15 mm. Podle rovnice pro výpočet hustoty výkonu (4.1) je možné dopočítat velikost druhé (menší) strany obdélníka označovanou jako výška h . Při hypotéze, že hustota výkonu byla $10^4 \text{ W}\cdot\text{cm}^2$, což je pro laserové kalení běžné, lze orientačně určit zmiňovanou výšku h , která je ovlivněna velikostí použitého výkonu.

Rovnice pro výpočet hustoty výkonu P_H :

$$\text{—} \quad (4.1)$$

kde P – použitý výkon laseru [W]

b – šířka stopy [mm]

h – výška stopy [mm]

Výpočet vneseného tepla do kaleného předmětu je přímo závislý na výkonu laserového paprsku a nepřímo závislý na rychlosti pohybu kalící hlavy nad kaleným povrchem (4.2). Pro výpočet specifického vneseného tepla je do vzorce pro výpočet vneseného tepla ještě zahrnut koeficient absorpce. Velikost koeficientu absorpce je závislá na drsnosti povrchu,

teplotě povrchu a také na povrchové vrstvě zanechané na materiálu z výroby. Z těchto důvodů se hodnoty absorpce pohybují od 0,35 do 0,74. Hodnota koeficientu absorpce pro výpočet byla zvolena 0,7.

Rovnice pro výpočet specifického vneseného tepla Q_s :

$$Q_s = \eta \cdot \frac{P}{1000 \cdot v} \quad (4.2)$$

kde η – koeficient absorpce [-]

P – výkon laserového paprsku [W]

v – rychlost pohybu laserové kalící hlavy [mm·s⁻¹]

Tab. 17 Výsledné hodnoty specifického vneseného tepla

Číslo vzorku	Výška stopy h [mm]	Specifické vnesené teplo Q_s [kJ/mm]	Rychlost v [mm/s]
1	3,33	0,210	16,7
2	3,33	0,175	20
3	3,33	0,150	23,3
4	3,33	0,131	26,7
5	3,33	0,117	30
6	3,33	0,105	33,3
7	4	0,210	20
8	4	0,180	23,3
9	4	0,158	26,7
10	4	0,140	30
11	4	0,126	33,3
12	4	0,115	36,7

Příslušné hodnoty vypočtené z rovnic pro hustotu výkonu (4.1) a pro specifické vnesené teplo (4.2) jsou uvedeny v Tab. 17. Výška kalící stopy h je pro výkon 5 kW, použitého u vzorků 1 až 6, dopočtena jako 3,33 mm, pro výkon 6 kW, použitého u vzorků 7 až 12 kW, je dopočítaná orientační výška 4 mm. Jelikož specifické vnesené teplo je závislé na hodnotě výkonu a rychlosti pohybu kalící hlavy, jsou hodnoty specifického vneseného tepla pro nižší rychlosti větší a se zvětšující se rychlostí klesají.

5 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Laserové povrchové kalení je velice moderní metoda, která v zaseté výrobě může hodně ušetřit, lze skvěle automatizovat, ale při pořizování pracoviště se musí brát v úvahu větší investiční náklady. Hlavní položkou ve výpočtu hodinové sazby laserového kalení jsou pořizovací náklady laserového pracoviště a nedílnou součástí tvoří i provozní a mzdové náklady na pracovníka.

Hodinová sazba samotného laserového pracoviště při 1,5 směnném provozu, odpisu zařízení na 4 až 6 let, vychází kolem 1000 Kč·hod⁻¹. Provozní náklady, ve kterých je zahrnut spotřební materiál, náhradní díly, popř. i přídavné plyny, elektřina aj. činí zhruba 300 Kč·hod⁻¹. Další položkou jsou mzdové náklady na obsluhu zařízení, které zahrnují zhruba 120 Kč·hod⁻¹ mzdy pracovníka, dále jsou zahrnuty odvozy a dovolená zaměstnance, celkem mohou být mzdové náklady zhruba 300 Kč·hod⁻¹.

Celková hodinová sazba pro laserové kalení je tedy zhruba 1600 Kč·hod⁻¹. Orientační cenové kalkulace jsou v Tab. 18. V kalkulaci není započítán rozdíl provozních nákladů u různého kalícího výkonu laseru, neboť v porovnání s pořizovacími náklady, které jsou pro oba kalící výkony srovnatelné, je zanedbatelný.

Tab. 18 Orientační cenová kalkulace

Číslo vzorku	Rychlost v [m·min ⁻¹]	Orientační cenová kalkulace [Kč/m]	Zakalená hloubka určena z makrostruktury [mm]
1	1	26,7	0,85
2	1,2	22,2	0,85
3	1,4	19,0	0,72
4	1,6	16,7	0,53
5	1,8	14,8	0,53
6	2	13,3	0,41
7	1,2	22,2	1,02
8	1,4	19,0	0,89
9	1,6	16,7	0,73
10	1,8	14,8	0,58
11	2	13,3	0,6
12	2,2	12,1	0,55

Při režimu použitého u vzorku číslo 2, tedy rychlost pohybu kalící hlavy 1,2 m·min⁻¹ a výkonu 5 kW, by 1 metr zakalené stopy stál zhruba 22 Kč, při dosažení zakalené hloubky 0,85 mm. Při použití rychlosti 2,0 m·min⁻¹, výkonu 5 kW, jako je tomu u vzorku 6, by se cena snížila na zhruba 13 Kč za zakalený metr, ale hloubka zakalené oblasti by nebyla 0,85 mm, nýbrž poloviční. V rámci nižší provozní ceny by bylo výhodnější při výkonu 5 kW kalit rychlostí 1,8 m·min⁻¹ místo 1,6 m·min⁻¹ neboť se dosahuje stejného výsledku.

Průmyslové aplikace, které nevyžadují větší hloubku zakalení než 0,6 mm, by bylo ekonomicky nejvýhodnější kalit rychlostí 2,2 m·min⁻¹, tedy největší rychlostí, při výkonu 6 kW, neboť je zde nejnižší provozní cena a povrch není přetaven. Vzorky 7, 8, 9 paradoxně dosahují největších hloubek zakalení, avšak povrchová vrstva není rovinná, povrch by vyžadoval další opracování a tudíž další náklady.

6 ZÁVĚR

Hlavním tématem této diplomové práce bylo seznámení se s moderními a progresivními možnostmi povrchového kalení laserem. Odborná studie popisuje konkrétní problematiku metody zpracování povrchu pomocí laseru za specifických podmínek a následné mechanické a metalografické vyhodnocení zakalené vrstvy vysoce uhlíkaté oceli s 0,5 % obsahu uhlíku. Povrchové kalení za pomoci laseru je moderní metoda tepelného zpracování materiálu, mezi jejíž hlavní výhody patří minimální pnutí a nepřítomnost trhlin v zakalené oblasti dále pak možnost nastavení kalících parametrů a zakalení jen určité oblasti. Touto metodou lze kalit i součásti, které jinou metodou tepelného zpracování kalit nejdou např. z důvodu vzniku následných trhlin.

Na laserovém pracovišti ve firmě Fermat bylo provedeno 13 vzorků povrchového kalení na diodovém laseru. Kalící hlava byla u všech vzorků ve stejné vzdálenosti nad kaleným povrchem, měnily se pouze parametry rychlosti pohybu kalící hlavy a výkonu laseru. U vzorků byla naměřena tvrdost v závislosti na hloubce od kaleného povrchu a byly pořízeny snímky makrostruktury a mikrostruktury.

Již při vizuální kontrole bylo patrné přetavení povrchu u vzorků 1, 7, 8, 9 a 10, toto přetavení je způsobeno malou rychlostí pohybu kalící hlavy, při kterém bylo předáno větší množství tepla, než bylo optimální a dochází k odpevňování povrchu. Nicméně vzorek číslo 7 dosahuje největší hloubky zakalení i s mírným odpevněním povrchu. Použití konstantní kalící teploty 1200°C se neukázalo jako vhodné, neboť nebyla nalezena žádná zakalená vrstva.

Pro praxi by se dalo doporučit kalení pomocí parametrů použitých u vzorku 2 až 6. Hodnoty dosažené tvrdosti v závislosti na hloubce od povrchu se neliší nějak výrazně, povrch není přetaven a podle potřebné hloubky zakalení by se dalo použít určité dané rychlosti. Pro aplikace nevyžadující velkou hloubku zakalení by bylo optimální použít rychlost 2,0 m·min⁻¹ a výkon 5 kW, jako je použito u vzorku 6, kde se dosahuje zakalení 0,41 mm. Pro aplikace s požadavkem na větší hloubku zakalení by se daly doporučit parametry použité u vzorků 2 a 4, tedy rychlost 1,2 a 1,6 m·min⁻¹ při výkonu 5 kW, kde se dosahuje kolem 0,8 mm zakalené oblasti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [5]

- [1] BAZALOVÁ, Lucie. *Porovnání vlastností pevnolátkových laserů*. Brno, 2012. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?action=detail&zp_id=47215&fid=4&rok=2011&typ=1&jazyk=cs&text=laser&hl_klic_slova=1&hl_abstrakt=0&hl_nazev=0&hl_autor=0&str=1. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
- [2] BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
- [3] BOTHE, Otakar. *Strojírenská technologie I*. 5. vyd. Praha: Technické literatury, 1989, s. 150-152.
- [4] BULLING, Dieter. *Tribotechnika: Laserové kalení proces s velkým potenciálem*. In: *Tribotechnika: Laserové kalení proces s velkým potenciálem* [online]. 2012. vyd. 2012 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22012/laserove-kaleni-proces-s-velkym-potencialem.html>
- [5] Citace.com. 2014. Dostupné z: www.citace.com
- [6] ČSN EN 10083-2. *Česká technická norma: Oceli k zušlechťování*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [7] DAĐOUREK, Karel. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Povrchové kalení: Teorie tepelného zpracování*
- [8] Direct Industry: II-VI Infrared. *Direct Industry: II-VI Infrared* [online]. 2014 [cit. 2014-04-06]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/>
- [9] ENGST, Pavel a Milan HORÁK. *Aplikace laserů: Populární přednášky o fyzice*. 1989. vyd. Praha: SNTL, 1989.
- [10] Fabricating and Metalworking: Tips for Successful Laser Marking in Job Shops. *FABRICATING AND METALWORKING. Fabricating and Metalworking* [online]. 2012 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2012/09/tips-for-successful-laser-marking-in-job-shops/>
- [11] Fanuc: M-710iC. FANUC. *Fanuc Robotics: Robotics* [online]. Litho in U.S.A., 2007 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: www.fanucrobotics.com
- [12] FÜRbacher, Ivan, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity*. Praha: Dashöfer, 2001. ISBN 80-86229-02-5.
- [13] GOST 8233-56. *Interstate standard: Steel microstructure standards*. Moskva: Standards Publishing House, 2004.
- [14] HADYNA, Daniel. *Laserové svařování: Základní informace o technologii laserového svařování/řezání*. HADYNA-INTERNATIONAL. Svět svaru [online]. 2011. vyd. Ostrava, 2011 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2011-3_Laser.pdf

- [15] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1969. ISBN DT 621.78:669.14.
- [16] KACHTÍK, Lukáš. *Laser a vše o něm* [online]. [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/>
- [17] *Konverzní tabulka pevnosti v tahu. Měření tvrdosti* [online]. 2013 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.merenitvrdosti.cz/konverzni-tabulka-pevnosti-v-tahu.html>
- [18] KOŘÁN, Pavel. *Lao: Lasery a optika*. Lao [online]. 2011 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://old.lao.cz/aktualne/clanky-a-zpravy/serial-o-laserech.htm>
- [19] Lao Lasery a optika: *Robotické systémy pro kalení*. LAO. Lao Lasery a optika [online]. 2014 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/laserove-roboticke-systemy--691k/roboticke-systemy-pro-kaleni-414p>
- [20] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. In: *Laserové technologie v praxi* [online]. 2010 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser-prez.pdf
- [21] LAPŠANSKÁ, Hana. UNIVERZITA PALACKÉHO V OSTRAVĚ. *Laserové technologie v praxi*. 2010. vyd. 2010, 17 s. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [22] Laser Therm: *Laserové kalení*. Laser Therm: Lasery pro průmyslové technologie [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-kaleni/>
- [23] Laserline. LASERLINE. *Laserline* [online]. 2014 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: www.laserline.de
- [24] LASERTECHNIK: *Laser systems for material processing*. Acsys [online]. 2009 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: www.acsys.de
- [25] LaserTherm: *Laserové navařování*. LaserTherm [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: www.lasertherm.cz
- [26] Lasery a Optika. *Lasery a Optika* [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: www.lao.cz
- [27] LUDVÍK, Jan, Karel BÍLEK a Štěpán LUDVÍK. *Zkoušky tvrdosti: Metrotest s.r.o.* 4. vyd. 2010, 22 s. Dostupné z: <http://www.metrotest.cz/o-mereni-tvrdosti.html>
- [28] *Měření tvrdosti: Tvrdost*. 2011. Dostupné z: <http://www.merenitvrdosti.cz/tvrdost.html>
- [29] MM Průmyslové spektrum: *Ochrana činných ploch nástroje laserem*. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. MM Průmyslové spektrum: Ochrana činných ploch nástroje laserem [online]. 2013 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/ochrana-cinnych-ploch-nastroje-laserem.html>
- [30] MRŇA, Libor. *Speciální technologie svařování*. In: *Vysoké učení technické v Brně: Fakulta strojního inženýrství* [online]. 2013 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/>

- [31] MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky*. 2013, 22 s. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>
- [32] Nauka o materiálu: 3. *STRUKTURA A VLASTNOSTI MATERIÁLU A JEJICH ZKOUŠENÍ*. In: JANOVEC, Jiří a Jiří CEJP. *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ - Fakulta strojní: Ústav materiálového inženýrství* [online]. 2013 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://umi.fs.cvut.cz/cs/studium/>
- [33] NĚMEČEK, Stanislav a T. MUŽÍK. *Základní rozdělení výkonových laserů*. 2010. Dostupné z: <http://www.matexpm.com/cz>
- [34] NĚMEČEK, Stanislav a Tomáš MUŽÍK. *TriboTechnika: Laserem nanesené vrstvy*. In: Matex PM [online]. 2011 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: www.matexpm.com/cz/.../5-tribotechnika?...laserem-nanesene-vrstvy
- [35] NĚMEČEK, Stanislav. MATEX PM. *Materiálová podstata kalení povrchu laserovým paprskem*. 2008, 13 s.
- [36] NĚMEČEK, Stanislav. *TriboTechnika: Zvyšování životnosti povrchů laserovým kalením*. In: MatexPM [online]. 2011. vyd. Plzeň, 2011 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22011/zvysovani-zivotnosti-povrchu-laserovym-kalenim.html>
- [37] NĚMEČEK, Stanislav. *Využití laseru v průmyslu: Materiálová podstata kalení laserovým paprskem*. Plzeň: Tribun EU s. r. o., 2013, s. 4-7. ISBN 978-80-263-0359-6.
- [38] NOVÁK, Miroslav a Jakub RYBA. *Seriál na téma lasery: Základní princip laseru a jejich dělení*. L. LAO: Lasery a optika [online]. 15.3.2011. Praha, 2011, 19. 02. 2013 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>;
- [39] NOVÁK, Miroslav. *Lasery a optika: Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu*. RYBA, Jakub. LAO. Lasery a optika: Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu [online]. 15.3.2011. 2011 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [40] *Pájení laserem - technologie budoucnosti*. CZECHDESIGN.CZ. Czechdesign.cz [online]. 2003 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: www.czechdesign.cz
- [41] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 1. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.
- [42] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [43] Robots: fanuc_m710ic-50. *Robots* [online]. 2012 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: www.robots.com
- [44] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *MM Průmyslové spektrum: Nekonenční metody obrábění – 5. díl*. [online]. 2008 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-5-dil.html>

- [45] Skola.spectator.cz: *Nauka o materialu*. In: Skola.spectator.cz: 2_SEMESTR [online]. 2014 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://skola.spectator.cz/2_SEMESTR/Nauka%20o%20materialu/diagram_elezo_uhl_k.ppt
- [46] Struers: Ensuring Certainty. STRUERS. *Struers: Ensuring Certainty* [online]. 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: www.struers.com
- [47] Svařování metodou 311 - plamenem. Svarinfo.cz: *Magazín praktického svařování* [online]. 2007 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: www.svarbazar.cz
- [48] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Průmyslové lasery pro svařování*. In: Portál moderní fyziky [online]. 20 - -
- [49] ŠTĚPÁN, Karel. MATEX PM PLZEŇ. *Laserové navařování povrchů: Vlastnosti, výhody, nevýhody, aplikace, přídavné materiály, srovnání s ostatními metodami*. 2009.
- [50] ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace*. In: Plslaser [online]. 2002. vyd. 2002 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf;
- [51] ŠULC, Jan. *Průmyslové aplikace laserových systémů*. In: ŠULC, Jan. PLS Laser Systems [online]. 2004 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf
- [52] TRUMPF Česká Republika: *Laserová technika*. TRUMPF [online]. 2014 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: www.cz.trumpf.com/cs
- [53] VSCHT: *Tepelné zpracování oceli - teorie*. In: VSCHT: Tepelné zpracování oceli - teorie [online]. 2014 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_oceli/teorie2.htm

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D		Trojrozměrný
DPSS		Diode Pumped Solid State
HBS		Označení tvrdosti dle Brinella
HBW		Označení tvrdosti dle Brinella
HK		Označení tvrdosti dle Knoop
HRA		Označení tvrdosti dle Rockwella
HRB		Označení tvrdosti dle Rockwella
HRC		Označení tvrdosti dle Rockwella
HV		Označení tvrdosti dle Vickerse
LPSS		Lamp Pumped Solid State
TEM		Transverzální elektromagnetický mód
$A(T)$	[-]	Koeficient absorpce
A_5	[%]	Tažnost
b	[mm]	Šířka stopy
D	[mm]	Průměr kuličky
d	[mm]	Průměr vtisku / aritmetický průměr dvou délek uhlopříček / délka delší uhlopříčky
E	[eV]	Energetický rozdíl mezi hladinami
F	[N]	Zkušební síla
h	[mm]	Hloubka průniku střídavého magnetického pole
h	[eV·s]	Planckova konstanta
h	[mm]	Výška stopy
K	[-]	Kvalita laserového svazku
P	[W]	Výkon laserového paprsku
P_H	[W·cm ²]	Hustota výkonu
Q_s	[kJ/mm]	Specifické vnesené teplo
R	[-]	Koeficient odrazu
$R(T)$	[Ω]	Elektrický odpor materiálu při teplotě T
R_c	[MPa]	Mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
ν	[Hz]	Frekvence dopadajícího záření / vyzářeného fotonu

ν	[mm·s ⁻¹]	Rychlost pohybu laserové kalící hlavy
ε	[-]	Dielektrická permeabilita
η	[-]	Koeficient absorpce
λ	[m]	Vlnová délka laserového paprsku
μ	[-]	Relativní magnetická permeabilita kovu
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ	[Ω ·m]	Specifický elektrický odpor
σ	[S]	Elektrická vodivost materiálu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Kalení ozubení laserovým paprskem [19]	10
Obr. 2 ARA diagram pro podeutektoidní oceli s vyznačením kritické rychlosti [53]	11
Obr. 3 Schéma vzhledu a) redukčního, b) neutrálního, c) oxidačního plamene [47]	12
Obr. 4 Schéma indukčního kalení [7]	14
Obr. 5: Schéma povrchového kalení [4]	14
Obr. 6: Vyznačené kalící oblasti v Fe-Fe ₃ C diagramu [35],[45]	15
Obr. 7 Transmisivní beam integrátor [8]	16
Obr. 8 Reflexní beam integrátor [8]	17
Obr. 9 Možné tvary profilu laserového paprsku pro povrchové kalení [23]	17
Obr. 10 Závislost absorpce na vlnových délkách [10]	19
Obr. 11 Závislost absorpce na teplotě materiálu [2]	19
Obr. 12: Procentuální podíl základních laserových aplikací v průmyslu [2]	20
Obr. 13 Stimulovaná emise [18]	21
Obr. 14: Základní schéma laseru – rezonátor [18]	22
Obr. 15 Transverzální elektromagnetické módy [2]	22
Obr. 16: Schéma pevnolátkového Nd: YAG laseru [18]	23
Obr. 17: Boční buzení Nd: YAG laseru [18]	23
Obr. 18 Zadní buzení Nd: YAG laseru [18]	24
Obr. 19 Schéma diskového laseru [1]	24
Obr. 20 Schéma vláknového laseru [48]	25
Obr. 21 Schéma příčného proudění CO ₂ laseru [48]	26
Obr. 22 Schéma podélného proudění CO ₂ laseru [48]	27
Obr. 23 Princip SLAB laseru [18]	27
Obr. 24 Laserová dioda – schéma [48]	28
Obr. 25 Princip modifikace paprsku [23]	28
Obr. 26 Laserové řezání [14]	29
Obr. 27 Metody laserového svařování [20]	30
Obr. 28 Laserové navařování [25]	30
Obr. 29 Laserové pájení [52]	31
Obr. 30 Příklady texturování [24]	31
Obr. 31 Úprava povrchu vysoce namáhaných tvářecích nástrojů [29]	31
Obr. 32 Značení pomocí rozmítaného svazku [44]	32
Obr. 33 Laserové vrtání [26]	32
Obr. 34 Měření tvrdosti podle Brinella [28]	33
Obr. 35 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [28]	34
Obr. 36 Metoda měření tvrdosti podle Rockwella [28]	35
Obr. 37 Metoda Knoop [28]	36
Obr. 38 Ocel 12 050 vyznačená v Fe – Fe ₃ C diagramu [45]	37
Obr. 39 Laserové pracoviště	39
Obr. 40 Průmyslový robot Fanuc [11]	40
Obr. 41 Laserový zdroj Laserline [23]	40
Obr. 42 Kalící hlava	41
Obr. 43 Tvrdoměr Zwick na Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně	41
Obr. 44 Elektrohydraulický lis Struers [46]	42
Obr. 45 Metalografická leštička [46]	42
Obr. 46 Vzorky 1 až 6 po povrchovém kalení	43
Obr. 47 Vzorky 7 až 14 po povrchovém kalení	43

Obr. 48 Rozřezané vzorky	44
Obr. 49 Zalisované vzorky	44
Obr. 50 Makrostruktura vzorku číslo 1, výkon 5 kW, rychlost 1,0 m·min ⁻¹	45
Obr. 51 Makrostruktura vzorku číslo 2, výkon 5 kW, rychlost 1,2 m·min ⁻¹	45
Obr. 52 Makrostruktura vzorku číslo 3, výkon 5 kW, rychlost 1,4 m·min ⁻¹	45
Obr. 53 Makrostruktura vzorku číslo 4, výkon 5 kW, rychlost 1,6 m·min ⁻¹	45
Obr. 54 Makrostruktura vzorku číslo 5, výkon 5 kW, rychlost 1,8 m·min ⁻¹	46
Obr. 55 Makrostruktura vzorku číslo 6, výkon 5 kW, rychlost 2,0 m·min ⁻¹	46
Obr. 56 Makrostruktura vzorku číslo 7, výkon 6 kW, rychlost 1,2 m·min ⁻¹	46
Obr. 57 Makrostruktura vzorku číslo 8, výkon 6 kW, rychlost 1,4 m·min ⁻¹	46
Obr. 58 Makrostruktura vzorku číslo 9, výkon 6 kW, rychlost 1,6 m·min ⁻¹	47
Obr. 59 Makrostruktura vzorku číslo 10, výkon 6 kW, rychlost 1,8 m·min ⁻¹	47
Obr. 60 Makrostruktura vzorku číslo 11, výkon 6 kW, rychlost 2,0 m·min ⁻¹	47
Obr. 61 Makrostruktura vzorku číslo 12, výkon 6 kW, rychlost 2,2 m·min ⁻¹	47
Obr. 62 Makrostruktura vzorku číslo 14, teplota 1200°C, rychlost 2,0 m·min ⁻¹	47
Obr. 63 Mikrostruktura vzorku číslo 3, při zvětšení 240x	49
Obr. 64 Detail A - Martenzit v povrchové vrstvě, zvětšení 1200x	49
Obr. 65 Detail B – TOO, zvětšení 1200x	50
Obr. 66 Detail C - Přejchod TOO a ZM, zvětšení 1200x	50
Obr. 67 Mikrostruktura vzorku číslo 9, zvětšení 480x	51
Obr. 68 Detail D - povrchové vrstvy, zvětšení 1200x	51
Obr. 69 Detail E - přechodové oblasti tavenina a TOO, zvětšení 1200x	52
Obr. 70 Detail F - TOO, zvětšení 1200x	52
Obr. 71 Získaná tvrdost v závislosti na vzdálenosti od kaleného povrchu, pro vzorky 1 až 6	53
Obr. 72 Získaná tvrdost v závislosti na vzdálenosti od povrchu, pro vzorky 7 až 12	54

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Doporučené frekvence pro indukční povrchové kalení ocelí [7]	13
Tab. 2 Vliv zpracování povrchu na koeficient absorpce pro ocel [2], [10]	18
Tab. 3 Přehled vlastností typů CO ₂ laserů [18], [48]	27
Tab. 4 Zápis tvrdosti podle Brinella [27]	33
Tab. 5 Zápis hodnoty tvrdosti podle Vickerse [27]	34
Tab. 6 Oblasti zkušebního zatížení [27]	34
Tab. 7 Základní přehled zkoušky tvrdosti podle Rockwella [27]	35
Tab. 8 Zápis tvrdosti podle Rockwella [27]	35
Tab. 9 Označení materiálu [6]	38
Tab. 10 Chemické složení oceli 12 050 ČSN [12]	38
Tab. 11 Základní mechanické vlastnosti [12]	38
Tab. 12 Technické parametry použitého laserového zdroje [23]	39
Tab. 13 Technické parametry průmyslového robota [11]	40
Tab. 14 Svařovací parametry použité při experimentu	44
Tab. 15 Hodnoty hloubky zakalené oblasti a použité svařovací parametry	48
Tab. 16 Hodnoty naměřené tvrdosti	55
Tab. 17 Výsledné hodnoty specifického vneseného tepla	56
Tab. 18 Orientační cenová kalkulace	57

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Laserová hlava [23]	69
-------------------------------------	----

PŘÍLOHA 1 LASEROVÁ HLAVA [23]

