



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 LITINY VÝKONOVÝM POLOVODIČOVÝM LASEREM

SURFACE HARDENING OF CAST IRON BY HIGH POWER DIODE LASER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL BEZDĚK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Pavel Bezděk

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 litiny výkonovým polovodičovým laserem**

v anglickém jazyce:

### **Surface hardening of cast iron 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 litiny typu GG30. 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.: Laserové technologie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
- 2.TURŇA, M., Špeciálne metódy zvarovania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9.
- 3.KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3.
- 4.KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

BEZDĚK Pavel: Povrchové kalení litiny výkonovým polovodičovým laserem.

---

Diplomová práce se zabývá technologií povrchového kalení laserem. K tomuto účelu je používán výkonový polovodičový laser. Povrchové kalení je provedeno na litině ČSN 42 2430, za různých rychlostí laserové hlavy a výkonu laseru. V úvodu teoretické části je pojednáváno o možných způsobech kalení se zaměřením na výhody kalení laserem. Dále jsou zmíněny základní části laseru, typy průmyslových laserů a jejich použití v průmyslu. V poslední části je uveden použitý materiál a metody na vyhodnocení vzorků. V experimentální části jsou popsány použité zařízení a provedeno vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury a vyhodnocení tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu.

Klíčová slova: povrchové kalení, litina, polovodičový laser, makrostruktura, mikrostruktura.

## **ABSTRACT**

BEZDEK Pavel: Surface hardening of cast iron by high power diode laser

---

The Master's thesis deals with the technology of surface hardening by laser. High power diode laser is used for this purpose. Surface hardening is performed on cast iron BS 1452-77, at different speeds laser head and laser power. In introduction, the theoretical part deals with possible ways of hardening focusing on the benefits of laser hardening. There are mentioned basic parts of laser, type industrial lasers and their application in industry. The final part is mentions the using of material and methods used to evaluate samples. The practical part describes the using devices and carries out evaluation macrostructure and microstructure and evaluation of hardness depending on the distance from the surface.

Keywords: surface hardening, iron cast, diode laser, macrostructure, microstructure.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BEZDĚK, Pavel. *Povrchové kalení litiny výkonovým polovodičovým laserem*. Brno, 2015. 52s, 3 přílohy, 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.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Povrchové kalení litiny výkonovým polovodičovým laserem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 29.5.2015

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

Dále děkuji společnosti FERMAT za možnost provedení experimentu, panu Vojtěchovi Říháčkovi za pomoc při měření tvrdosti a doc. Ing. Janovi Vítovi, Ph.D. za pomoc s vyhodnocením mikrostruktury vzorků. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu a motivaci během studia.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Úvod .....	11
1 Kalení .....	12
1.1 Povrchové kalení .....	13
1.2 Povrchové kalení plamenem .....	14
1.3 Indukční povrchové kalení .....	14
1.4 Povrchové kalení laserem.....	15
1.4.1 Vliv laserového paprsku na materiál .....	17
2 Typy průmyslových laserů .....	19
2.1 CO <sub>2</sub> lasery .....	21
2.2 Nd: YAG lasery.....	22
2.3 Vláknové lasery.....	23
2.4 Diskové lasery .....	24
2.5 Polovodičové (diodové) lasery .....	25
2.6 Typické aplikace využití laseru v průmyslu.....	26
3 Kalený materiál .....	29
3.1 Zkoušky tvrdosti.....	29
3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella .....	30
3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	30
3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	31
3.1.4 Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse a Knoopu.....	32
3.2 Makroskopické zkoušky.....	33
3.3 Mikroskopické zkoušky .....	33
4 Experiment .....	35
4.1 Použité zařízení .....	35
4.2 Provedení experimentu.....	39
4.3 Vyhodnocení makrostruktury.....	40
4.4 Vyhodnocení mikrostruktury .....	43
4.5 Vyhodnocení tvrdosti .....	46



4.6	Hustota výkonu a specifické vnesené teplo.....	48
5	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	51
6	Závěry.....	52
	Seznam použitých zdrojů	
	Seznam použitých symbolů a zkratek	
	Seznam obrázků	
	Seznam tabulek	
	Seznam příloh	

## ÚVOD [1] [2] [46]

Laser vznikl před 55 lety a za tuto dobu se rozšířil do mnoha odvětví našeho života. Široké využití má zejména v průmyslu, zdravotnictví, vědě, elektronice a zábavním průmyslu. Běžně kolem nás se s laserem můžeme setkat u laserových tiskáren, kopírek, CD-ROM mechanik nebo například na koncertě rockové kapely, kde tvoří různé laserové efekty. S neustálým vývojem laserové technologie stále více nahrazuje konvenční metody, jako například svařování, dělení, pájení, značení, kalení a mnoho dalších aplikací.

Pomocí průmyslových robotů může laserový paprsek s vysokou přesností kopírovat tvar kaleného povrchu. Technologie umožňuje tedy kalit tvarově složité součásti, vybrané obtížně dostupné plochy, drážky a otvory. Oproti kalení indukcí nebo plamenem má menší tepelně ovlivněnou oblast, minimální deformace a povrch má po kalení vyšší kvalitu a tak se zkracují časy na dokončovací operace.

Diplomová práce je zaměřena na technologii povrchového kalení laserem, viz příklady kalených součástí na obr. 1. Konkrétně se zabývá kalením několika vzorků litiny ČSN 42 2430 polovodičovým laserem. Každý vzorek je kalen s jinými parametry, u kterých je později změřena tvrdost a vyhodnocena struktura. Následně se zjišťuje vhodnost nastavených parametrů na výslednou strukturu litiny.



Obr. 1 Příklady povrchově kalených součástí [46]

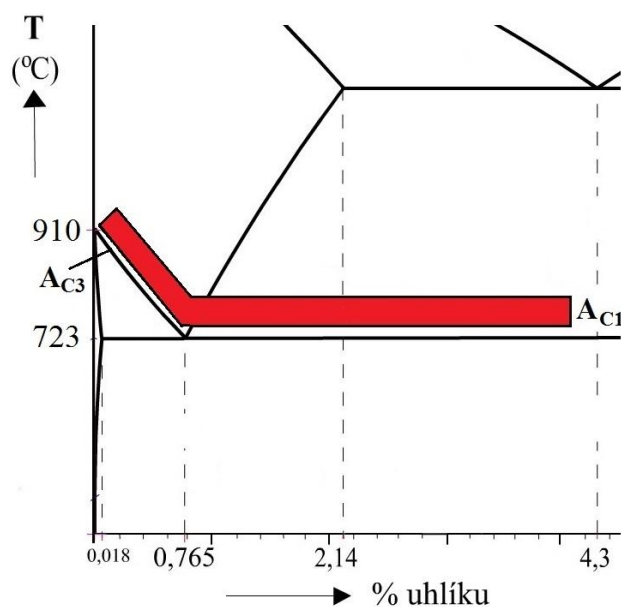
## 1 KALENÍ [3] [65] [66]

Kalení je druh tepelného zpracování, které se provádí za účelem zvýšení tvrdosti a tím i pevnosti součásti. Nerovnovážné struktury materiálu o vyšší tvrdosti dosáhneme ohřevem na kalicí teplotu, výdrží na této teplotě a následným rychlým ochlazením ve vodě, oleji, kovové nebo solné lázni nebo na vzduchu. Rychlé ochlazení má za následek vznik martenzitické nebo bainitické struktury.

U ocelí je vhodná kalicí teplota volena mezi 30 až 50°C nad teplotou  $A_{C3}$  pro podeutektoidní oceli nebo nad teplotou  $A_{C1}$  pro nadeutektoidní oceli, viz vyznačená oblast na obr. 2.

Hodnota tvrdosti oceli je nejvíce závislá na obsahu uhlíku. Pokud ocel obsahuje více než 0,35% uhlíku, je možno ji považovat za dobře kalitelnou. S klesajícím obsahem uhlíku se při kalení dosahuje menších tvrdostí. Pokud je hranice obsahu uhlíku menší než 0,2 %, lze považovat ocel za nekalitelnou. Jelikož je v této práci kalena litina, bude dále pojednáno o způsobech kalení litin.

Litiny lze kalit stejným způsobem jako oceli. U litin je ovlivněna zejména matrice a množství, tvar nebo uspořádání grafítu zůstává stejné. Kalením litin je dosaženo struktury, kde základní kovovou hmotu (matrici) tvoří stejně jako u ocelí převážně martenzit nebo bainit. Hodnota tvrdosti grafitických litin po kalení je nižší než u ocelí z důvodu vyskytujících se částic grafítu. Částice grafítu mají vliv na tvrdost svým tvarem, velikostí a uspořádáním v matrici. Grafit nejvíce ovlivňuje litiny s lupínkovým grafitem, kde je po martenzitickém kalení dosaženo tvrdosti 50 HRC. Navíc kvůli výskytu lupínkového grafítu jsou tyto litiny více náchylné k praskání. U litin s grafitem ve tvaru kuliček je dosaženo vyšších hodnot tvrdosti (cca 55 HRC).



Obr. 2 Oblast kalení v Fe-Fe<sub>3</sub>C [66]

### Způsoby kalení litin:

#### → **Martenzitické kalení**

Kalení je používáno pro litiny grafitické a bílé. Grafitické litiny jsou kaleny z teplot nad  $A_{1,2}$  v rozmezí teplot 850 – 900°C. Kdyby tyto litiny byly kaleny z vyšších teplot, byl by podíl zbytkového austenitu ve struktuře vyšší a tvrdost nižší. Kalení je prováděno do studené lázně (voda, olej) nebo pro snížení náchylnosti k prasklinám také termálně. Po kalení se musejí litinové odlitky popustit, kvůli snížení vnitřního pnutí, na teplotu do 200°C.

U bílých litin je martenzitické kalení nejdůležitějším tepelným zpracováním z hlediska zvýšení mechanických vlastností a především vlastností užitkových, jako je odolnost proti opotřebení apod. Teploty a volba kalicího prostředí se liší dle druhu použité litiny.

### → *Izotermické (bainitické) kalení*

Tento způsob kalení je používán pro litiny s lupínkovým nebo kuličkovým grafitem k vytvoření bainitické struktury. Odlitky jsou nejprve ohřány na teplotu austenitizace tj. teplota v rozmezí 50 až 80°C nad  $A_{1,2}$  a potom jsou zchlazeny na teplotu 250 – 400°C. Na této teplotě jsou odlitky udržovány 1 až 3h v termální lázni a poté se zchladí na vzduchu. Po tomto procesu dle zvolené teploty a výdrže obsahuje struktura zakalené části bainit i s podílem austenitu. Po bainitickém kalení se už neprovádí jiné tepelné zpracování. Cílem bainitického kalení je získání příznivé kombinace mechanických vlastností. Jeho přednostmi oproti martenzitickému kalení, je nižší vnitřní pnutí a výrazné snížení náchylnosti ke vzniku prasklin.

## **1.1 Povrchové kalení [3] [14] [66] [81]**

Povrchové kalení je jedním z řady způsobů vytvrzení a zpevnění povrchu součástí. Součásti, které jsou zpevněny kalením, můžou pracovat i za zvýšených teplot, na rozdíl od součástí, které jsou zpevněny např. plastickou deformací, kde by došlo k velmi rychlému odpevnění.

Povrchové kalení je typ martenzitického kalení, kde je zakalen pouze povrch součásti do určité hloubky a jádro materiálu zůstává v původním stavu. Součásti jsou tedy na povrchu velmi tvrdé se zároveň měkkým a houževnatým jádrem.

Aby došlo k ohřátí jen povrchové vrstvy, tedy k požadovanému teplotnímu rozdílu mezi povrchovou vrstvou a jádrem součásti, musí být rychlost ohřevu vysoká a doba ohřevu krátká. Ve srovnání s objemovým kalením, je hlavním rozdílem vysoká rychlost ohřevu a neprovádění žádné výdrže na teplotě. Díky vyšší rychlosti ohřevu roste teplota ukončení přeměny z perlitu na austenit. K udržení správné chemické struktury austenitu je vyžadováno kalících teplot až o 200°C vyšších, než u objemového kalení. Z toho plyne, že pro kalení laserem neplatí obvyklé diagramy tepelného zpracování. Vysoká rychlost ohřevu také zvyšuje nukleaci zárodků austenitu, z čehož plyne, že povrchovým kalením se zjemňuje austenitické zrno a martenzitická struktura. Následkem zjemnění je u strojních součástí dosahováno vyšších hodnot tvrdosti.

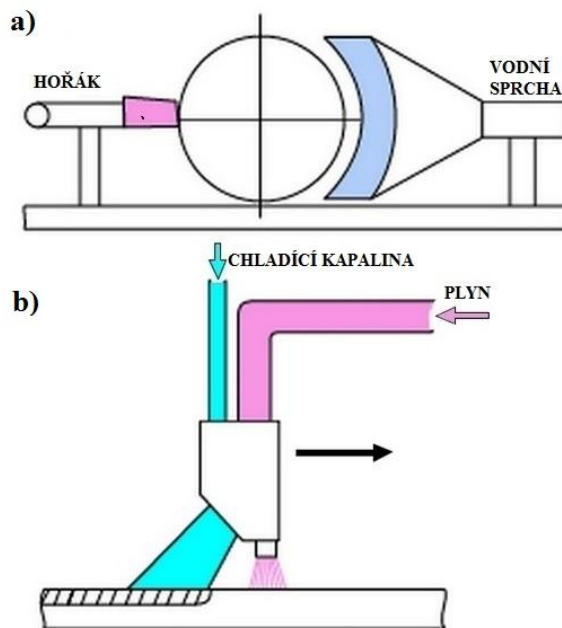
Největší vliv na tvrdost při kalení má uhlík. Existuje v podstatě lineární závislost mezi obsahem uhlíku a dosaženou tvrdostí. To ovšem platí do obsahu 0,4% poté už hodnota tvrdosti stoupá pomaleji. Z toho plyne, že k povrchovému kalení jsou vhodné všechny kalitelné oceli s obsahem uhlíku nad 0,35% a jako nejvhodnější se označují oceli s obsahem 0,4 až 0,5 % uhlíku, u nichž lze dosáhnout vysokých tvrdostí s minimálním vznikem trhlin. Pro litiny platí, že výchozí struktura by měla být perlitická s obsahem feritu do 15%, bez ledeburitického cementitu.

Povrchové kalení je vhodné pro součásti, u kterých je požadována odolnost proti rázům a zároveň zvýšená odolnost proti opotřeбенí, jako jsou například čepy, ozubená kola, vačky, vodící plochy lopatky turbín a další.

Následující kapitoly budou věnovány způsobům ohřevu při povrchovém kalení. K ohřevu povrchu součásti lze využívat plamen, indukční ohřev a v současné době stále více používaný laser.

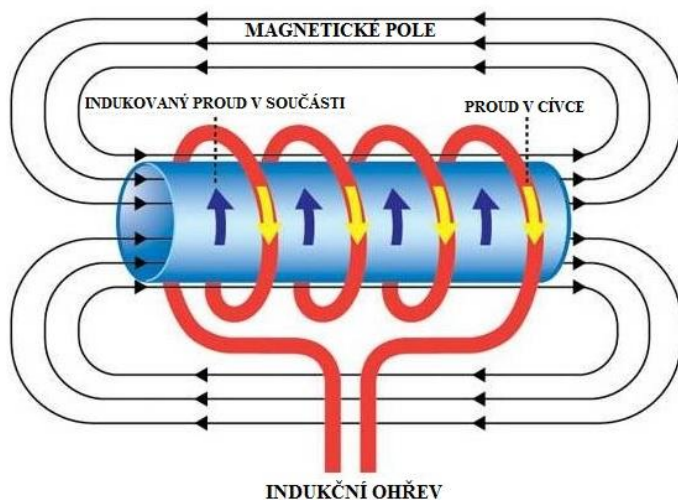
## 1.2 Povrchové kalení plamenem [3] [20] [21] [22] [24] [25]

Jedná se o nejstarší metodu ohřevu povrchové vrstvy součásti. Součásti jsou ohřívány pomocí svítiplynokyslíkových nebo kyslíko-acetylenových hořáků. Kalí se jednorázově nebo postupně. Minimální tloušťka kalené vrstvy při jednorázovém kalení (obr. 3a) je asi 3 mm, při postupném (obr. 3b) je to pak asi 1,5 mm. Aby bylo umožněno okamžité ochlazení povrchové vrstvy, je vodní sprcha součástí tělesa hořáku. V porovnání s indukčním kalením je povrch ohříván pomaleji, teplota je odhadována dle barvy povrchu součásti a z toho tedy plyne větší tloušťka a nerovnoměrnost struktury zakalené vrstvy. Výhodou kalení plamenem je přizpůsobivost, přenositelnost a nižší pořizovací náklady. Tento způsob kalení je používán pro velké rotační součásti, ozubená kola, čepy, kladky, atd.



Obr. 3 Povrchové kalení plamenem  
a) jednorázové b) postupné [21]

## 1.3 Indukční povrchové kalení [3] [20] [23] [25] [28] [29] [34]



Obr. 4 Schéma indukčního ohřevu [25]

Induktor, indukující ve vloženém elektricky vodivém předmětu magnetické pole. Toto pole generuje vířivé proudy, které mají největší intenzitu na povrchu součásti a dochází tak k ohřevu povrchové vrstvy. Schéma indukčního ohřevu je vidět na obr. 4.

Tloušťka kalené vrstvy se pohybuje v rozmezí 1 až 6 mm. Ohřev povrchu je prováděn dvěma

Povrch součásti při indukčním kalení, je ohříván pomocí induktoru. Induktor obsahuje měděnou trubku ve tvaru závitu, do níž je součást vložena. Induktor má tvar kalené plochy, aby byla zajištěna co nejtěsnější elektromagnetická vazba a tedy účinnost ohřevu. Povrch předmětu je ohříván střídavým proudem střední nebo vysoké frekvence. Rozsah frekvencí se běžně pohybuje mezi 5 až 50 kHz pro střední frekvence a 50 až 500 kHz pro vysoké frekvence. Střídavý proud vstupující do



Obr. 5 Kalení ozubeného kola [34]

způsoby, buďto jednorázově (*přetržitě*) nebo postupně (*nepřetržitě*). U jednorázového kalení je ohříván najednou celý povrch součásti a následně zakalen vodní sprchou nebo v lázni. U postupného kalení je ohřívána pouze část kaleného povrchu, který je možno ihned kalit díky vhodně umístěné vodní sprše hned za induktorem. U tohoto kalení však vzniká měkké místo (tzv. šev), které se nachází mezi začátkem a koncem kaleného povrchu nebo se také můžou postupně kalené povrchy překrývat a tím dochází k popouštění již dříve zakaleného povrchu.

Tento způsob kalení je vhodný pro různé typy válcových, plochých a tvarových součástí, např. kalení ozubeného kola, viz obr. 5. Výhodné je kalit velké série, protože pořizovací náklady jsou vysoké.

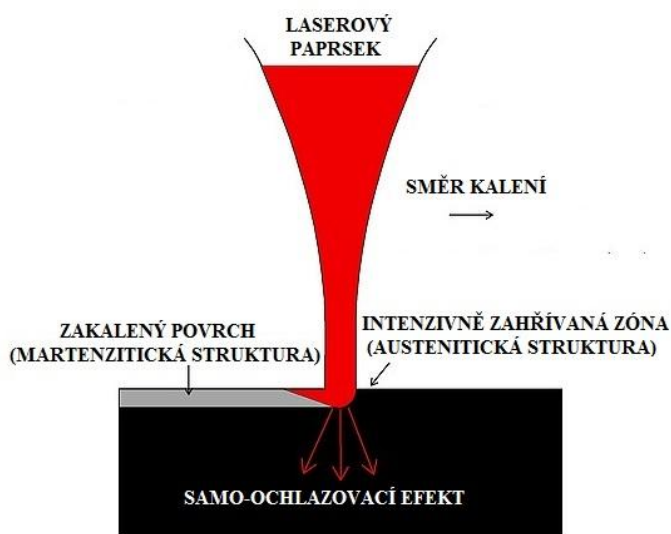
#### 1.4 Povrchové kalení laserem [3] [8] [28] [31] [32] [33] [42] [45] [46] [64] [66] [67] [68] [69] [82]

Tato moderní technologie se v průmyslu používá už 14 let a je stále více využívána. V porovnání s kalením plamenem a indukčním kalením má řadu výhod. Jsme schopni dobře řídit kalící proces a dodržet rovnoměrný zakalený povrch a nejsme omezováni složitostí tvarů.

Samotné kalení je prováděno laserovým paprskem, kterým je do pracovního prostoru dodávána velmi intenzivní energie. Vysoká energie umožňuje velmi rychlý ohřev povrchové vrstvy těsně pod teplotu tavení. Rychlost ohřevu povrchu se pohybuje okolo  $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ , takže jádro součástí se nestihne při samotné operaci ohřát a jeho ovlivnění je tak velmi malé. Díky tomu vzniká výhoda v ochlazování součástí. Když si uvědomíme, jakou teplotu má povrch po ohřátí a začneme ho z venku ochlazovat vodní sprchou nebo v lázni, což je prováděno u kalení plamenem nebo indukci, dojde k velkému teplotnímu rozdílu a k vyvolání velkých vnitřních pnutí s následkem možného vzniku trhlin v povrchové vrstvě. Zatímco u laseru je po zakalení vedeno vnesené teplo do neohřátého základního materiálu

součástí (tzv. samo-ochlazovací efekt, viz obr. 6), z čehož vyplývá plynulejší vyrovnání teplot, nižší vnitřní pnutí v materiálu a menší oxidace povrchu. Následkem plynulého vyrovnávání teplot vzniká jemnější martenzitická struktura, která se vyznačuje vyšší tvrdostí (může být vyšší až o 100 HV) než u klasického způsobu kalení. Obvykle dosažené hloubky povrchového kalení jsou od 0,1 do 2 mm.

Pro přesné dodržení tvaru a teploty povrchové vrstvy při kalení, je laserová hlavice uchycena k manipulačnímu robotu a vybavena pyrometrem. Manipulační robot umožňuje bezproblémově kalit libovolně tvarované plochy, otvory, drážky s požadavkem na vysokou přesnost. Pyrometr kontroluje teplotu kalícího procesu s přesností několika stupňů a reguluje poskytovaný výkon laseru. Hustota výkonu laserového paprsku se pohybuje od  $10\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$  do  $10^4\text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$  dle použité aplikace. Pro laserové kalení je hustota výkonu nižší, běžně používaná hodnota je okolo  $100\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ , což je pro dosažení kalících teplot dostačující.



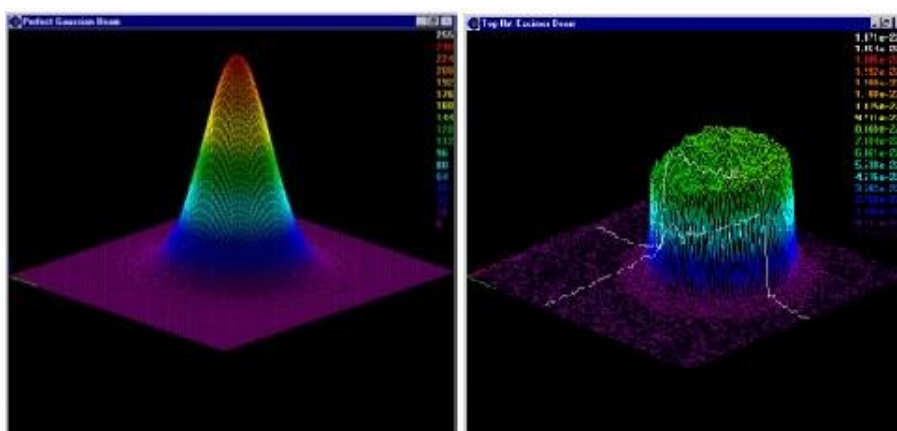
Obr. 6 Průběh kalení laserovým paprskem [45]

Laserově kalit je možno konstrukční, legované, nástrojové oceli, šedé litiny, litiny s grafitem lamelárním i kuličkovým.

Výhodou je možnost naprogramovat manipulačního robota dle výkresu zákazníka a minimální potřeba následných dokončovacích operací, díky kvalitnímu povrchu po kalení. To vede k rapidně kratším dodacím časům než u metod zmíněných v kapitolách výše.

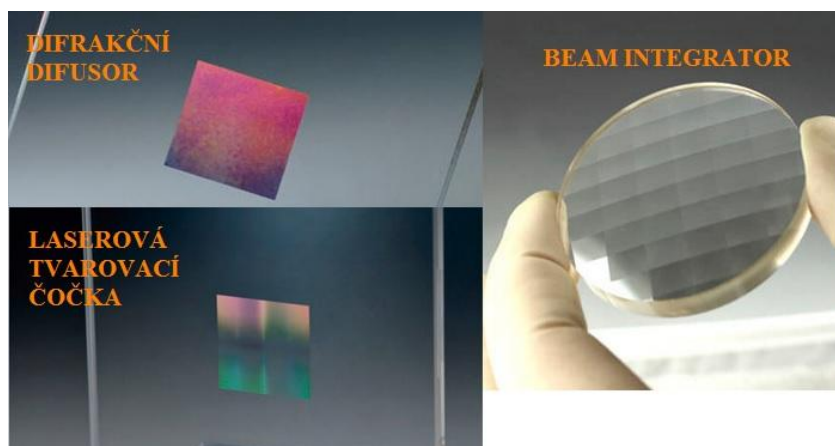
Pro kalení laserem jsou využívány jak CO<sub>2</sub> lasery, tak pevnolátkové lasery. Z nich se používají v dnešní době nejčastěji lasery polovodičové, neboť ve srovnání s ostatními typy laserů pracují s kratšími vlnovými délkami, pohlcování přiváděné energie materiálem je větší a jejich energetická účinnost dosahuje laboratorně až 47 %.

U povrchového kalení je vhodné použít pro laserovou stopu tvarovací optiku. Ve většině případů je laserový paprsek malého kruhového průřezu (viz Gaussovo rozložení paprsku na obr. 7), což je např. vhodné pro pájení, řezání, gravírování, vrtání a některé metody svařování. Pro povrchové kalení je ale výhodnější upravit tvar paprsku na povrchu obrobku do větších průřezů (viz obr. 7, rovnoměrné rozložení).

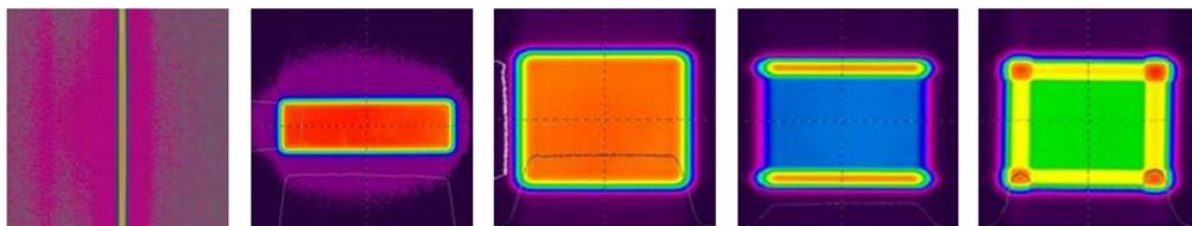


Obr. 7 Ideální Gaussovo rozložení paprsku pro největší koncentraci energie (vlevo) a plochý vrchol paprsku pro rovnoměrné rozložení energie (vpravo) [69]

Nejčastěji používané stopy paprsku pro laserové kalení jsou čtvercové nebo obdélníkové, viz příklady laserových stop na obr. 9. To je umožněno za použití různých laserových tvarovacích čoček, difusorů nebo broušených zrcadel, tzv. beam integrátorů (homogenizerů), viz obr. 8. Tyto optické prvky se vkládají těsně za zaostřovací objektiv. Dalším možným způsobem rozložení homogenity laserového paprsku je rozostření, které není moc efektivní nebo vychylování, kde dochází k vychylování paprsku dvěma zrcadly, která jsou ovládána PC.



Obr. 8 Optické prvky pro tvarování paprsku [67] [82]

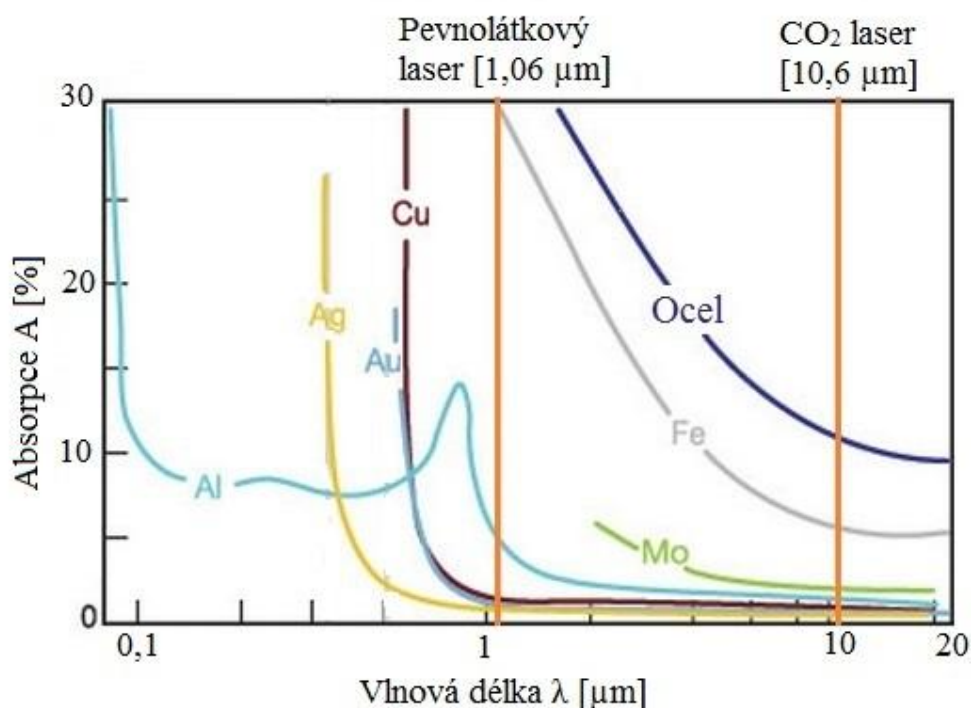


Obr. 9 Vhodné tvary laserových stop při povrchovém kalení [68]

#### 1.4.1 Vliv laserového paprsku na materiál [9] [11] [70]

Podmínkou pro správné využití laserového paprsku je důležitá absorpce laserového záření materiálem. Při dopadu laserového záření na povrch součástí, musíme brát v úvahu vzájemné působení a účinky, které se odvíjí od vlastností materiálů a jejich schopnost absorbovat laserové záření a měnit ho na teplo. Pohlcení a následná přeměna záření na tepelnou energii, je důležitým faktorem při laserovém zpracování kovů.

Dopadem laserového paprsku na materiál, je část záření odražena, část absorbována a část projde materiálem. Je všeobecně známo, že elektrická vodivost klesá s rostoucí teplotou a že kovy s dobrou vodivostí mají nízkou absorpci. Z toho plyne, že v případě zvýšení teploty kovu se zvýší absorpce. Dalšími parametry ovlivňující absorpci, je vlnová délka a stav zpracovávaného povrchu. Z obr. 10 vyplývá, že čím je kratší vlnová délka, tím je absorpce materiálu větší. Je tedy zřejmé, že při zpracování oceli CO<sub>2</sub> laserem, bude potřeba nastavit vyšší výkon, než u laserů pevnolátkových. Na absorpci má vliv i stav povrchu, jak je uvedeno v tab. 1.



Obr. 10 Absorpce laserového záření v závislosti na vlnové délce [70]



Tab. 1 Vliv stavu povrchu na koeficient absorpce pro ocel [9]

Stav povrchu	Průměrná drsnost povrchu Ra [μm]	Absorpce [%] CO <sub>2</sub> laser λ = 10,6 μm	Absorpce [%] pevnolátkový laser λ = 1,6 μm
Leštěný	0,02	5,2	29,85
Broušený	0,28	7,75	40,8
Válcovaný	0,87	6,0	34,0
Válcovaný	3,35	12,6	51,55
Pískovaný	1,65	34,1	68,30

Z tabulky plyne, že s vyšší drsností stoupá hodnota pohlceného záření. Někdy je tedy vhodné před laserovým zpracováním povrch obrobku upravit.

To lze několika způsoby:

- zdrsněním povrchu,
- nabarvením povrchu černou barvou,
- nořením,
- předehřevem povrchu.

## 2 TYPY PRŮMYSLOVÝCH LASERŮ [2] [9] [15] [40]

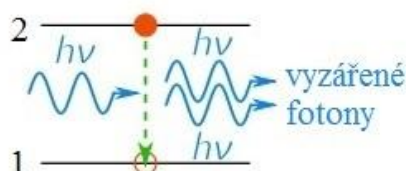
V následujících kapitolách budou popsány CO<sub>2</sub>, Nd: YAG, vláknové, diskové a polovodičové lasery. Ještě před popisem těchto laserů, budou nejprve vysvětleny základní pojmy pojící se s lasery a uvedeno jejich rozdělení.

Laser se skládá z těchto základních částí. Z aktivního prostředí, budícího zdroje a optického rezonátoru, tyto části jsou zobrazeny na obr. 11.



Obr. 11 Základní části laseru – rezonátor [40]

- **Aktivní prostředí** – je to prostředí, které zesiluje procházející záření následkem stimulované emise. Stimulovaná emise je proces, kdy dochází k přechodu atomu z vyššího energetického stavu (2) do nižšího energetického stavu (1) a při tomto přechodu je vyzářen foton, viz obr. 12. Tento přechod se děje spontánně sám od sebe, neboť prostředí má snahu setrvávat ve stavu s nižší energií, v tzv. termodynamické rovnováze.



Obr. 12 Schéma stimulované emise [40]

- **Budící zdroj** – dodává laseru energii, která zajišťuje dostatek částic ve vyšším energetickém stavu, aby proběhla stimulovaná emise záření.
- **Optický rezonátor** – je složen ze dvou zrcadel nepropustného a částečně propustného, viz obr. 11. Vystupující svazek z aktivního prostředí se odráží od částečně propustného zrcadla zpět do aktivního prostředí, kde spouští další stimulovanou emisi. Opakovanými odrazy, záření nabírá na intenzitě a až překoná odrazivost částečně propustného zrcadla, vystoupí ven z rezonátoru v podobě laserového paprsku.
- **Vedení laserového paprsku** – aby se laserový paprsek dostal k požadovanému místu, je veden systémem zrcadel a čoček do laserové hlavy nebo optického vlákna.
- **Laserový paprsek** – je proud fotonů generovaný stimulovanou emisí. Z toho plynou jeho unikátní vlastnosti. Je monochromatický (*jednobarevný*), má téměř nulovou divergenci (*rozbíhavost*) a je koherentní (*generované fotony kmitají ve stejné fázi jak časově tak prostorově*).

Lasery jsou klasifikovány podle mnoha různých kritérií, základní rozdělení je podle:

#### *Typu aktivního prostředí*

---

- Pevnolátkové
- Kapalinové
- Plynové
- Polovodičové

#### *Časového režimu provozu*

---

- Impulsní (pulsy s vysokou energií a nízkou frekvencí)
- Pulsní (pulsy s vysokou frekvencí)
- Kontinuální (souvislé generování záření)

#### *Způsobu buzení*

---

- Opticky
- Elektrickým výbojem
- Elektronovým svazkem
- Chemicky

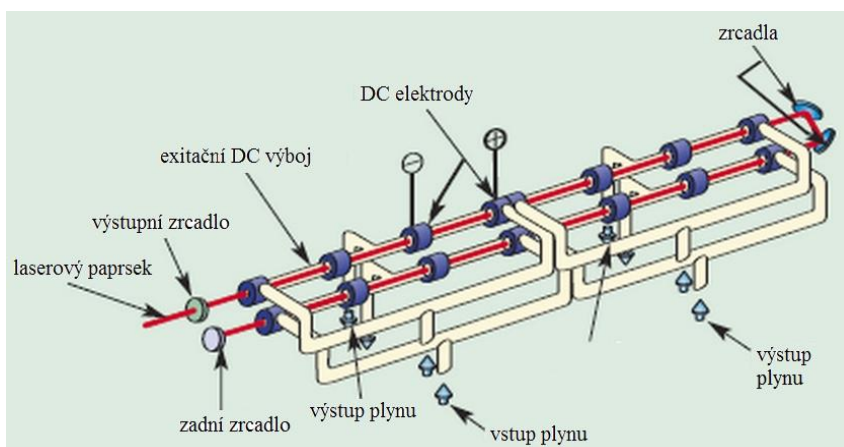
#### *Vlnové délky*

---

- Infračervené (780 nm – 1 mm)
- Viditelné pásmo (360 – 780 nm)
- Ultrafialové (10 – 360 nm)
- Rentgenové (10 – 0,1 nm)

## 2.1 CO<sub>2</sub> lasery [5] [7] [14] [18] [26] [35] [36] [37]

CO<sub>2</sub> lasery jsou tříděny do kategorie plynových laserů. Aktivní prostředí je tvořeno směsí plynů obsahujících CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a He v poměru 1:4:5. Princip funkce je založen na zesílení paprsku laseru mnohonásobným průchodem plyným prostředím. Nejběžnější je buzení zajištěno elektrickým výbojem, elektronovým svazkem nebo chemickou reakcí. Plynové lasery CO<sub>2</sub>

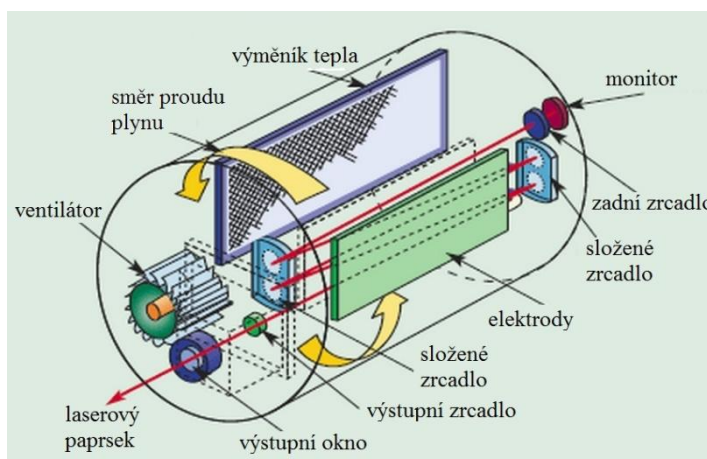


Obr. 13 Typ CO<sub>2</sub> laseru s podélným prouděním plynu [37]

pracují v kontinuálním nebo pulsním režimu se standardní výstupní vlnovou délkou 10,6  $\mu\text{m}$ . Běžné hodnoty účinnosti CO<sub>2</sub> laserů se pohybují mezi 5 – 10 % a výkon od několika wattů do cca 20 kW.

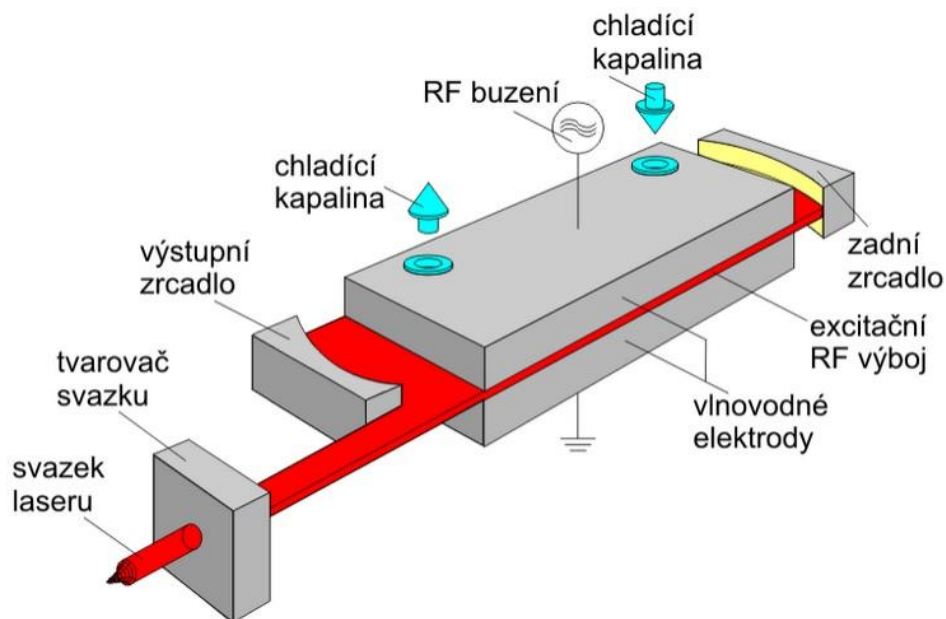
V průmyslu jsou používány 3 základní typy CO<sub>2</sub> laserů, které jsou děleny dle směru proudění plynu. Prvním typem je CO<sub>2</sub> laser s podélným prouděním, viz obr. 13. Buzení je elektrickým výbojem. Výboj generuje v trubici laserový paprsek za pomoci vysokofrekvenčních vln z plyné směsi. Výkon laseru se pohybuje až přes 10 kW s vysokou kvalitou výstupního paprsku ( $K > 0,8-0,95$ ) a proto je vhodný pro řezání.

Druhým typem je CO<sub>2</sub> laser s příčným prouděním, viz obr. 14. Tento laser poskytuje menší kvalitu výstupního svazku ( $K > 0,18$ ), z důvodu nízké rychlosti proudění směsi plynu kolmo na osu rezonátoru. Méně kvalitní svazek je nejvíce využíván pro povrchové kalení a částečně i na svařování. Výhodou tohoto laseru jsou nízké provozní náklady ve srovnání s podélnými lasery podobných výkonů, protože mají menší spotřebu plynů.



Obr. 14 Typ CO<sub>2</sub> laseru s příčným prouděním plynu [37]

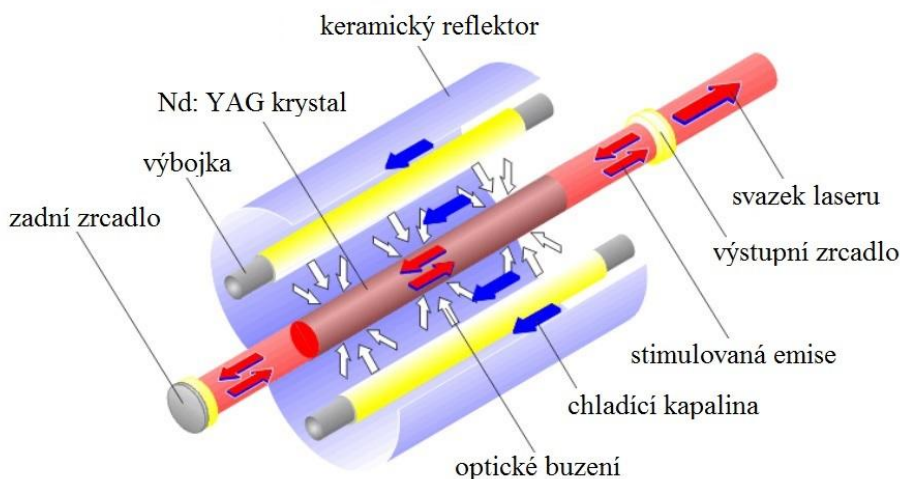
Poslední typ CO<sub>2</sub> laseru je difuzně chlazený deskový SLAB laser, viz obr. 15. Jedná se o modernější typ laseru, který obsahuje zásobník na plynové směsi. Objem zásobníku je 10 litrů a vystačí na rok nepřetržitého provozu. Součástí zařízení tedy nemusí být dávkovací zdroj plynové směsi. To lze označit za výhodu, neboť se snižují servisní náklady. Chlazení laseru je prováděno difúzí, to znamená teplo je rozloženo na deskové elektrody, které jsou chlazeny vodou. Moderní rezonátor zajišťuje velmi dobrou kvalitu výstupního svazku ( $K > 0,8$ ), snižuje spotřebu plynů a energie a vyznačuje se mnohem delší životností, z důvodu absence pohyblivých částí. Laser je využíván na řezací a svařečské operace.



Obr. 15 Deskový SLAB laser [18]

## 2.2 Nd: YAG lasery [5] [7] [18] [19] [26] [35]

Jsou typickým zástupcem pevnolátkových laserů. Aktivní prostředí je tvořeno tyčinkou o délce 15 – 20 cm a průměru kolem 10 mm. Tyčinka je z monokrystalu yttria alumina granátu (YAG) využívajícího atomy neodymu [Nd]. Laserový paprsek vzniká ozařováním tyčinky (krystalu) budícím zařízením. Jako buzení jsou nejčastěji používány výbojky (LPSS – Lamp pumped solid state) nebo diody (DPSS – Diode pumped solid state). Výbojkou buzené lasery (obr. 16) jsou méně účinné, neboť velká část energie výbojky se nevyužije a mění se v teplo, které je odvedeno chlazením. Dalšími nevýhodami jsou vysoké náklady při provozu a krátká životnost výbojek (kolem 1000h).



Obr. 16 Výbojkou buzený Nd: YAG laser [19]

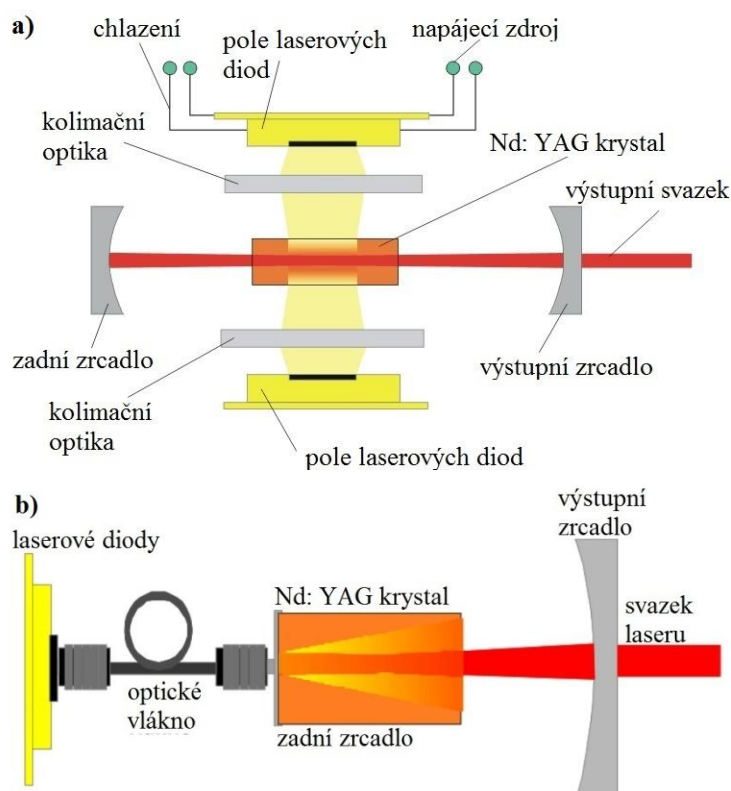
Tyto lasery jsou především používány v pulsním režimu. Jejich výhodou je vysoká hodnota energie pulzu až 100 J. Díky tomu jsou ideální pro bodové a švové svařování, při

kterém je dosaženo hlubokého průvaru a malé tepelně ovlivněné oblasti a také pro řezání a vrtání ušlechtilých ocelí a slitin.

Naopak lasery buzené diodou umožňují dosáhnout vyšších účinností při přeměně elektrické energie na světelnou a disponují lepší kvalitou výstupního svazku.

U těchto laserů je buzení rozděleno dle pozice rezonátoru na boční a zadní buzení. Tato dvě buzení se liší v dosaženém výkonu a kvalitě svazku. Zatímco u bočního buzení, viz obr. 17 a) je dosaženo vyšších výkonů, za cenu nižší kvality výstupního svazku, u zadního buzení, viz obr. 17 b) je tomu přesně naopak, nižší výkon, ale lepší kvalita výstupního svazku.

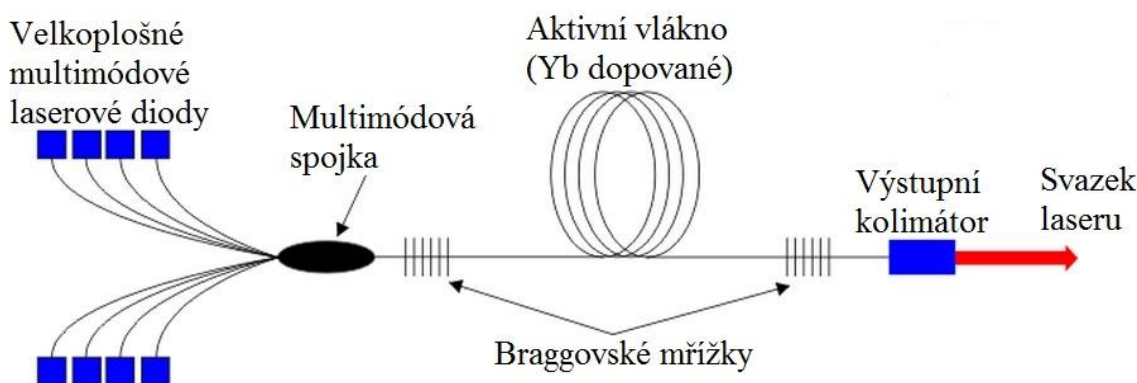
Ve srovnání s výbojkovými lasery disponují vyšší účinností, delší životností a menšími požadavky na chlazení. Diodou buzené lasery jsou používány pro svařování, gravírování a značení železných a neželezných kovů, plastů a keramiky.



Obr. 17 Diodou buzený Nd: YAG laser  
 a) boční buzení, b) zadní buzení [19]

### 2.3 Vlákňové lasery [2] [12] [13] [18] [19] [48]

Vlákňový laser patří mezi nejmodernější pevnolátkové lasery. Aktivní prostředí je tvořeno optickým vláknem o délce několika metrů a průměru v řádech mikrometrů. Optické vlákno je nejčastěji dopované ionty ytterbia (Yb). Buzení je prováděno laserovými diodami a je vedeno přes multimódovou spojku do optického vlákna. U těchto laserů jsou zrcadla v rezonátoru nahrazena tzv. Braggovskými mřížkami (obr. 18). Tyto mřížky se nacházejí



Obr. 18 Schéma vlákňového laseru [19]

uvnitř optického vlákna a mají UV zářením zapsanu periodickou změnu indexu lomu. Takto nastavený index lomu se chová jako „zrcátko“, které odráží pouze určenou vlnovou délku optického spektra. Laserový svazek poté vychází z optického vlákna pomocí kolimátoru.

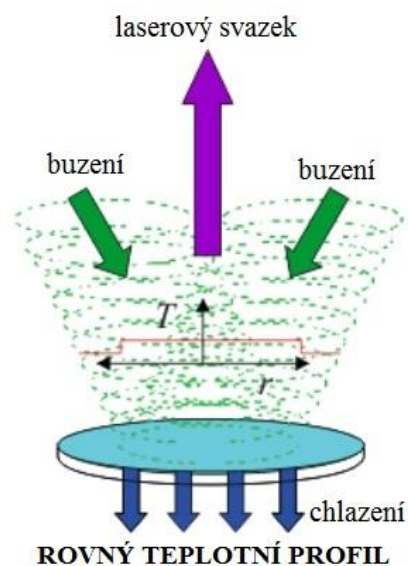
Velkou výhodou vláknového laseru je jednoduchá konstrukce a tzv. laserové moduly. Tyto moduly se můžou jednoduše spojovat a tak lze dosáhnout výkonu až 80 kW. Jako další výhoda je dlouhá životnost (100 000 h), vysoká účinnost (až 35 %), vysoká kvalita výstupního svazku (spojováním modulů klesá), nízké provozní a servisní náklady.

Tyto lasery jsou dle pracovního režimu používány na tyto operace: kontinuální a kvazipulsní režimy jsou vhodné pro řezání a svařování a pulsní režim je využíván v operacích gravírování, značení a mikroobrábění

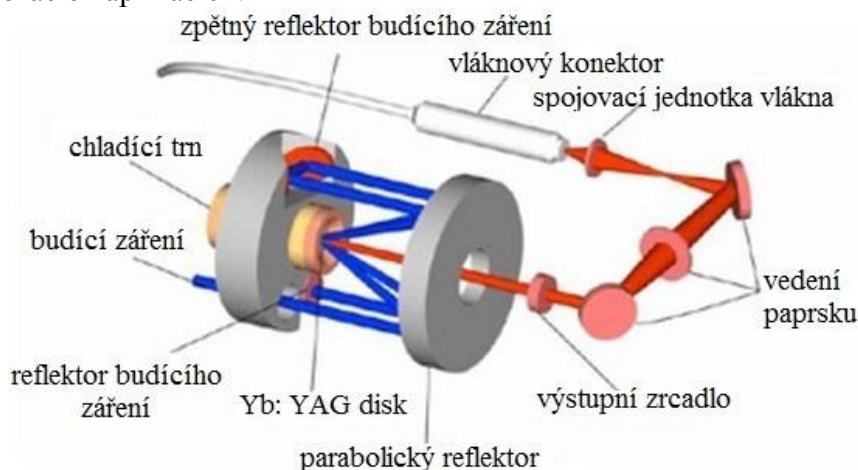
## 2.4 Diskové lasery [12] [18] [38] [39] [48]

Diskové Yb: YAG lasery jsou obměnou Nd: YAG laserů. Pracují v okolí infračervené oblasti při vlnové délce 1,03  $\mu\text{m}$ . Jako aktivní prostředí je zde místo tyčinky použit tenký disk (obr. 20). Disk obsahuje 30% ytterbia (Yb), má průměr většinou do 100 mm. Vzhledem k tomu, že disk může být chlazen po celé zadní straně, tak je chlazení rovnoměrné a poskytuje rovny teplotní profil po celém jeho povrchu, viz obr. 19. Následkem toho lze dosáhnout kvalitního výstupního svazku při vyšších výkonech. To je hlavní výhodou oproti Nd: YAG laserům, u kterých je toto velkým problémem. S jedním diskem je možno dosáhnout až 3,2 kW. Pro dosažení vyšších výkonů (až 16 kW) lze disky umístit za sebe.

Pro buzení jsou používány diody, které způsobují mnohonásobné dopady záření. Budící záření je vstřebáváno šířkou disku, která má několik desetin milimetru a tak je dosaženo účinnosti buzení až 90 %. Celková účinnost diskových laserů se potom pohybuje přes 30 %. Chlazení disku je prováděno vzduchem nebo vodou pomocí chladicí jednotky. Tyto lasery jsou považovány za zástupce Nd:YAG laserů, díky vyšší účinnosti a lepší kvalitě paprsku, je nahrazují ve svářečských a řezacích aplikacích.



Obr. 19 Diskový laser chlazení přes spodní část [18]

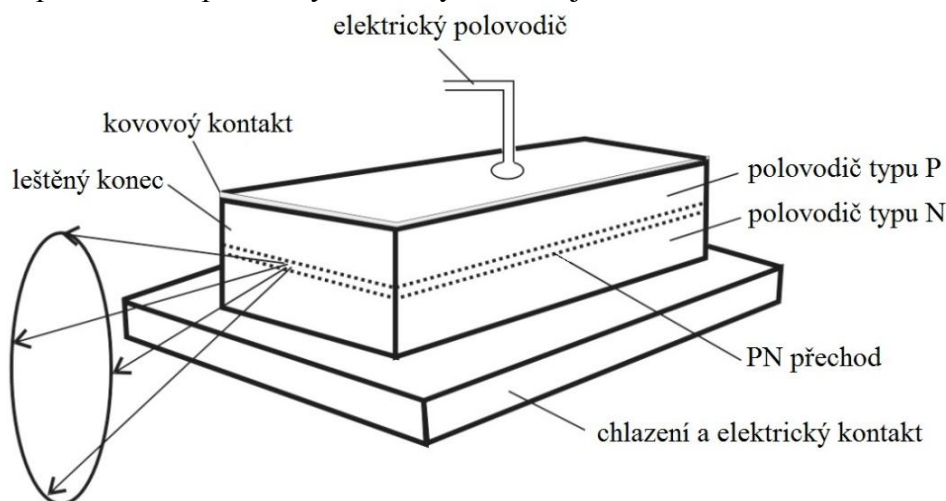


Obr. 20 Schéma rezonátoru diskového laseru [39]

## 2.5 Polovodičové (diodové) lasery [6] [7] [12] [19] [40] [44]

Jsou dalším typem pevnolátkových laserů. U těchto laserů neprobíhají přechody elektronů mezi energetickými hladinami, nýbrž mezi energetickými pásy. Aktivní prostředí je tvořené polovodičem ve tvaru hranolu s PN přechodem, viz obr. 21. Stěny hranolu jsou kolmé na PN přechod, což je podmínkou pro vytvoření Fabry-Perotova rezonátoru.

Buzení aktivního prostředí je způsobeno průchodem elektrického proudu. Záření se šíří v rovině PN přechodu a opakovanými odrazy se zesiluje.



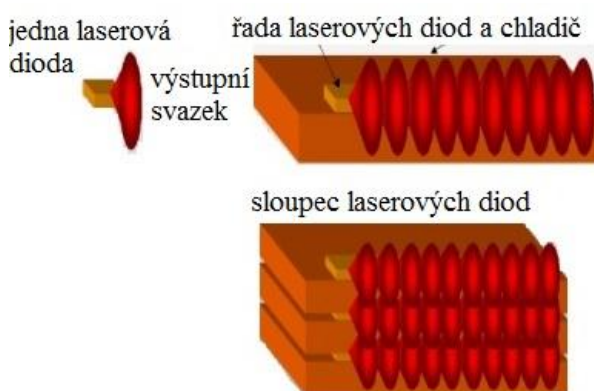
Obr. 21 Schéma polovodičové diody [19]

Laserové diody poskytují výkon pouze několika desítek wattů. Pro dosažení vyšších výkonů (až 10 kW), lze diody snadno seskupovat do řady o délce několika milimetrů a následně do sloupců. Sloupce mají výkon 600 W a jsou řazeny do bloků s výkonem v řádech kilowattů, viz obr. 22.

Mají velkou celkovou účinnost (až 50%) a mohou pracovat v pulsním nebo kontinuálním režimu. Ovšem kvalita výstupního svazku je nízká, z důvodu malých rozměrů, které způsobují větší rozbíhavost paprsku. Konstrukce laserové diody je zobrazena v příloze 1.

Ke snížení rozbíhavosti jsou na stěně bloku umístěny mikročochky, jejímž průchodem se svazek stává rovnoběžný. Ale i přesto není kvalita paprsku taková jako u jiných typů laserů. Tento laser není vhodné používat v aplikacích, kde je potřeba výstupní svazek fokusovat do malých průřezů, ale naopak se dá velmi dobře využít na svařování nebo na povrchové úpravy, kde je větší průřez paprsku výhodou. Pracovní vlnová délka těchto laserů se pohybuje kolem 1  $\mu\text{m}$ , dle typu použitého polovodiče. Nejběžnějším typem je GaAs laser s vlnovou délkou 0,84  $\mu\text{m}$ , dále pak GaN, PbSnSe, GaInAsP a další.

Výhodami polovodičových laserů jsou nízká hmotnost, vysoká účinnost a kompaktnost. Díky malým rozměrům lze lasery připevnit k manipulačním robotům a využívat je tak ke svařování a kalení složitých tvarů v různých odvětvích průmyslu. Dále se s nimi běžně setkáváme u laserových tiskáren u CD/DVD mechanik nebo také u technologie rapid prototyping.

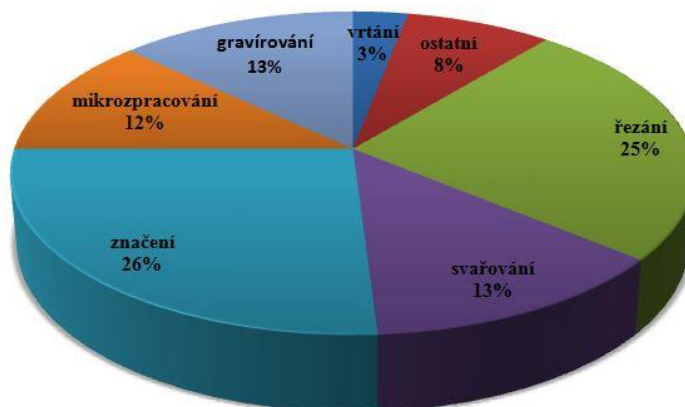


Obr. 22 Seskupení laserových diod [44]



## 2.6 Typické aplikace využití laseru v průmyslu [4] [16] [17] [19] [27] [40] [41] [43] [47] [49] [50] [51] [52] [53] [54] [55] [56]

V průmyslových operacích je používána řada laserů, které jsou schopny nahradit klasické operace, jako je tepelné zpracování, obrábění, dělení, vrtání, značení a další. Procentuální zastoupení lasery prováděných operací v průmyslu je zobrazeno na obr. 23.



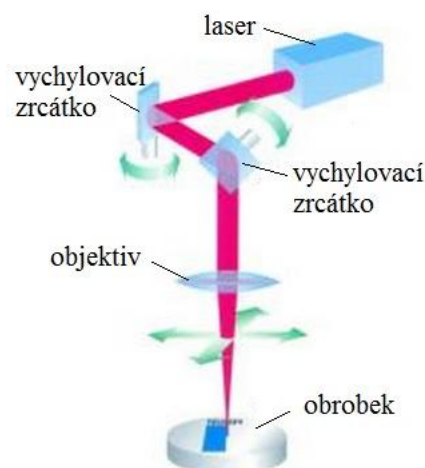
Obr. 23 Procentuální využití jednotlivých technologií [47]

### → Značení a popis laserem

Základem laserového značení je odpaření materiálu v daném místě povrchu. Jedná se tedy o bezkontaktní operaci, kde v jediném kroku je do povrchu materiálu vytvářen velmi přesný a odolný popis. Laserem lze popisovat rovné, válcové nebo různě zakřivené plochy. Na těchto plochách je laser schopen vytvářet tvarově složité znaky až rychlostí  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výška znaků je v jednotkách milimetrů a hloubka odpařené vrstvy materiálu se pohybuje v hodnotách mikrometrů. V porovnání s klasickými technologiemi je výhodou, že ve většině případů nejsou používány žádné chemické přísady či inkousty, čímž jsou snižovány výrobní náklady, dále je zde minimální tepelné ovlivnění okolního povrchu, vysoká rychlost výroby a velmi dobrý kontrast a čitelnost.

Pro tuto technologii jsou dle zvoleného materiálu používány následující lasery. Pro sklo, keramiku a měkké materiály je používán  $\text{CO}_2$  laser a pro materiály jako jsou různé kovy nebo tvrdé plasty je používán vláknový laser. Ten v poslední době začíná být nejvýhodnější volbou pro technologii značení. Lasery lze uchytit do plotterů nebo do tzv. systému s výkyvnou hlavou, viz schéma na obr. 24. U plotterů je zadaný znak vytvářen podle šablony a u systému s výkyvnou hlavou je svazek speciální optikou vychylován po povrchu.

Laser je možné použít na většinu materiálů jako např. kalené, nekalené oceli a litiny, hliník, bronz, mosaz, titan, slinutý karbid, drahé kameny, sklo, dřevo, gumu, papír a další.

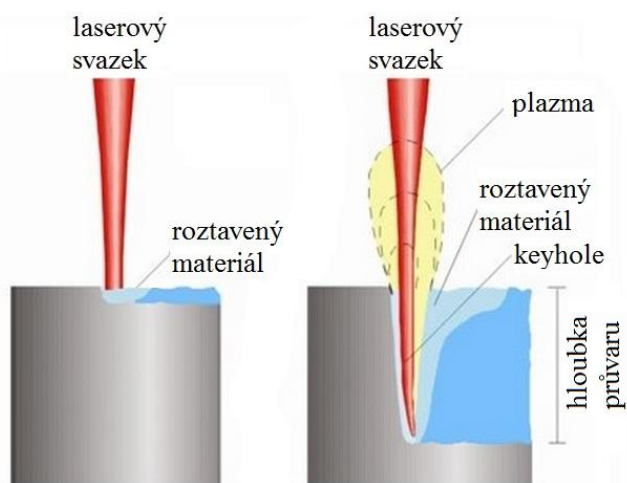


Obr. 24 Princip vychylování paprsku [4]

### → Svařování laserem

Laserové svařování je progresivní technologií, kterou lze spojovat různé druhy materiálů a také materiály, které se konvenčními metodami svařují velmi obtížně nebo se svařit ani nedají. Svařovaná oblast je díky vysokému výkonu laserového svazku velmi rychle ohřívána. Velkou rychlostí ohřevu a rychlým ochlazením vzniká malá tepelně ovlivněná oblast a materiál je mnohem méně narušován tepelnými deformacemi. Dalšími výhodami laserového svařování jsou vysoká pevnost, malý čistý svar, vysoká postupová rychlost a možnost svařovat materiály, které mají velmi rozdílnou teplotu tavení. Podle hustoty výkonu svazku rozdělujeme laserové svařování na kondukční a penetrační, viz obr. 25.

U kondukční metody se pohybuje hustota výkonu svazku do  $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Laserovým svazkem je lokálně nataveno místo svaru a vytváří se svarová lázeň, kde se promíchávají svařované materiály a dochází ke vzniku svarového spoje. Svar má malou hloubku a je velmi hladký, což je vhodné pro výrobu elektronických součástí. U penetrační metody je hustota výkonu svazku kolem  $10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Laserový svazek lokálně taví místo svaru až dochází k odpaření materiálu a vytvoření dutiny (tzv. keyhole), jejíž stěny jsou tvořeny roztaveným materiálem, který postupně zaplňuje dutinu za laserovým svazkem. Vzniklý svar vykazuje vysokou štíhlost. V dnešní době se dosahuje hloubky průvaru do 50 mm.



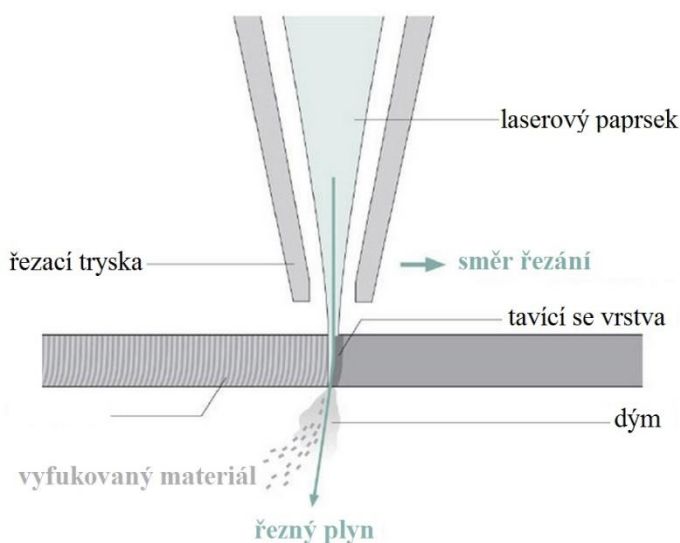
Obr. 25 Metody laserového svařování  
a) kondukční b) penetrační [50]

### → Řezání laserem

Při laserové řezání je materiál zahříván, dokud se nezačne tavit a paprsek nepronikne celou tloušťkou materiálu. Po proniknutí začíná paprsek kopírovat obrys řezu a plynule taví materiál. Řezný plyn proudící z řezací trysky do místa řezu odstraňuje roztavený materiál směrem ven, viz obr. 26.

Výhodou je úzký, přesný a hladký řez bez okují. Řezání má širokou rozmanitost, lze řezat od miniaturních elektronických komponentů s mikrometrovou přesností až po kvalitní řez ocelového plechu o tloušťce 30 mm.

Laserové řezání je rozděleno na řezání **sublimační** – většina celkového objemu odstraňovaného materiálu je odpařována, **tavné** – odstraňovaný

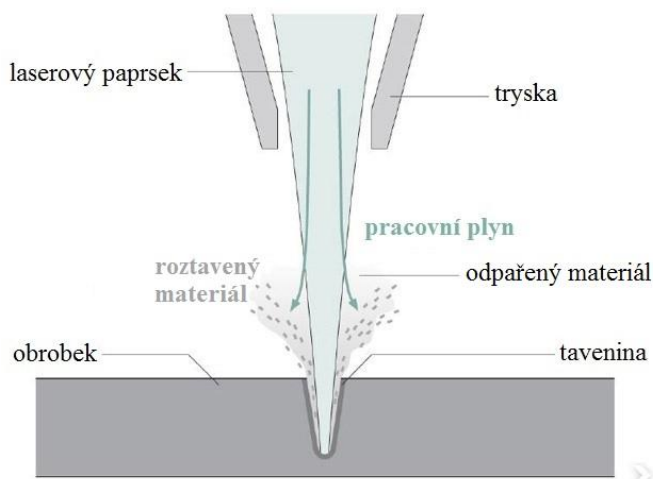


Obr. 26 Princip řezání laserem [53]

materiál je roztaven a vyfukován z místa řezu a **pálením** – materiál je ohřán na teplotu hoření a s reaktivním plynem (např. kyslíkem) způsobí exotermní reakci (tj. *chemická reakce, při níž je energie uvolňována ve formě tepla*), materiál začne hořet a proudící řezný plyn vyfouká vzniklý odpad – strusku. Pro laserové řezání jsou nejběžnější CO<sub>2</sub>, vláknové a diskové lasery.

### → Vrtání laserem

Laserové vrtání je používáno už řadu let. Principem je odstraňování materiálu odpařováním. Jsou používány lasery pracující v pulsním režimu s délkou pulzu do 1 ms. Pro délku pulzu platí, že čím je doba pulzu kratší, tím je díra přesnější. Krátký pulz s vysokou hustotou výkonu dodává do obrobku energii ve velmi krátké době. Následkem toho dochází k tavení a odpařování materiálu a vzniká dutina „keyhole“. V dutině dochází k absorpci mnohonásobných dopadů záření a dutina se prohlubuje. Odtavený materiál se z otvoru dostává pomocí vysokého tlaku páry, který v dutině vzniká při odpařování, viz obr. 27.



Obr. 27 Princip vrtání laserem [54]

Laserové vrtání lze použít mimo kovů, také na plasty, dřevo, textil, sklo, keramiku a další materiály. Výhodami této technologie je vrtání velmi malých otvorů (od 0,1 mm), vysoká rychlost a přesnost, rychlé chladnutí, možnost vrtat v těžce dostupných místech, kde je to konvenčními metodami nemožné.

### → Navařování

Navařování (obr. 28) je obnovující metoda. Při této technologii se taví na povrchu součásti prášek nebo drát a i samotný materiál navařované součásti. Díky tomu dochází mezi nanášeným povlakem a materiálem součásti k difuznímu přechodu. Následkem toho vzniká mezi povlakem a součástí velmi dobrá koheze (*soudržnost*) a adheze (*přilnavost*). Na opravu součástí nebo k vylepšení jejich povrchů, lze nanášet velké množství materiálů (keramika, různé kovy, kompozity). Na závěr následují obráběcí operace k dosažení původního tvaru.

Laserové navařování je rozděleno na manuální a automatické. U manuálního navařování je přídavným materiálem drát, který je naveden na místo navaření ručně. U automatického navařování může být přídavným materiálem také drát, ale ve většině případů se používá kovový prášek. Přídavný materiál je nanášen strojně ve vrstvách a bez pórů.



Obr. 28 Navařování povlaku pro zvýšení životnosti diodovým laserem [56]

### 3 KALENÝ MATERIÁL [71] [72]

Pro povrchové kalení laserem byla zvolena litina ČSN 42 2430 (EN GJL 300). Jedná se o klasickou litinu s lupínkovým grafitem (šedá litina), kde základní materiál tvoří perlit. Její chemické složení a mechanické vlastnosti jsou zobrazeny v tabulkách 2 a 3.

Tab. 2 Chemické složení

Chemické složení [%]					
C	Si	Mn	S	P	Cu
3,0 ± 0,05	1,4 – 1,6	0,9 – 1,1	max. 0,06 – 0,12	max. 0,12	0,8 – 1,2 %

Tyto prvky mají vliv na grafitizaci při tuhnutí eutektika a dělí se na:

- **Grafitizační** – Si (*nejdůležitější*), Cu, C, P  
→ Přispívají k tuhnutí dle stabilního systému a vylučují uhlík jako grafitické eutektikum.
- **Antigrafitizační** – S  
→ Přispívají ke vzniku metastabilního eutektika – ledeburitu.
- **Neutrální** – Mn

Tab. 3 Mechanické vlastnosti [72]

Mechanické vlastnosti			
R <sub>p0,1</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	E [GPa]
195 - 260	300 - 400	0,8 – 0,3	108 – 137

Litina je v některých případech nenahraditelný materiál, ať už kvůli nižší ceně (neobsahuje drahé legury), tlumícím vlastnostem nebo že ji lze snadno obrábět. Aby daná litina odolala vyšším požadavkům, je vhodné namáhaná místa, jako např. rádiusy licích a lisovacích forem nebo pojezdové plochy obráběcích strojů povrchové kalit. Ovšem kalení litiny není jednoduché kvůli různorodé struktuře a hrubým zrnům v materiálu. Důležité je dodržet správnou kalicí teplotu, neboť má velký vliv na strukturu a vlastnosti. Po zakalení pak vzniká materiál s vysokou tvrdostí díky karbidickému eutektiku, má dobré kluzné vlastnosti přítomností grafitu, pevný díky vyskytujícímu se martenzitu a zároveň houževnatý kvůli podílu austenitu.

Povrchové kalení litiny je vhodné pro odlitky kladek, vahadel, litinových forem a dalších litinových součástí, kde je povrch v určitých místech nadměrně namáhan.

#### 3.1 Zkoušky tvrdosti [57] [60]

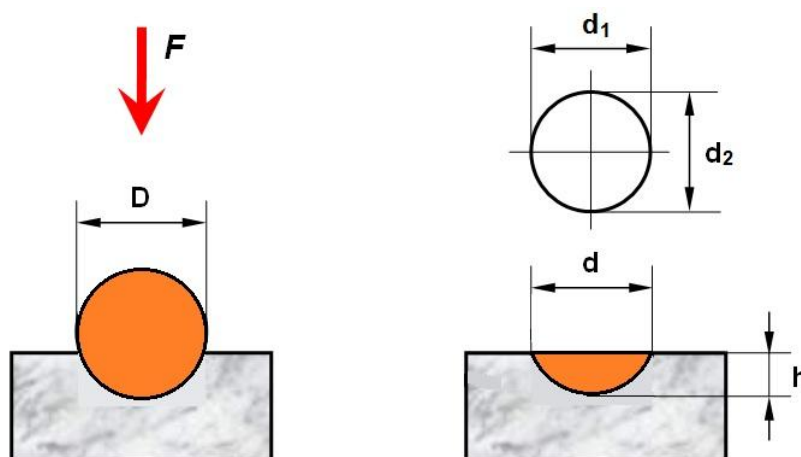
Zkoušky tvrdosti jsou nejpoužívanějšími zkouškami kovů a dalších druhů materiálů. Tvrdost je charakterizována jako vlastnost materiálu, která mu umožňuje se bránit před plastickou deformací. Nicméně jako tvrdost také bereme odolnost v ohybu, tahu, proti otěru a další. Zkoušky na měření tvrdosti jsou děleny na vnikací a odrazové. Jedná se o nedestruktivní zkoušky, neboť ovlivnění funkčnosti součásti je většinou zanedbatelné.

V této práci je materiál hodnocen zkouškou vnikací a tak zde bude pojednáno o staticko-plastických zkouškách tvrdosti podle Brinella, Vickerse, Rockwella a Knoop, které využívají zatěžovacího tělesa tzv. indentoru. U zkoušek podle Brinella, Vickerse a Knoop je hodnota tvrdosti hodnocena podle plastické deformace a u Rockwella je hodnocena podle elasticko-plastické deformace.

### 3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella [57] [58] [59]

Hlavním principem této zkoušky je zatláčování zkušební tělesa – indentoru, tj. ocelové kalené kuličky nebo kuličky o průměru  $D$  do zkoušeného povrchu tělesa přesně definovanou silou  $F$ . Používané hodnoty průměru jsou  $D = 1; 2; 2,5; 5$  a  $10$  mm. Průměr kuličky je volen dle tloušťky měřeného materiálu. Hodnota síly, která se používá, se pohybuje v rozmezí od  $9,8$  N do  $29,42$  kN a doba působení síly je od  $10$  s do  $15$  s.

Po provedení zkoušky se změří hodnoty  $d_1$  a  $d_2$  v provedeném vtisku, viz obr. 29 a z těchto hodnot je vypočten aritmetický průměr  $d$ .



Obr. 29 Zkouška dle Brinella [58]

V České republice pro tuto zkoušku platí norma ČSN EN ISO 6506 – 1, ve které je podle zprůměrované hodnoty  $d$  a použité zatěžovací síly  $F$  odečtena velikost tvrdosti z tabulek v normě. Tvrdost můžeme také vypočítat dle vztahu (1).

$$HB = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

kde:  $F$  [N] – zatěžovací síla,  
 $D$  [mm] – průměr kuličky,  
 $d$  [mm] – aritmetický průměr vtisku.

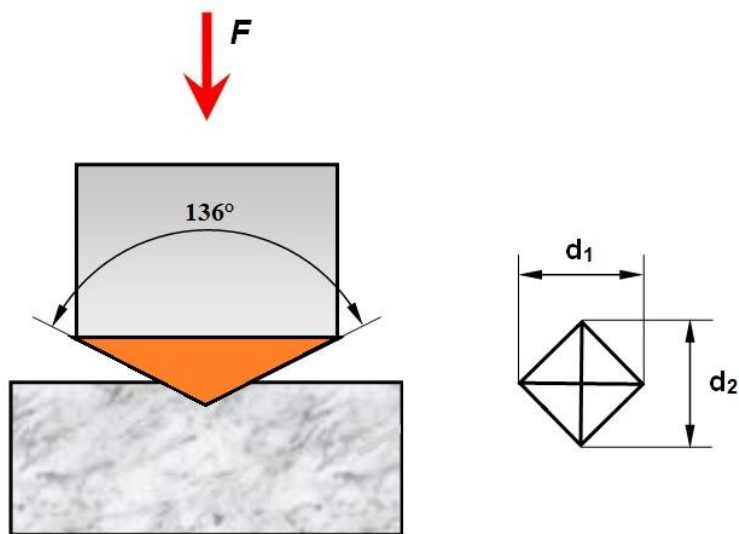
Příklad zápisu naměřené tvrdosti je následující **500HB 5/750** – (**500** – naměřená tvrdost, **HB** – měřeno metodou podle Brinella, **5** – průměr kuličky v mm a **750** – velikost použitého zatížení v kg (7355 N))

Hlavní předností zkoušky je, že povrch nemusí být úplně hladký, na větších součástích lze měřit tvrdost v provozu. Zkouška je používána pro měkké a nehomogenní materiály.

### 3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [58] [59]

Jedná se o velmi podobnou zkoušku jako je zkouška Brinellova. Odlišuje se pouze použitým vnikacím tělesem, kterým je v tomto případě diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ , který je vtlačován do povrchu materiálu zkušebním zatížením  $F$  v kolmém směru po stanovenou dobu. Po provedení vtisku jsou změřeny

úhlopříčky vtisku  $d_1$  a  $d_2$ , viz obr. 30 a je opět vypočten aritmetický průměr  $d$ . Pro správné provádění vtisků musí být dodrženo pravidlo, že vzdálenost vtisku od okraje a mezi vtisky musí být ve vzdálenosti 2,5krát větší než střední hodnota úhlopříčky vtisku, jinak by mohlo dojít k ovlivnění určované hodnoty tvrdosti.



Obr. 30 Zkouška dle Vickerse [58]

Pro tuto zkoušku se uplatňuje norma ČSN EN ISO 6507 – 1, kde podle použité zatěžovací síly  $F$  a aritmetického průměru  $d$  vyhledáme odpovídající hodnotu tvrdosti. Tvrdost podle Vickerse lze také spočítat vztahem (2), jako poměr působící síly k ploše vtisku.

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

kde:  $F$  [N] – zatěžovací síla,  
 $d$  [mm] – aritmetický průměr úhlopříček vtisku,  
 $\alpha$  [°] – vrcholový úhel vnikacího tělesa (jehlanu),  
konstanta [-] –  $0,102 = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,807}$ .

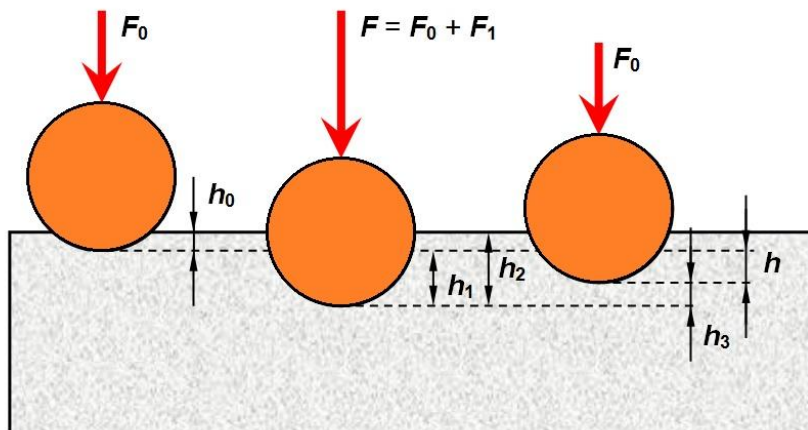
Příklad zápisu naměřené hodnoty tvrdosti vypadá takto: **600HV5** – (600 – naměřená tvrdost, **HV** – měřeno metodou podle Vickerse, **5** – použité zatížení v kg (49,05 N))

Výhodou Vickersovy zkoušky je malá povrchová deformace, jelikož vzniká pouze malinkatý vtisk. Zkouška je vhodná pro tvrdé homogenní materiály. U heterogenních materiálů hrozí ovlivnění naměřené tvrdosti, jelikož plocha vtisku je velmi malá a hrozí zasáhnutí jiných struktur.

### 3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella [57] [58] [61]

U Rockwellovy zkoušky vlačujeme do zkoušeného tělesa, buďto ocelovou kalenou kuličku o průměru 1,5875 mm nebo 3,175 mm nebo diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a poloměr špičky 0,2 mm. Průběh zkoušky se zde liší. Nejdříve je zatížen zkoušený povrch předběžným a pak hlavním zatížením. Důvod provedení předběžného zatížení je

vyloučení nerovností na povrchu. Předběžným zatížením je proveden vtisk do hloubky  $h_0$ , po vytvoření vtisku je vynulováno zařízení měřící hloubku vtisku a přidá se přidavné (hlavní) zatížení a vtisk je prohlouben o  $h_1$  do hloubky  $h_2$ , viz obr. 31. Po dokončení vtisku se odečte hodnota  $h$  přímo z tvrdoměru.



Obr. 31 Zkouška dle Rockwella [58]

Zkouška se řídí dle normy ČSN EN ISO 6508 – 1, ta rozděluje dobu působícího hlavního zatížení, viz tab. 4.

U Rockwella je používána řada stupnic tvrdosti, které se dělí dle použitého indentoru zatížení a měřícího rozsahu.

U nás jsou nejběžnější stupnice A, B, C.

**HRA** – tvrdost provedena při zatěžovací síle 588,4 N diamantovým kuželem,

**HRB** – tvrdost provedena při zatěžovací síle 980,7 N ocelovou kuličkou,

**HRC** – tvrdost provedena při zatěžovací síle 1471 N diamantovým kuželem.

Tab. 4 Závislost plastické deformace na čase [57]

Doba zatěžování [s]	Závislost plastické deformace
1 až 3	materiál nevykazuje závislost
1 až 5	materiál vykazuje omezenou závislost
10 až 15	materiál vykazuje silnou závislost

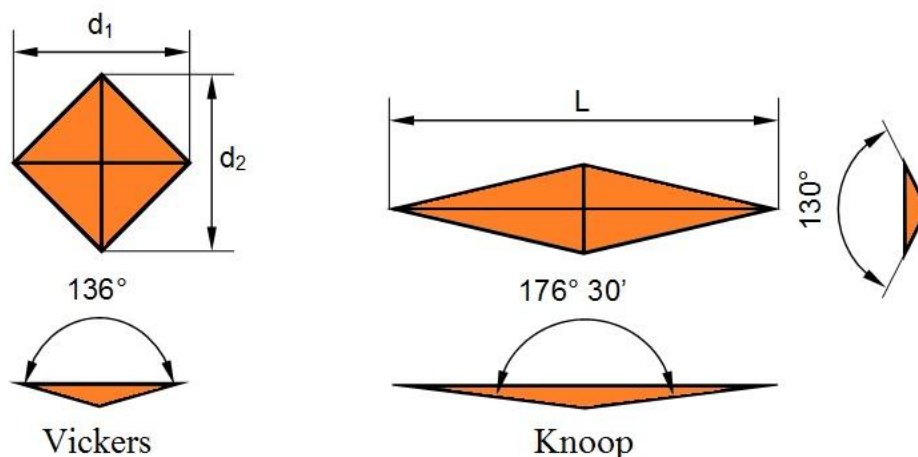
Příklad zápisu naměřené hodnoty tvrdosti vypadá takto: **62 HRC** – (**62** – naměřená tvrdost, **HR** – měřeno metodou podle Rockwella, **C** – měřeno na stupnici C)

Výhodou zkoušky je její praktičnost a rychlost, hodnotu tvrdosti odečítáme rovnou z tvrdoměru a nemusíme hledat v tabulkách jako u Brinella či Vickerse.

### 3.1.4 Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse a Knoop [58] [59]

Tyto zkoušky jsou používány pro hodnocení malých předmětů, tenkých vrstev, kalených materiálů, svarů nebo na metalografických výbrusech pro měření jednotlivých strukturních složek a fází. Jako vnikací těleso je zde používán diamantový indentor tvaru čtyřbokého jehlanu. Vickers používá jehlan se čtvercovou podstavou a Knoop jehlan s kosočtvercovou podstavou, viz obr. 32 U těchto zkoušek je součástí metalografický mikroskop propojený

s PC. Indentor je upevněný místo běžného objektivu. Po dokončení vtisku se zaostří struktura a pomocí měřicího okuláru je změřen provedený vtisk.



Obr. 32 Vtisk dle Vickerse a Knoopa [58]

Průběh a vyhodnocení zkoušky mikrotvrdomosti podle Vickerse je stejný jako u vyhodnocení makrotvrdomosti, viz kap. 3.1.2. Jen se používají menší zatěžovací síly.

U měření mikrotvrdomosti podle Knoopa je změřena délka **L** a výsledná tvrdost je dopočítána dle vztahu (3).

$$KHN = \frac{F}{0,07028 \cdot L^2} \quad (3)$$

kde:  $F$  [N] – zatěžovací síla,  
 $L$  [mm] délka vtisku.

### 3.2 Makroskopické zkoušky [79]

Při makroskopických zkouškách jsou na připravené ploše materiálu pozorovány detaily pouhým okem, pomocí lupy nebo mikroskopem při malém zvětšení. Většinou je povrch vzorku broušen, leštěn a případně naleptán. Při těchto zkouškách se zejména sledují vady materiálu, chemická nestejnorodost a makrostruktura. Na výbrusech v neleptaném stavu jsou hodnoceny nečistosti, jako jsou trhliny, praskliny, póry, dutiny, vměstky.

Pozorováním makrostruktury se vyhodnocuje jakost jednotlivých způsobů tepelného zpracování. Lze tak například stanovit hloubku a rovnoměrné rozložení povrchové vrstvy po povrchovém kalení, cementování, nitridování apod.

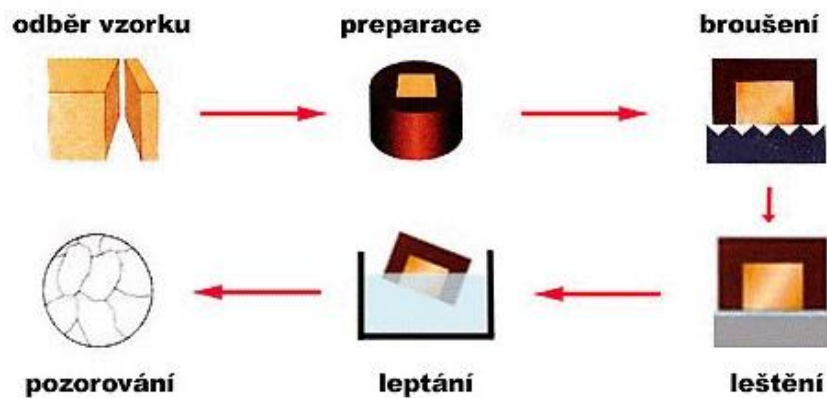
### 3.3 Mikroskopické zkoušky [79] [80]

Mikroskopické zkoumání struktury materiálu nám pomáhá zhodnotit jakost výroby materiálů a jejich zpracování (tváření, tepelné zpracování). Je posuzováno, zda je materiál pro danou aplikaci vhodný a pomáhá objasňovat rozsah a příčiny různých vad.



Pro pozorování mikrostruktury je zásadní správná příprava vzorku. Přípravou se rozumí odběr a označení vzorku (v případě malých rozměrů je vzorek zalisován), dále jeho broušení, leštění a leptání (vyvolání struktury), viz obr. 33.

Odběr vzorku musí plně charakterizovat vyhodnocovaný materiál. Musí být brán ohled na způsob dělení vzorku, aby nebyl tepelně ovlivněn ani nijak tvářen (obrábění tupým nástrojem). Broušení vzorku je prováděno od nejhrubších brusných papírů po brusné papíry s nejjemnější zrnitostí. Leštění se provádí mechanicky, elektrolyticky nebo chemicky. Na leštěném vzorku už lze pozorovat některé detaily, jako např. vměstky, póry, mikrotrhliny, u litin pak tvar, množství a uspořádání grafitu apod. Pro zviditelnění podrobnějších informací se provádí leptání. Leptáním lze zviditelnit jednotlivá zrna strukturních složek. Nejčastěji se používá chemického leptání, které odstraňuje tzv. Beilbyho vrstvu, která vzniká při broušení a leštění a zkresluje skutečnou strukturu materiálu.



Obr. 33 Příprava metalografického výbrusu [80]

## 4 EXPERIMENT

V následující kapitole budou postupně popsána jednotlivá zařízení, která byla při kalení a vyhodnocení litiny použita. Vzorky byly zakaleny, poté rozřezány, zalisovány, broušeny, leštěny a naleptány. Pomocí mikroskopu byly vytvořeny snímky makro- a mikrostruktury a nakonec zjištěny tvrdosti na jednotlivých vzorcích.

### 4.1 Použité zařízení [62] [63] [73] [74] [75] [76] [77] [78]

Pro povrchové kalení byl použit polovodičový laser s max. výkonem 6 kW. Laser byl vybaven laserovou kalící hlavou, která byla uchycena k ramenu manipulačního robota. Zakalené vzorky byly řezány na laboratorní pile a pomocí lisu a leštičky připraveny k vyhodnocení tvrdosti a struktury.

#### → Polovodičový laser

Jedná se o polovodičový laser od firmy Laserline typ LDF 6000 – 100 o výkonu 6 kW, viz obr. 34. Laser disponuje optickým vláknem průměru 600  $\mu\text{m}$ , které je propojeno do laserové hlavy. Velikost rozměru optického vlákna určuje vhodnost pro navařovací nebo kalící operace. Parametry laseru jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5 Základní technické parametry [73]

Technické parametry	Laser LDF 6000 – 100
Mínimální kvalita paprsku	40 mm · mrad
Rozsah vlnové délky	min. 900 nm – max. 1070 nm
Optické vlákno	600 $\mu\text{m}$
Výstupní výkon	6000 W
Účinnost	45 %
Teplota okolí při prac. režimu	10 – 45 °C
Rozměry (d x š x v)	950 x 770 x 1700 mm <sup>3</sup>
Hmotnost	600 kg



Obr. 34 Polovodičový laser ve společnosti Fermat v Brně [74]

### → Průmyslový robot

Typ manipulačního robota, který vlastní společnost Fermat, je M-710iC/50, viz obr. 35. Poskytuje manipulační možnosti v 6 stupních volnosti a jedná se o nejrychlejší robot ve své třídě s vysokým momentem setrvačnosti zápěstí. Další technické parametry jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6 Základní technické parametry [62]

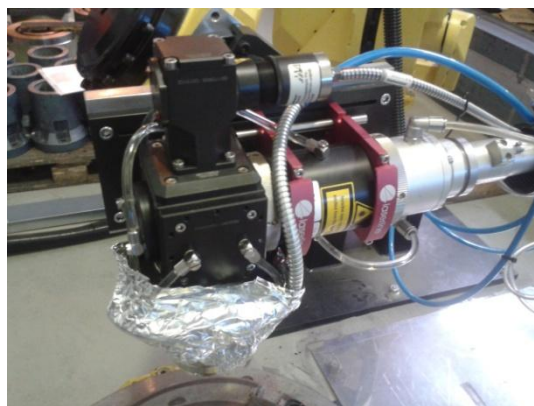
Technické parametry	FANUC M-710iC/50
Stupňů volnosti	6
Nosnost zápěstí	50 kg
Dosah	2050 mm
Opakovatelná přesnost	$\pm 0,07$ mm
Hmotnost	560 kg



Obr. 35 Průmyslový robot FANUC [62]

### → Laserová kalící hlava

Na průmyslový robot je uchycena flexibilní modulární kalící hlava, viz obr. 36. Díky modulové konstrukci je zaručena flexibilita pro různé požadavky na technologii. Hlava je vybavena senzory řídicí proces výroby. Pyrometrem, který kontroluje výkon laseru a teplotu, CCD kamerou, která umožňuje bezpečné sledování procesu na monitoru počítače a procesní optikou, která umožňuje tvarovat paprsek do téměř jakéhokoliv geometrického tvaru.



Obr. 36 Laserová kalící hlava

### → Laboratorní pila

Zakalená litina byla rozřezána na laboratorní pile MIKRON 110 (obr. 37), která umožňuje dělení vzorků bez tepelného narušení, díky vodnímu chlazení řezného kotouče. Základní technické parametry uvádí tabulka 7.

Tab. 7 Základní technické parametry [63]

Technické parametry	Mikron 110
Napájení	24 V, 435 W
Rychlost řezu	$1 - 2 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$
Otáčky	$500 - 4000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
$\Phi$ řezného kotouče	160 mm
Hmotnost	42 kg



Obr. 37 Laboratorní pila [63]

### → Elektrohydraulický lis

Na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky byly vzorky zalisovány elektrohydraulickým lisem CitoPress-1 firmy Stuers (obr. 38), do tvaru válečků (obr 40.) pro lepší manipulaci a správné uchycení při následující operaci. Celý lisovací proces probíhá 5 min za teploty 180 °C při tlaku 300 barů. Jako lisovací hmota byla používána termoplastická akrylátová pryskyřice Multifast.

### → Metalografická leštička

Dále bylo provedeno leštění na metalografické leštičce Tegramin-20, viz obr. 38. Cílem je dosáhnout vysoce reflexního povrchu pro vyhodnocení struktury na mikroskopu. Pro leštění jsou používány pasty nebo suspenze s diamantovými částicemi.



Obr. 38 Elektrohydraulický lis (vlevo) a metalografická leštička (vpravo) [76]

### → Mikroskop

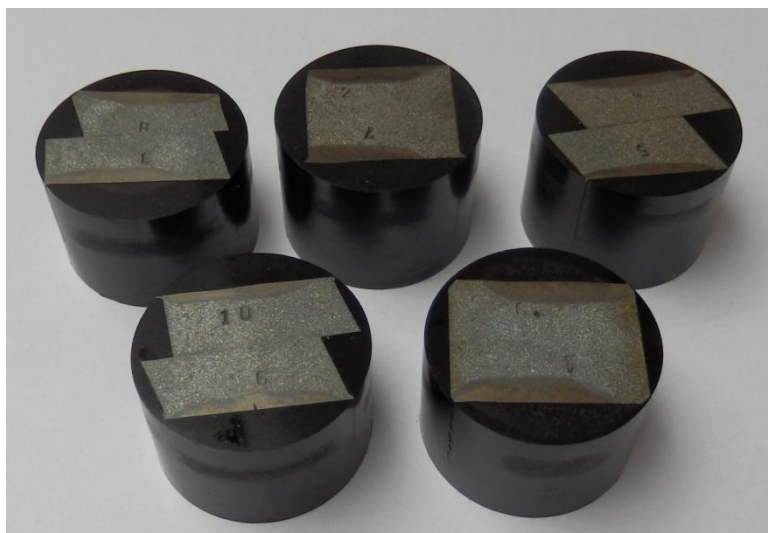
Pro nafocení vzorků (obr. 40) byl používán konfokální mikroskop Olympus LEXT 3100, viz obr. 39. Principem konfokálního mikroskopu je, že netvoří obraz najednou, ale bod po bodu, řádkováním. Dokáže pořídit snímky jak ve 2D tak i ve 3D s vysokou přesností. Jeho základní technické parametry jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8 Základní technické parametry [77]

Technické parametry	LEXT OLS 3100
Rozlišení	0,12 $\mu\text{m}$
Max. výška vzorku	100 mm
Celkové zvětšení	120x až 14400x
Zorné pole	2560 x 2560 – 21 x 21 $\mu\text{m}$
Hmotnost	57 kg



Obr. 39 Mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 [78]



Obr. 40 Zalisované vzorky

→ **Tvrdoměr**

Na Ústavu strojírenské technologie bylo provedeno měření tvrdosti na tvrdoměru ZWICK 3212 obr. 41. Příklad slouží pro určení hodnoty tvrdosti podle Vickerse, dle normy ČSN EN ISO 6507-1, viz kapitoly 3.1.2 a 3.1.4. Při experimentu bylo zvoleno zatížení 5 kg.



Obr. 41 Tvrdoměr ZWICK 3212

## 4.2 Provedení experimentu

Experimentální část byla provedena ve společnosti Fermat v Brně, ve které bylo pomocí laserového pracoviště (obr. 42) zakaleno několik vzorků. Při kalení byl měněn výkon laseru a rychlost posuvu kalící hlavy. Tyto parametry byly testovány na vzorcích litiny ČSN 42 2430, kde bylo zjišťováno, jakých výsledků se dosáhne při zakalení.



Obr. 42 Laserové pracoviště

V následující tabulce 9 jsou uvedeny zvolené parametry u jednotlivých vzorků. Kalící zařízení umožňuje udržovat nastavenou teplotu povrchu, díky zpětnovazební smyčce řídicí aktuální výkon laseru dle nastavené teploty.

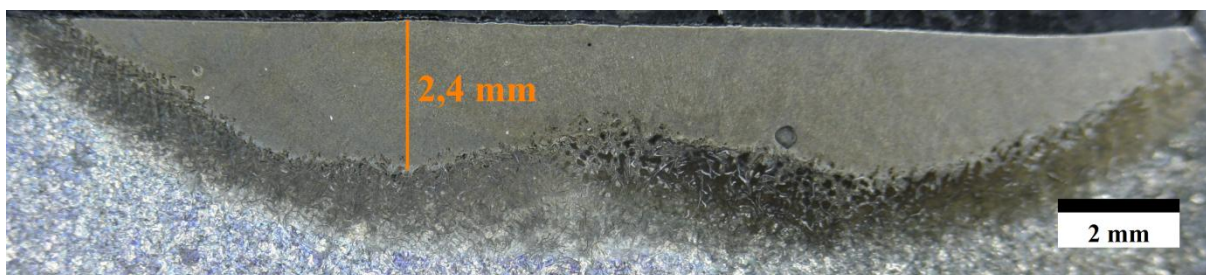
Pro vzorky 11 a 12 byly zvoleny tyto parametry. Vzorek 11 byl kalen rychlostí  $30 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  a vzorek 12 byl kalen rychlostí  $20 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  při stejné konstantní teplotě  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tab. 9 Nastavené parametry při laserovém kalení

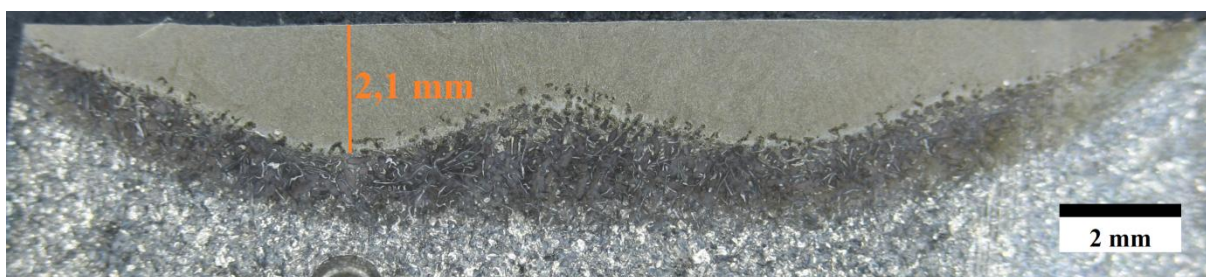
Číslo vzorku	Výkon laseru $P$ [kW]	Rychlost posuvu laserové hlavy $v$ [ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
1	5	10
2	5	15
3	5	20
4	5	25
5	5	30
6	6	15
7	6	20
8	6	25
9	6	30
10	6	35
11	-	$v = 30/\text{konst. teplota } 1200 \text{ }^\circ\text{C}$
12	-	$v = 20/\text{konst. teplota } 1200 \text{ }^\circ\text{C}$

### 4.3 Vyhodnocení makrostruktury [24]

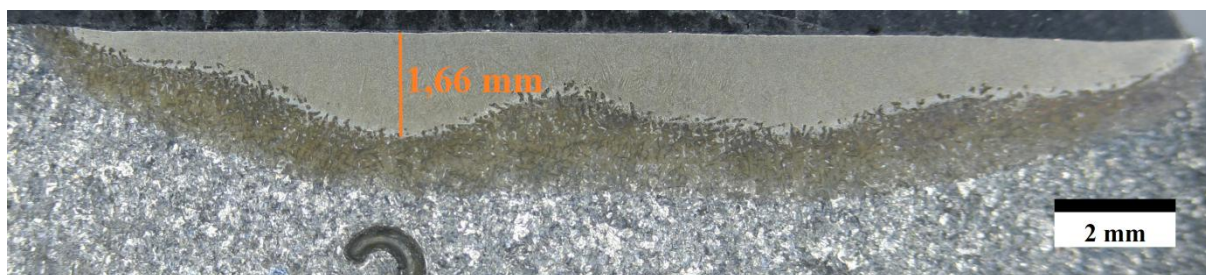
Pro posouzení kvality zakalené vrstvy po povrchovém kalení, byly pořízeny snímky makrostruktury (obr. 43 až 54). Ze snímků je zřejmý nepravidelný průběh prokalené oblasti, který napovídá, že kalení neproběhlo zcela optimálně. Příčinou onoho zvlněného průběhu by mohl být nekvalitní integrátor (homogenizer), který způsobil nehomogenní rozložení intenzity laserové stopy nebo nečistota na ochranném okénku. Ochranné okénko je umístěno na výstupu z laserové kalicí hlavy, které však není doplněno boční tryskou se stlačeným vzduchem, který by zajistil jeho průběžné čištění. Následkem toho se během experimentu u okénka zvýšila absorpce a došlo k nerovnoměrnému rozdělení výkonu na povrchu.



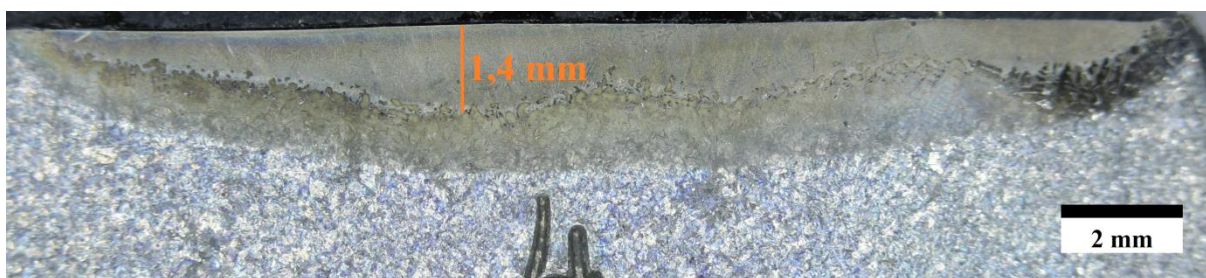
Obr. 43 Vzorek č. 1



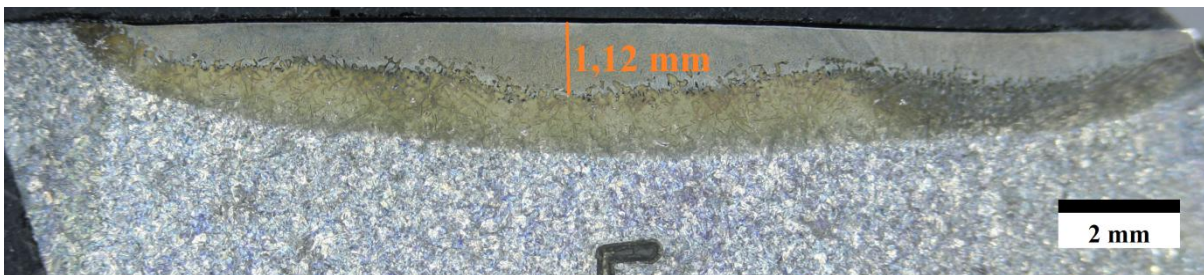
Obr. 44 Vzorek č. 2



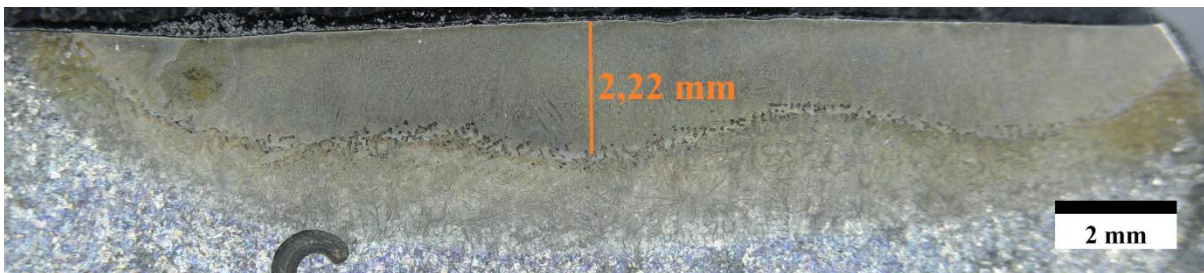
Obr. 45 Vzorek č. 3



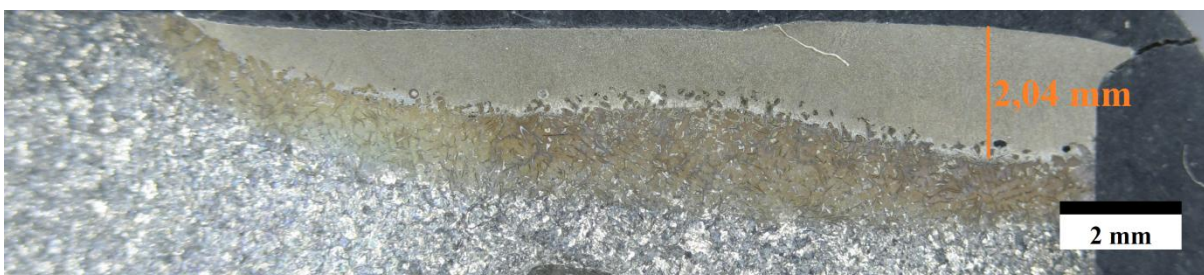
Obr. 46 Vzorek č. 4



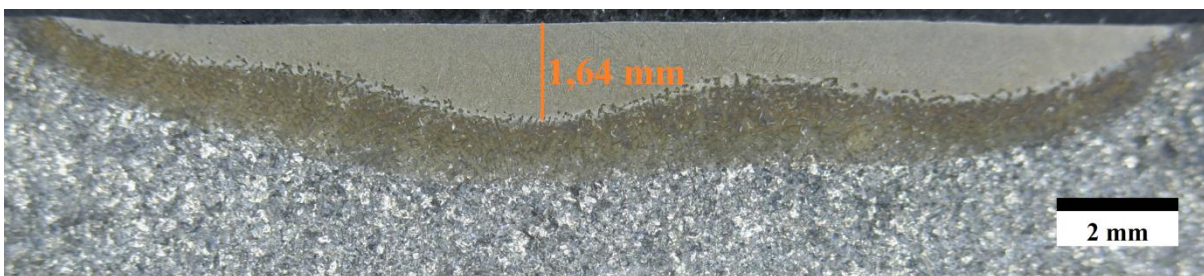
Obr. 47 Vzorek č. 5



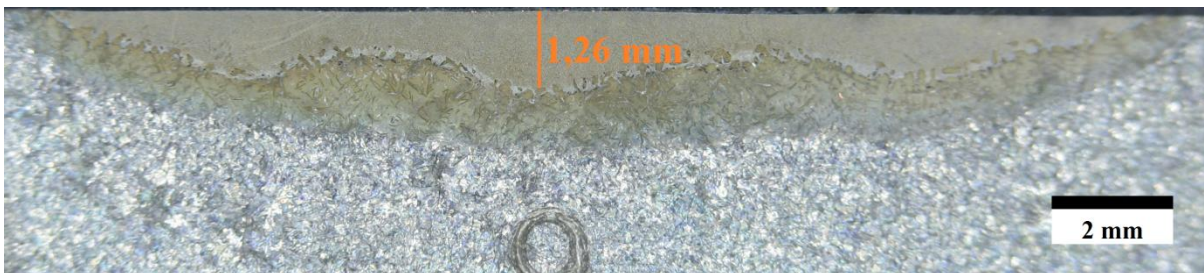
Obr. 48 Vzorek č. 6



Obr. 49 Vzorek č. 7



Obr. 50 Vzorek č. 8



Obr. 51 Vzorek č. 9





Obr. 52 Vzorek č. 10



Obr. 53 Vzorek č. 11



Obr. 54 Vzorek č. 12

Na jednotlivých snímcích byly orientačně změřeny největší hloubky prokalené oblasti a zaznamenány do tab. 10.

Tab. 10 Hloubka prokalené oblasti při zadaných parametrech

Číslo vzorku	Hloubka prokalené oblasti $h$ [mm]	Výkon laseru $P$ [kW]	Rychlost posuvu laserové hlavy $v$ [ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
1	2,4	5	10
2	2,1	5	15
3	1,66	5	20
4	1,4	5	25
5	1,12	5	30
6	2,22	6	15
7	2,04	6	20
8	1,64	6	25
9	1,26	6	30
10	1,22	6	35
11	-	-	$v = 30/\text{konst.}$ teplota $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
12	-	-	$v = 20/\text{konst.}$ teplota $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

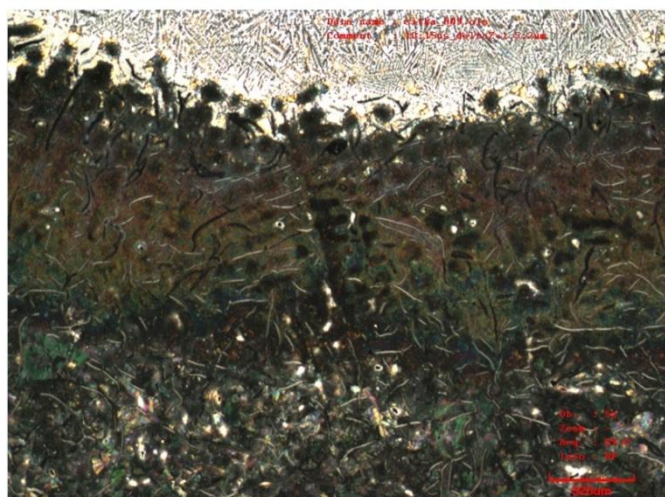
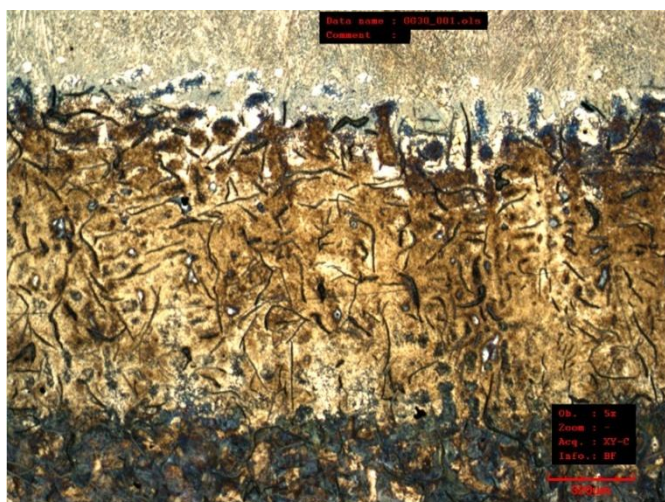
Porovnáním dosažených prokalených hloubek u výkonu 5 kW (tj. **2,4 mm až 1,12 mm**) a 6 kW (tj. **2,22 mm až 1,22 mm**) lze říci, že hodnoty hloubky jsou velmi podobné. Kdyby se u výkonu 6 kW nezačalo kalit na vyšších rychlostech, dosáhlo by se zřejmě větších prokalených hloubek. U vzorků 11 a 12 není viditelná žádná tepelně ovlivněná oblast. Z toho lze konstatovat, že režim výkonu pro dosažení konstantní teploty povrchu nepracuje korektně.

#### 4.4 Vyhodnocení mikrostruktury [81]

Vzorky pro vyhodnocení mikrostruktury byly naleptány leptadlem Nital (roztok kyseliny dusičné a etanolu), které se ale pro hodnocení snímku ukázalo jako nevhodné, viz dolní snímek na obr. 56. Nakonec bylo použito leptadlo Vilella Bain (roztok kyseliny pikrové, kyseliny chlorovodíkové a etanolu), kterým byla mikrostruktura zviditelněna mnohem lépe.

Ze snímků mikrostruktury bylo jednoznačně potvrzeno přetavení povrchu, neboť zde není přítomný grafit (vyskytuje se tu zákalka – bílá litina).

Struktury jednotlivých vzorků byly velmi podobné a tak byl pro analýzu vybrán vzorek číslo 6, kalený výkonem 6 kW při rychlosti  $15 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ , viz obr. 55



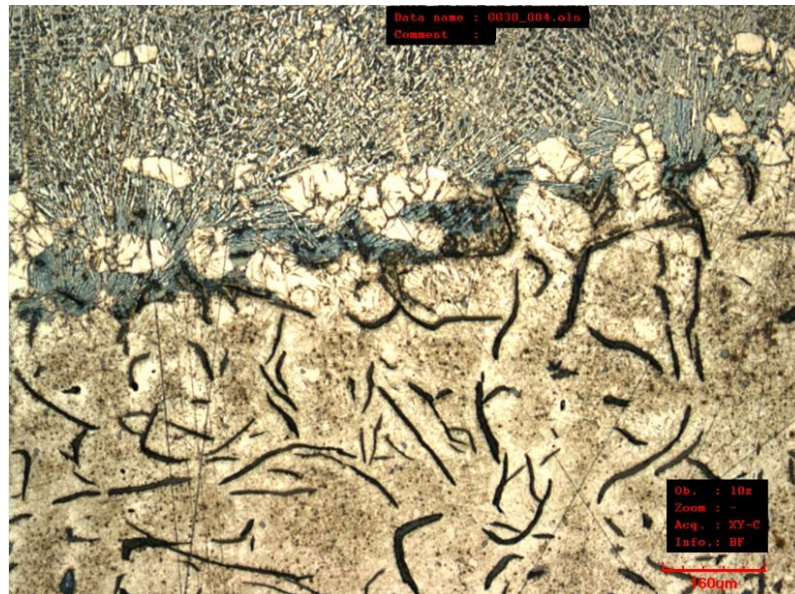
Obr. 56 Rozdíl leptadel na vzhled struktury



Obr. 55 Mikrostruktura celku u vzorku č. 6, při zvětšení 120x

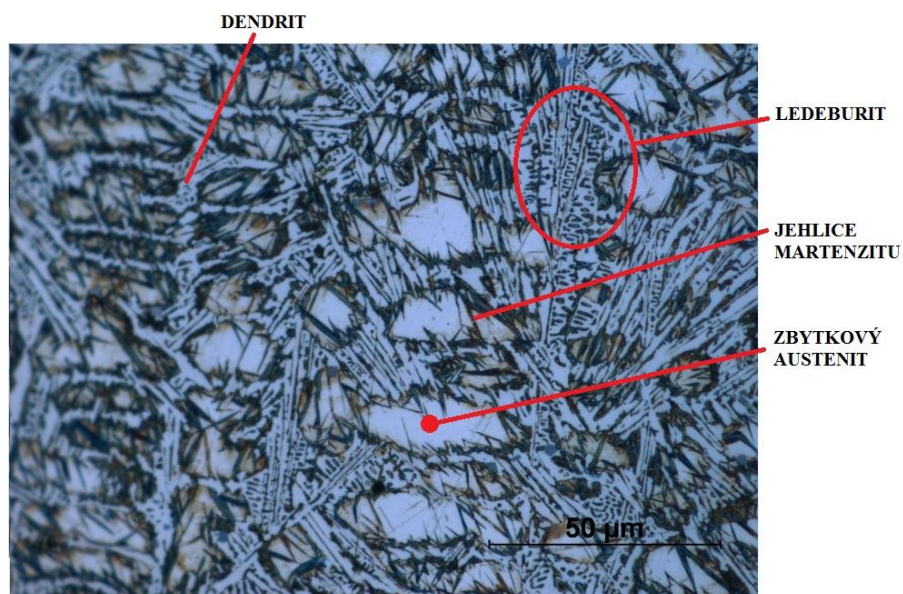
→ **Struktura vzorku číslo 6.**

Na následujícím metalografickém snímku (obr. 57) je zobrazen přechod vzniklé povrchové přetavené vrstvy a tepelně ovlivněné oblasti (TOO) při zvětšení 240x. V TOO je vidět lupínkový grafit, který směrem k povrchu mizí. To je způsobeno příliš vysokým ohřevem povrchu litiny, kde došlo k úplnému přetavení a následnému rozpuštění lupínků grafitu a vzniku struktury typu bílá litina.



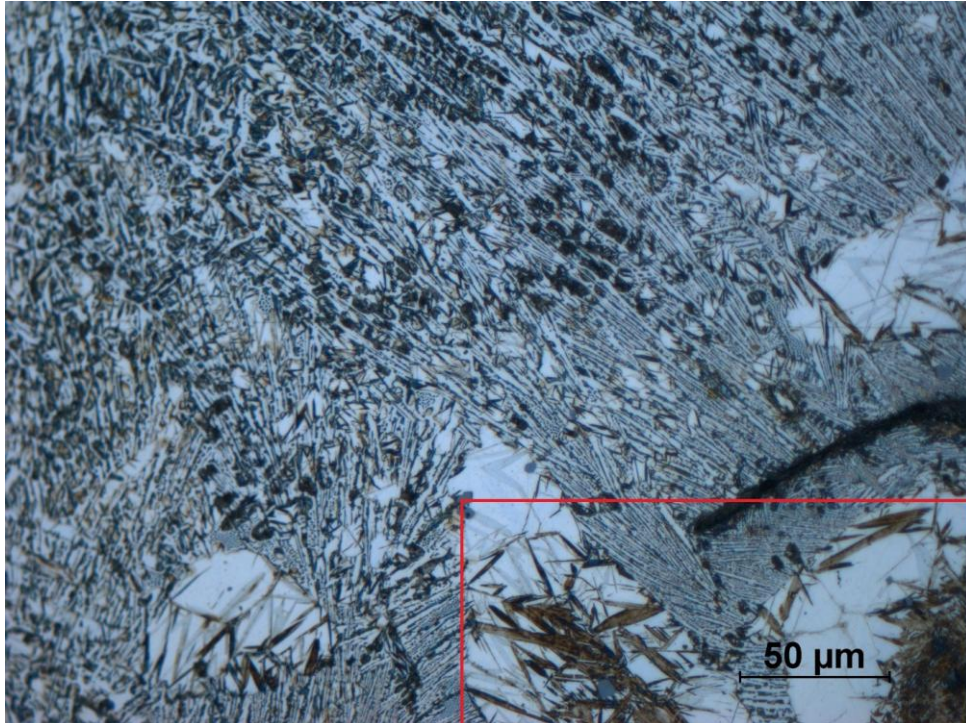
Obr. 57 Mikrostruktura přechodu přetavené a tepelně ovlivněné oblasti u vzorku č. 6

Rozpuštěním grafitických lupínků došlo k navýšení obsahu uhlíku a při ochlazení, které bylo velmi rychlé, došlo ke vzniku struktury odpovídající bílé litině s obsahem ledeburitu, vyplněného v meziprostorech martenzitem a zbytkovým austenitem. Zároveň došlo k částečnému zakalení struktury, jak poté zobrazuje obr. 59. Dále rychlým ochlazením austenitu vzniká výrazná dendritická struktura – výrazná primární osa s vedlejšími sekundárními a terciálními osami a typickým tvarem připomínající stromček, viz obr. 58.



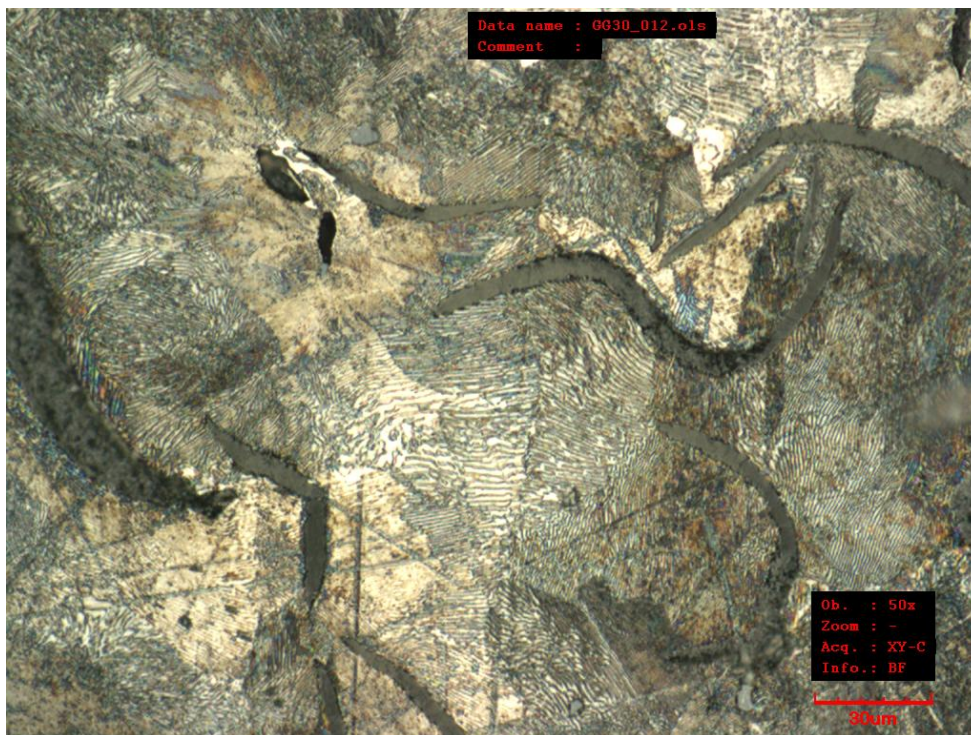
Obr. 58 Detail struktury bílé litiny, zvětšeno 1000x

Na metalografickém snímku (obr. 59) je vidět přetavená povrchová vrstva a tepelně ovlivněná oblast zvětšena 500x. V tepelně ovlivněné oblasti je ve vyznačené zóně vidět částečně zakalená martenzitická struktura s velkým podílem vyloučeného zbytkového austenitu, což značí velký obsah uhlíku a nízkou teplotu  $m_f$  (= teplota konce vzniku martenzitu).



Obr. 59 Struktura přechodu přetavená oblast a TOO, zvětšeno 500x

Na posledním metalografickém snímku je zobrazena tepelně nezpracovaná základní kovová matrice s perlitickou strukturou, viz obr. 60.



Obr. 60 Perlitická struktura litiny s lupínkovým grafitem

#### 4.5 Vyhodnocení tvrdosti

Tvrdot vzorků byla měřena metodou mikrotvrdoti podle Vickerse, při zatížení 5 kg. Vzorky musely být řádně vyleštěny, aby následné měření vtisku na monitoru bylo co nejpřesnější. Vtisky byly prováděny 0,5 mm od povrchu a dále po kroku 0,5 mm až do základního materiálu, jak znázorněno na obrázku 63. Naměřené tvrdosti u jednotlivých vzorků uvádí tabulka 11, kde modře je označena tvrdost přetavené povrchové vrstvy, zeleně tvrdost v tepelné ovlivněné oblasti a žlutě je označena tvrdost základního materiálu.

Tab. 11 Tvrdoti jednotlivých vzorků (část 1)

Číslo vtisku	Tvrdot při zatížení HV5 (F=49N)					
	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4	Vzorek č. 5	Vzorek č. 6
1	505	462	472	479	484	502
2	516	479	489	472	487	526
3	516	436	391	442	283	526
4	389	378	391	487	507	492
5	271	292	373	449	380	458
6	402	264	275	215	141	387
7	310	303	140	143	141	409
8	280	264	142	142	145	352
9	147	141	141	144	141	149
10	140	141	144	143	144	152

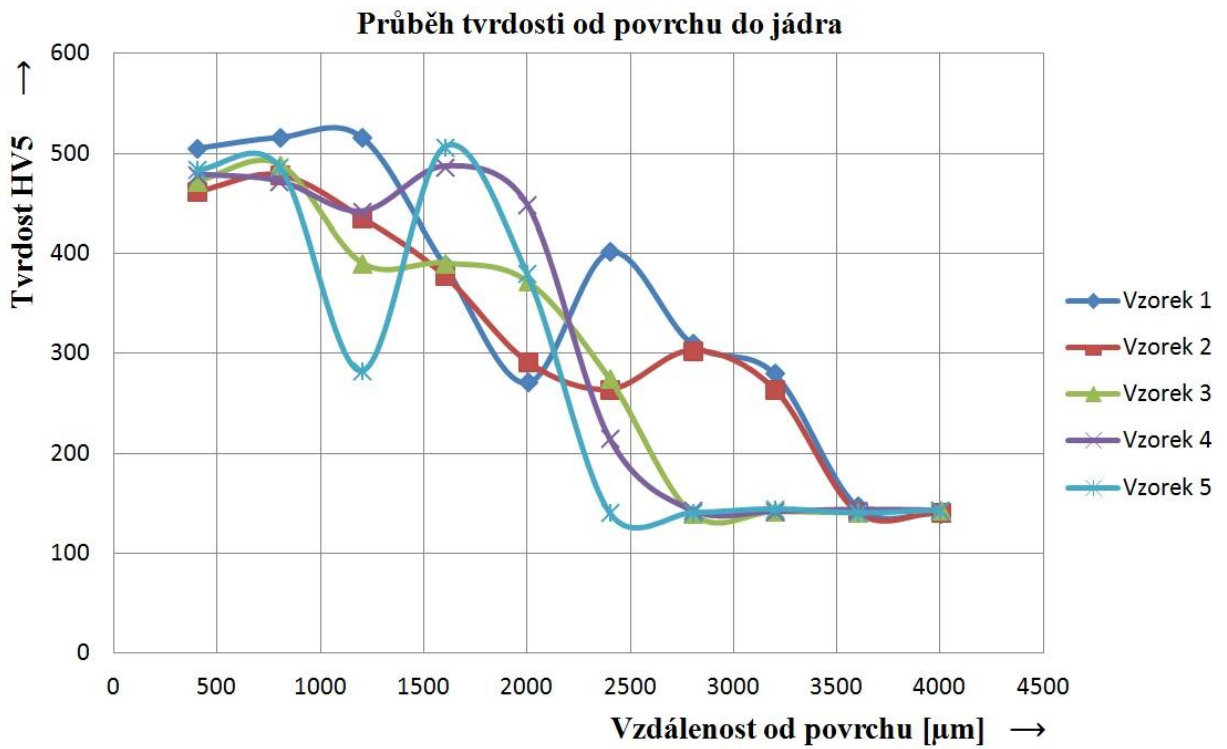
Tab. 11 tvrdosti jednotlivých vzorků (část 2)

Číslo vtisku	Tvrdot při zatížení HV5 (F=49N)					
	Vzorek č. 7	Vzorek č. 8	Vzorek č. 9	Vzorek č. 10	Vzorek č. 11	Vzorek č. 12
1	458	482	499	479	115	127
2	467	482	474	467	112	140
3	415	440	496	403	134	-
4	378	374	273	409	155	-
5	388	371	292	421	145	-
6	499	207	281	191	-	-
7	434	145	152	148	-	-
8	165	142	143	144	-	-
9	170	160	139	140	-	-
10	169	144	143	149	-	-

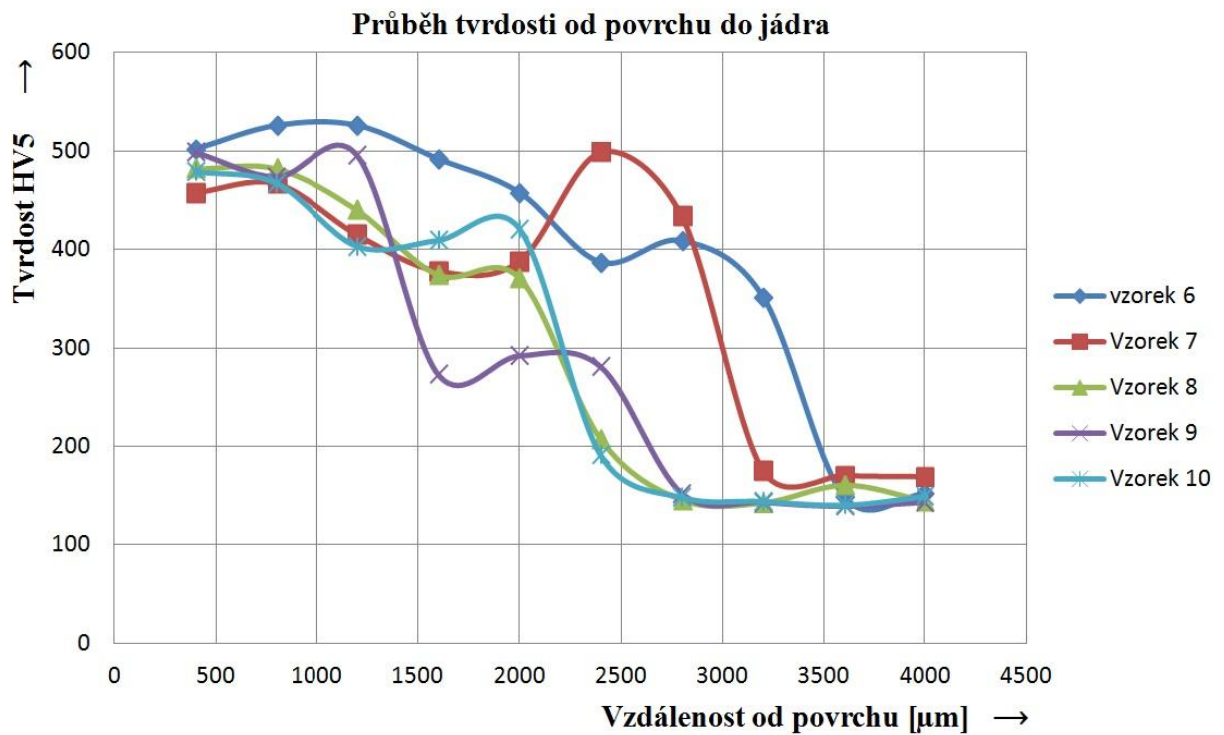
Legenda: U vzorků 11 a 12 nedošlo k zakalení.

Z tabulek je patrné, že největší tvrdost byla u vzorků číslo 1 a 6 (516 HV a 526 HV). Tyto vzorky byly kalené nejnižší rychlostí, při výkonu 5 kW a 6 kW. U ostatních vzorků se tvrdost pohybovala od 458 HV do 499 HV. U vzorků 4, 5, 6 a 9, je vidět i vyšší hodnota tvrdosti mimo přetavenou vrstvou, která potvrzuje lokální zakalenou strukturu v tepelně ovlivněné oblasti. Tvrdot u základního materiálu se pohybovala od 140 HV do 170 HV.

Průběh tvrdostí od povrchu do základního materiálu je následně zobrazen na obrázcích 61 a 62. Obr. 61 zobrazuje průběh tvrdostí při výkonu laseru 5 kW a rychlosti laserové hlavy od 10 do 30 cm·min<sup>-1</sup> a obr. 62 zobrazuje průběh tvrdostí při výkonu laseru 6 kW a rychlosti laserové hlavy od 15 do 35 cm·min<sup>-1</sup>.



Obr. 61 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu (vzorky 1 až 5)



Obr. 62 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu (vzorky 6 až 10)



Následně byla určena velikost specifického vneseného tepla  $Q_s$  dle vztahu (5). Před samotným výpočtem je třeba zvolit koeficient absorpce. Tento koeficient nejvíce závisí na stavu povrchu a teplotě součásti. S uvážením těchto hledisek byl pro výpočet zvolen koeficient 0,7 a hodnoty byly zapsány do tabulky 12.

Specifické vnesené teplo  $Q_s$

$$Q_s = \eta \cdot \frac{P}{1000 \cdot v} \quad (5)$$

kde:  $\eta$  [-] – koeficient absorpce,  
 $P$  [W] – výkonu laserového paprsku,  
 $v$  [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ] – rychlost posuvu laserové hlavy.

Tab. 12 Zvolené a vypočtené hodnoty

Číslo vzorku	Výkon laseru $P$ [kW]	Rychlost posuvu laserové hlavy $v$ [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	Hustota výkonu laserového paprsku $P_H$ [ $\text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]	Specifické vnesené teplo $Q_s$ [ $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ ]
1	5	1,67	83,33	2,10
2	5	2,5	83,33	1,40
3	5	3,33	83,33	1,05
4	5	4,16	83,33	0,84
5	5	5	83,33	0,70
6	6	2,5	100	1,68
7	6	3,33	100	1,26
8	6	4,16	100	1,01
9	6	5	100	0,84
10	6	5,83	100	0,72

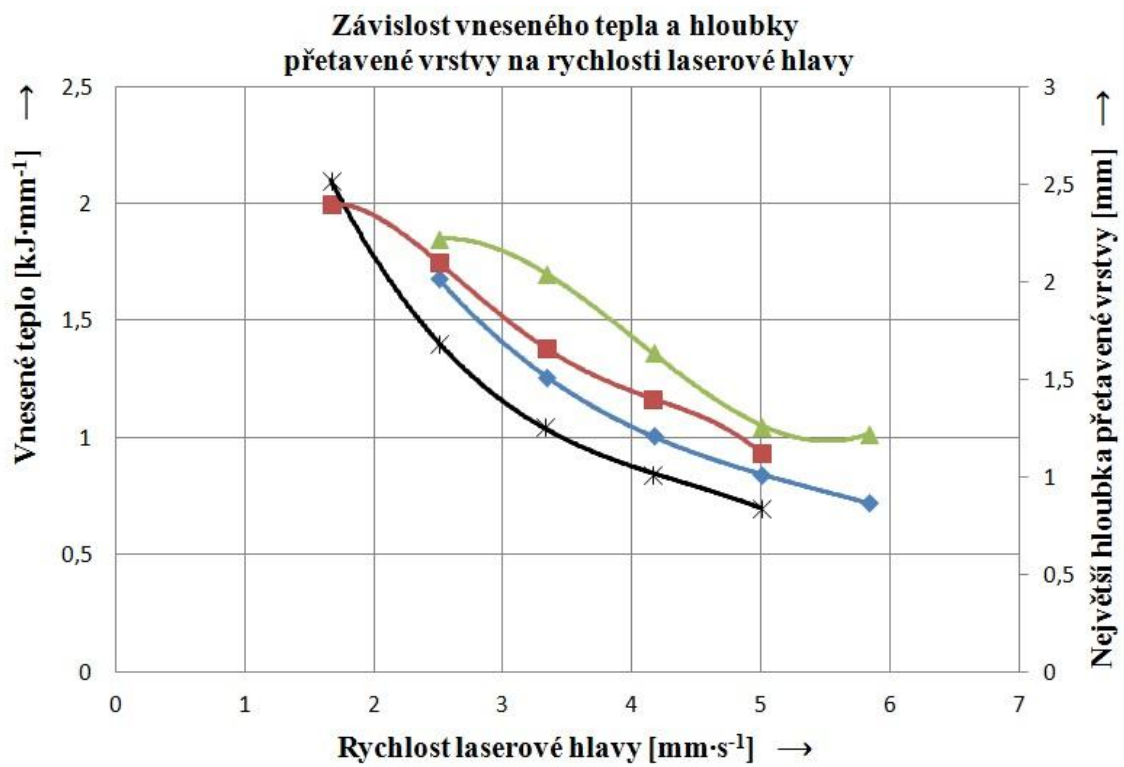
Příklad výpočtu pro vzorek 8

$$Q_s = \eta \cdot \frac{P}{v} = 0,7 \cdot \frac{6000}{1000 \cdot 4,16} = 1,01 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Z tabulky vyplývá, že hodnoty vneseného tepla jsou velmi podobné u obou použitých výkonů. Pro porovnání byl sestaven graf, do kterého byla zanesena společně hodnota vneseného tepla a dosažené hloubky přetavené vrstvy v závislosti na rychlosti laserové hlavy pro oba výkony, viz obr. 64. Černá křivka představuje průběh vneseného tepla při 5 kW a modrá při 6 kW na rychlosti laserové hlavy. Průběh hloubky přetavené vrstvy zobrazuje červená křivka pro výkon 5 kW a zelená pro výkon 6 kW. Jak se dalo předpokládat, průběhy s uvážením orientačního měření hloubky povrchové vrstvy a teoretického výpočtu vneseného tepla, jsou podobné.

Z toho plyne, že integrátor nebo jiný optický prvek nesnižoval účinnost laserového paprsku, ale pouze způsobil chybné rozložení hustoty výkonu v laserové stopě.





Obr. 64 Grafické srovnání průběhů vneseného tepla a hloubky přetavené vrstvy na rychlosti laserové hlavy

## 5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Moderní technologie kalení laserem umožňuje kalit vybrané části na součásti nebo nástroji. V dnešní době je vhodné používat výkonové polovodičové lasery. Ceny dokončovacích operací jsou maximálně minimalizovány nebo dokonce zcela odpadají. Součásti jsou ihned vhodné pro další použití.

Náklady na hodinu laserového kalení vychází kolem 2100 Kč·hod<sup>-1</sup>. Podle uvedené ceny je stanovena orientační cena za centimetr délky kalené litiny, viz tab. 13.

Tab. 13 Orientační cena centimetru kalené stopy

Číslo vzorku	Rychlost pohybu kalící hlavy $v$ [cm·min <sup>-1</sup> ]	Nejvyšší dosažená tvrdost přetavené vrstvy	Hloubka přetavené vrstvy $h$ [mm]	Cena za centimetr kalené stopy [Kč·cm <sup>-1</sup> ]
1	10	516	2,4	3,5
2	15	479	2,1	2,3
3	20	489	1,66	1,8
4	25	479	1,4	1,4
5	30	487	1,12	1,2
6	15	526	2,22	2,3
7	20	467	2,04	1,8
8	25	482	1,64	1,4
9	30	499	1,26	1,2
10	35	479	1,22	1,0

V tabulce jsou zobrazeny orientační ceny za centimetr kalené stopy, v závislosti na dosažené tvrdosti a hloubce přetavené vrstvy. Jelikož došlo u vzorků ke vzniku přetavené povrchové vrstvy tzv. zákalky, která je ve většině případů na součástech nežádoucí, nelze zvolené parametry použít pro porovnání s indukčním kalením. Je zřejmé, že byl zvolen vysoký výkon a rychlost by mohla být vyšší a tím by šla cena níže.

Pro představu cenového rozdílu mezi kalením laserem a indukci, byla zjištěna cenová poptávka ve firmě TOS Čelakovice, která se zabývá indukčním kalením a ve firmě DK styl, která se zabývá laserovým kalením. Srovnání cen bylo provedeno na smyšleném pojezdovém kole z litiny s lupínkovým grafitem o průměru 150 mm a šířce běhounu 40 mm, kaleného do hloubky 1,5 mm. Cena pojezdového kola zakaleného pomocí indukčního ohřevu byla stanovena na **80 Kč** a pomocí laseru na **200 Kč**.

Uvedené ceny je třeba brát orientačně, neboť každá firma zabývající se tepelným zpracováním si cenu určí podle svých možností. Při stanovení ceny se vychází z počtu kusů v zakázce, z doby zhotovení zakázky a také s přípravy (zda je dispozici příslušný induktor nebo různá pouzdra na uchycení atd.) Při povrchovém kalení takto jednoduché součásti je samozřejmě indukční kalení levnější, i když je to metoda pomalejší a jsou používány dokončovací operace. Cena indukčního kalení by se ovšem začala zvedat s kalením dlouhých součástí, např. vodicích lišt obráběcích strojů, kde při indukčním ohřevu je průhyb po kalení mnohem větší a musí následovat rovnání. Nebo u tvarově složitých součástí, jako např. lisovacích forem, kde musí být navržen induktor vhodného tvaru a to něco stojí. Dobré je také zmínit, že laserem kalené součásti se nechladí v žádném ochlazovacím médiu, pracoviště tedy nemusí být vybaveno zařízením na odvod par. Výhodou je možnost kalit jen lokální místa, mnohem menší náchylnost ke vzniku trhlin a díky uchycení laserové hlavičky k průmyslovému robotovi, lze naprogramovat tvar kalené stopy dle výkresové dokumentace. Tyto všechny zmíněné výhody dále snižují ceny objednávek a výrobní časy.

## 6 ZÁVĚRY

Cílem práce je seznámení se povrchovým kalením pomocí laseru a s metodikou mechanického a metalografického vyhodnocení zakalené vrstvy u vzorků litiny s lupínkovým grafitem (ČSN 42 2430).

Laserové kalení se řadí mezi progresivní technologie, jelikož je v průmyslu stále více využíváno a tím rozvíjeno.

Mezi jeho hlavní přednosti patří:

- vznik jemnozrnné struktury,
- minimální vnitřní pnutí a výrazně nižší náchylnost ke vzniku trhlin,
- lokální povrchové kalení s vysokou přesností a neovlivněním okolního materiálu,
- on-line kontrola teploty kalicího procesu,
- vysoká produktivita a spolehlivost,
- žádná nebo minimální potřeba dokončovacích operací.

Experiment byl proveden na laserovém pracovišti ve společnosti Fermat, výkonovým polovodičovým laserem. Kalení litiny bylo ve společnosti prováděno poprvé. Parametry byly zvoleny, dle zkušeností s kalením ocelí. Ve srovnání s ocelí je litina daleko hůře kalitelná a prokalitelná. Litina s hrubozrnnou strukturou potřebuje více času na austenitizaci a dle toho byly voleny nižší rychlosti než u kalení oceli.

Bylo zakaleno 12 vzorků litiny v konstantní vzdálenosti 150 mm. Nejprve bylo zakaleno 10 vzorků při dvou zvolených výkonech a různých rychlostech laserové hlavy. Poslední 2 vzorky se kalily za konstantní teploty 1200 °C. U zakalených vzorků byla následně naměřena tvrdost ve směru od zakaleného povrchu do základního materiálu a poté nafocena makro- a mikrostruktura.

Na snímcích makrostruktury vzorků 1 až 10 byl zřejmý zvlněný průběh prokalené oblasti. Příčinou tohoto průběhu byly odletující jiskry z povrchu litiny, které způsobovaly nečistoty na ochranném okénku, které bylo umístěno na výstupu laserové hlavy. Okénko nebylo v průběhu procesu čištěno a díky tomu se u okénka zvýšila absorpce, která měla za následek nerovnoměrné rozložení výkonu na povrchu vzorků. Pro správné rozložení výkonu by bylo vhodné ochranné okénko opatřit boční tryskou se stlačeným vzduchem. U vzorků 11 a 12 nebyla vidět žádná tepelně ovlivněná zóna. Zde lze vyvodit závěr, že režim zpětnovazebního řízení výkonu pro dosažení konstantní teploty povrchu nepracoval korektně.

Z metalografických snímků mikrostruktury bylo na první pohled viditelné přetavení povrchové vrstvy, neboť došlo k úplnému rozpuštění grafitu a vznikla tzv. zákalka – bílá litina. Naměřené hodnoty tvrdosti přetavené povrchové vrstvy se pohybovaly od 467 HV do 526 HV.

Z výše uvedených výsledků vyplývá nevhodné zvolení parametrů, buďto nízké rychlosti nebo příliš vysokého výkonu. S ohledem na vypočtenou hustotu výkonu, která měla hodnotu pro výkon 5 kW  $\rightarrow 83,3 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$  a pro výkon 6 kW  $\rightarrow 100 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ , lze říci, že největší vliv na přetavení povrchové vrstvy měla nízká rychlost laserové hlavy, neboť hodnoty hustoty výkonů se pohybovaly ve správných mezích uváděných pro kalení laserem, tj. od  $10 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$  do  $10^4 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ .

Pro nalezení optimálních kalících parametrů, dle kterých dosáhneme martenzitické či bainitické struktury, by bylo potřeba provést více testů a zvolit analytický postup. To znamená měnit vždy jeden parametr a ostatní veličiny nechat během procesu konstantní.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [83]

1. ŠTĚPÁN, Karel a Michal MÍŠEK. Laserové zpracování materiálu. *Tribotechnika* [online]. 2012 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22012/laserove-zpracovani-materialu.html>
2. NOVÁK, Miroslav. Seriál na téma lasery: Základní princip laseru a jejich dělení. *LAO: Lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
3. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
4. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění - 5. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-5-dil.html>
5. ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
6. MRŇA, Libor. Základy laserové techniky. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav: Speciální metody svařování* [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_zaklady\\_laserove\\_techiky\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf)
7. ŠULC, Jan. Lasery a jejich aplikace. In: *AK Laser* [online]. 2002 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
8. SCHUBERT, Steffan. Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
9. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technologie*. Bratislava: STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
10. KUBÍČEK, Jaroslav a Libor MRŇA. Technické aspekty svařování laserem. In: *Svařák.cz* [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.svarak.cz/images/stories/pdf/Svarov%C3%A1ni%20laserem.pdf>
11. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
12. ŠEBESTOVÁ, Hana. Průmyslové lasery pro svařování. In: *Portál moderní fyziky* [online]. 2010 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/system/files/download/vujtek/granty/sebestova\\_prumyslove\\_lasery\\_pro\\_svarovani.pdf](http://fyzika.upol.cz/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_lasery_pro_svarovani.pdf)
13. MINAŘÍK, Václav. Technologické lasery. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. 29.12.2007 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
14. ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
15. VOBORÍLOVÁ, Pavla. Princip laseru: Dělení laserů. *Katedra speciální geodézie fakulty stavební ČVUT* [online]. 13.12.1999 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://slon.fsv.cvut.cz/~pavla/laser/node4.html>
16. Značení laserem. *LIFTEC: Divize Průmyslového značení* [online]. 2012 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.liftec.cz/divize1/laser>
17. Laserové značení. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. © 2005 – 2013 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-znacení>
18. NOVÁK, Miroslav. Seriál na téma lasery: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *LAO: Lasery a optika* [online]. 15.3.2011 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z:

- <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
19. DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů v průmyslu. *MEGABLOG* [online]. 28.2.2013 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
  20. Další druhy kalení. *Tumlikovo: Metal Cutting Technologies* [online]. 9.10.2010 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/dalsi-druhy-kaleni/>
  21. Povrchové kalení plamenem. *Wikipedia commons* [online]. 8.5.2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Povrchov%C3%A9\\_kalen%C3%AD\\_plamenem.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Povrchov%C3%A9_kalen%C3%AD_plamenem.jpg)
  22. Strojírenství. *Povrchové kalení* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/povrchov-kalen.html>
  23. Indukční kalení. *Rajmont* [online]. © 2005-2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-kaleni/>
  24. DADOUREK, Karel. Povrchové kalení: Teorie tepelného zpracování. *Technická univerzita v Liberci: Katedra materiálů* [online]. 2007 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/VTM/vtm%20Dad/02povrkal.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/02povrkal.pdf)
  25. Case Hardening Methods. *Practical Maintenance: Improve the Quality of Life* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://practicalmaintenance.net/?p=1543>
  26. HADYNA, Daniel. Laserové svařování: Základní informace o technologii laserového svařování/řezání. *Hadyna: International* [online]. 2011 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2011-3\\_Laser.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2011-3_Laser.pdf)
  27. Laserové značení a gravírování. *LAO: Lasery a optika* [online]. 2014 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89>
  28. NĚMEČEK, Stanislav. Zvyšování životnosti povrchů laserovým kalením. *Tribotechnika*: [online]. 2011 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22011/zvysovani-zivotnosti-povrchu-laserovym-kalenim.html>
  29. JEŘICHOVÁ, Miroslava. *Kalení oceli* [online]. 2013 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://dumy.cz/stahnout/131935>.
  30. Laser Power Density Calculator. *Ophir Photonics Group* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.ophiropt.com/laser-measurement-instruments/laser-power-energy-meters/services/power-density-calculator>
  31. Laserové kalení. *MATEX PM* [online]. © 2011 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.matexpm.com/cz/laserove-kaleni>
  32. Laserové kalení. *VÚTS: Liberec* [online]. © 2013 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.vuts.cz/laserove-kaleni-2.html>
  33. Laserové kalení. *LaserTherm: Lasery pro průmyslové technologie* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-kaleni/>
  34. LANE, Ashley. Induction Hardening. *Slideshare* [online]. 24.1.2012 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: [http://www.slideshare.net/ashley\\_lane/induction-hardening](http://www.slideshare.net/ashley_lane/induction-hardening)
  35. DOSOUDIL, Jakub. Laserové technologie. *SPŠ: strojnická a SOŠ prof. Švejcara* [online]. 2013 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.spstrplz.cz/admin/files/Media/PROJEKTY-OPVK/0038/laser/Laser2.pdf>
  36. CHMELIČKOVÁ, Hana. Laserové technologie v praxi I.: Plynové lasery pro průmyslové využití. In: *Portál moderní fyziky* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1\\_3prez.pdf](http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_3prez.pdf)
  37. CO2 Lasers: The Industrial Workhorse. *EDU.photonics.com* [online]. 9.9.2007 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25155>

38. Diskový laser TruDisk. *TRUMPF* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/vyroby/pevnolatkove-lasery/diskove-lasery.html>
39. Micron Laser Overview: Disk lasers. *II-VI: infrared* [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.iivinfrared.com/1-Micron-Optics-Materials/1micron-laser-overview.html>
40. LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. In: *Portál moderní fyziky* [online]. 13.12.2010 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
41. Laserové svařování. *LaserTherm: Lasery pro průmyslové technologie* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-svarovani/>
42. STAVINOHA, Zdeněk. Moderní technologie povrchového kalení: laserové kalení. *Mechatronika* [online]. 12.7.2013 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=36517&docGroup=-1&cmd=0&instance=2>
43. Laserové svařování a navařování. *LAO: Lasery a optika* [online]. 2014 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-svarovani-a-navarovani-86>
44. CHMELÍČKOVÁ, Hana. Laserové technologie v praxi I.: Pevnolátkové lasery. In: *Portál moderní fyziky* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1\\_4prez.pdf](http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_4prez.pdf)
45. Laserové kalení. *KSK: Precise motion* [online]. © 1996–2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.ks-kurim.cz/laserove-kaleni/>
46. NĚMEČEK, Stanislav. Laserové technologie. In: *Česká technologická platforma: Strojírenství* [online]. 15.6.2013 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: [www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-laserove-technologie/84/](http://www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-laserove-technologie/84/)
47. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční obrábění - 4 díl: Obrábění paprskem fotonů - laserem. *MM průmyslové spektrum* [online]. 19.3.2008 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
48. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4): Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 4.9.2012 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
49. LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. In: *Portál moderní fyziky* [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser-prez.pdf>
50. MRŇA, Libor. Technologie využívající laser. *Odbor technologie svařování a povrchových úprav: Speciální metody svařování* [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_za\\_klady\\_laserove\\_techniky\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__za_klady_laserove_techniky_2013__mrna.pdf)
51. Nástroj - laser. *TRUMPF* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti.html>
52. Laserové vrtání. *LAO: Lasery a optika* [online]. 2014 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-vrtani-92>
53. Řezání laserem a vrtání laserem. *TRUMPF* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani.html>
54. Vrtání. *TRUMPF* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/vrtani.html>

55. Laserové navařování. *LaserTherm: Lasery pro průmyslové technologie* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-navarovani>
56. ELTZE, Andre. Diodový laser a navařování pro opravu povrchů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 13.2.2013 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/diodovy-laser-a-navarovani-pro-opravu-povrchu.html>
57. LUDVÍK, Jan, Karel BÍLEK a Štěpán LUDVÍK. Zkoušky tvrdosti: Přehled základních zkušebních metod. In: *Metrotest* [online]. 22.11.2010 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: [http://www.metrotest.cz/files/zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf)
58. NOVOTNÁ, Eva. Zkoušení materiálů a výrobků: Zkoušky tvrdosti podle Brinella, Vickerse, Rockwella. In: *ÚMVI: Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno, [2009] [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
59. Zkoušky tvrdosti. In: *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. 2013 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
60. Hardness test. In: *University at Buffalo: Department of civil, Structural, and Environmental Engineering* [online]. 2000 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://civil.eng.buffalo.edu/cie616/2-LECTURES/Lecture%204a%20-%20Material%20Testing/HARDNESS%20TEST.pdf>
61. Tvrdost. *Měření tvrdosti* [online]. 2005-2011 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.merenitvrlosti.cz/tvrdost.htm>
62. M-710iC. *FANUC* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://robot.fanucamerica.com/products/robots/productbyseries.aspx?seriesId=12&robotseries=M-710iC>
63. Laboratorní přesná pila MIKRON 110. In: *Isotek* [online]. 2008 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: [http://www.isotek.sk/laboratorna\\_pila.pdf](http://www.isotek.sk/laboratorna_pila.pdf)
64. Laserové kalení. *TRUMPF* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu/laserove-kaleni.html>
65. NOVOTNÁ, Eva. Nauka o materiálu – distanční výuka: Tepelné zpracování slitin Fe-C. In: *ÚMVI: Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno, [2009] [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/nomd/Index.html>
66. MACHEK, Václav. *Kovové materiály 1: struktury kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2013, 168 s. ISBN 978-80-01-05248-8.
67. Jenoptik: Optical beam shaper. *Direct Industry: The online Industrial Exhibition* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/jenoptik-i-optical-systems/optical-beam-shaper-14476-616014.html>
68. Principle Hardening. *Laserline* [online]. 2014 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.laserline.de/laser-hardening-principle.html>
69. ROUNDY, Carlos B. Current Technology of Laser Beam Profile Measurements. In: *Ophir Optonics Solutions* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: [http://www.ophiropt.com/user\\_files/laser/beamprofilers/tutorial-1.pdf](http://www.ophiropt.com/user_files/laser/beamprofilers/tutorial-1.pdf)
70. LITHERLAND, Brian. Tips for Successful Laser Marking in Job Shops. *Fabricating and Metalworking* [online]. 13.9.2012 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2012/09/tips-for-successful-laser-marking-in-job-shops/>
71. NĚMEČEK, Stanislav. Kalení litiny výkonovými diodovými lasery. *Tribotechnika* [online]. © 2008 - 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52012/kaleni-litiny-vykonovymi-diodovymi-lasery.html>

72. PODRÁBSKÝ, Tomáš a Simona POSPÍŠILOVÁ. Struktura a vlastnosti grafitických litin: Litina s lupínkovým grafitem. In: *ÚMVI: Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno, 2006 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/savgl/index.php?chapter=10>
73. DIRECT INDUSTRY. *LDF Series Diode Laser: For industrial Needs*. Fraunhofer Straße, [2010]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/laserline-gmbh/ldf-series-diode-laser-industrial-needs/25804-530539.html#open>
74. Ukázky instalace systémů. *LaserTherm: Lasery pro průmyslové technologie* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/ukazky-aplikaci/ukazky-instalace/>
75. DOLEŽAL, Pavel, Simona HUTAŘOVÁ a Petra PAVLÍKOVÁ. Příprava a hodnocení materiálografických vzorků. In: *ÚMVI: Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. [2009] [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: [http://imse.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/phmv/fv\\_li.php](http://imse.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/phmv/fv_li.php)
76. Výrobky. *Struers: Ensuring Certainty* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: [http://www.struers.com/default.asp?top\\_id=3&doc\\_id=282](http://www.struers.com/default.asp?top_id=3&doc_id=282)
77. JIŘÍKOVSKÝ, Karel. Laser konfokální řádkovací mikroskop. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 25.4.2007 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserovy-konfokalni-radkovaci-mikroskop.html>
78. OLYMPUS. *CONFOCAL LASER SCANNING MICROSCOPE: Lext OLS3100*. [2006]. Dostupné z: <http://www.qualityreport.co.th/olympus/LEXTDetail.pdf>
79. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 175 s. ISBN 80-704-3417-1.
80. Metalografie I.: příprava vzorku pro pozorování mikroskopem. *ÚKMKI: Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství* [online]. VŠCHT Praha. 2005 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_metalografie\\_1/teorie.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm)
81. NĚMEČEK, Stanislav. *Využití laseru v průmyslu*. Plzeň: Tribun EU s.r.o., 2013. ISBN 978-80-263-0359-6.
82. II-VI infrared: Integrator beam. *Direct Industry: The Online Industrial Exhibition* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/ii-vi-infrared/integrator-beam-37313-749705.html>
83. Citace PRO. 2014. *Citace PRO* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ZKRATKA	POPIS
YAG	Ytrium aluminium granát
CCD	Charge-Coupled Device
DC	Direct Current
DPSS	Diode pumped solid state
HB	Označení tvrdosti dle Brinella
HRA, HRB, HRC	Označení tvrdosti dle Rockwella
HV	Označení tvrdosti dle Vickerse
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LPSS	Lamp pumped solid state
Nd	Neodym
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
Yb	Ytterbium

SYMBOL	POPIS	JEDNOTKA
A	Absorpce	[%]
A <sub>5</sub>	Tažnost	[%]
A <sub>C1</sub>	Překryštalizační teplota	[°C]
A <sub>C3</sub>	Překryštalizační teplota	[°C]
D	Průměr kuličky	[mm]
E	Modul pružnosti	[GPa]
F	Zatěžovací síla	[N]
K	Kvalita paprsku	[-]
L	Délka vtisku	[mm]
P	Výkon laseru	[W]
P <sub>H</sub>	Hustota výkonu	[W·mm <sup>-2</sup> ]
R <sub>a</sub>	Průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R <sub>p0,1</sub>	Smluvní mez kluzu	[MPa]
Q <sub>s</sub>	Specifické vnesené teplo	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
d	Aritmetický průměr úhlopříček	[mm]
d <sub>1</sub>	Úhlopříčka o délce d <sub>1</sub>	[mm]
d <sub>2</sub>	Úhlopříčka o délce d <sub>2</sub>	[mm]
h	Hloubka prokalené vrstvy	[mm]
h <sub>0</sub>	Hloubka vtisku předběžným zatížením	[mm]
h <sub>1</sub>	Hloubka vtisku vzniklá přídavným zatížením	[mm]
h <sub>2</sub>	Hloubka vtisku vzniklá předběžným + přídavným zatížením	[mm]
m <sub>f</sub>	Teplota konce vzniku martenzitu	[°C]
v	Rychlost pohybu laserové hlavy	[cm·min <sup>-1</sup> ]
α	Vrcholový úhel	[°]
η	Koeficient absorpce	[μm]
λ	Vlnová délka	[μm]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady povrchově kalených součástí [46].....	11
Obr. 2 Oblast kalení v Fe-Fe <sub>3</sub> C [66] .....	12
Obr. 3 Povrchové kalení plamenem a) jednorázové b) postupné [21] .....	14
Obr. 4 Schéma indukčního ohřevu [25].....	14
Obr. 5 Kalení ozubeného kola [34] .....	14
Obr. 6 Průběh kalení laserovým paprskem [45].....	15
Obr. 7 Ideální Gaussovo rozložení paprsku pro největší koncentraci energie... ..	16
Obr. 8 Optické prvky pro tvarování paprsku [67] [82].....	16
Obr. 9 Vhodné tvary laserových stop při povrchovém kalení [68] .....	17
Obr. 10 Absorpce laserového záření v závislosti na vlnové délce [70].....	17
Obr. 11 Základní části laseru – rezonátor [40] .....	19
Obr. 12 Schéma stimulované emise [40].....	19
Obr. 13 Typ CO <sub>2</sub> laseru s podélným prouděním plynu [37] .....	21
Obr. 14 Typ CO <sub>2</sub> laseru s příčným prouděním plynu [37] .....	21
Obr. 15 Deskový SLAB laser [18] .....	22
Obr. 16 Výbojkou buzený Nd: YAG laser [19].....	22
Obr. 17 Diodou buzený Nd: YAG laser a) boční buzení, b) zadní buzení [19] .....	23
Obr. 18 Schéma vláknového laseru [19] .....	23
Obr. 19 Diskový laser chlazení přes spodní část [18] .....	24
Obr. 20 Schéma rezonátoru diskového laseru [39].....	24
Obr. 21 Schéma polovodičové diody [19].....	25
Obr. 22 Seskupení laserových diod [44] .....	25
Obr. 23 Procentuální využití jednotlivých technologií [47] .....	26
Obr. 24 Princip vychylování paprsku [4] .....	26
Obr. 25 Metody laserového svařování a) kontaktní b) penetrační [50].....	27
Obr. 26 Princip řezání laserem [53].....	27
Obr. 27 Princip vrtání laserem [54] .....	28
Obr. 28 Navařování povlaku pro zvýšení životnosti diodovým laserem [56].....	28
Obr. 29 Zkouška dle Brinella [58].....	30
Obr. 30 Zkouška dle Vickerse [58] .....	31
Obr. 31 Zkouška dle Rockwella [58].....	32
Obr. 32 Vtisk dle Vickerse a Knoopu [58] .....	33
Obr. 33 Příprava metalografického výbrusu [80].....	34
Obr. 34 Polovodičový laser ve společnosti Fermat v Brně [74].....	35
Obr. 35 Průmyslový robot FANUC [62] .....	36
Obr. 36 Laserová kalící hlava.....	36
Obr. 37 Laboratorní pila [63] .....	36
Obr. 38 Elektrohydraulický lis (vlevo) a metalografická leštička (vpravo) [76] .....	37
Obr. 39 Mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 [78] .....	37
Obr. 40 Zalisované vzorky .....	38
Obr. 41 Tvrdoměr ZWICK 3212.....	38
Obr. 42 Laserové pracoviště.....	39
Obr. 43 Vzorek č. 1 .....	40
Obr. 44 Vzorek č. 2 .....	40
Obr. 45 Vzorek č. 3 .....	40
Obr. 46 Vzorek č. 4 .....	40
Obr. 47 Vzorek č. 5 .....	41
Obr. 48 Vzorek č. 6 .....	41

Obr. 49 Vzorek č. 7 .....	41
Obr. 50 Vzorek č. 8 .....	41
Obr. 51 Vzorek č. 9 .....	41
Obr. 52 Vzorek č. 10 .....	42
Obr. 53 Vzorek č. 11 .....	42
Obr. 54 Vzorek č. 12 .....	42
Obr. 55 Mikrostruktura celku u vzorku č. 6, při zvětšení 120x.....	43
Obr. 56 Rozdíl leptadel na vzhled struktury.....	43
Obr. 57 Mikrostruktura přechodu přetavené a tepelně ovlivněné oblasti u vzorku č. 6.....	44
Obr. 58 Detail struktury bílé litiny, zvětšeno 1000x .....	44
Obr. 59 Struktura přechodu přetavená oblast a TOO, zvětšeno 500x .....	45
Obr. 60 Perlitická struktura litiny s lupínkovým grafitem.....	45
Obr. 61 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu (vzorky 1 až 5).....	47
Obr. 62 Graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu (vzorky 6 až 10).....	47
Obr. 63 Směr vtisků při měření tvrdosti .....	48
Obr. 64 Grafické srovnání průběhů vneseného tepla a hloubky přetavené vrstvy... ..	50

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vliv stavu povrchu na koeficient absorpce pro ocel [9].....	18
Tab. 2 Chemické složení .....	29
Tab. 3 Mechanické vlastnosti [72] .....	29
Tab. 4 Závislost plastické deformace na čase [57].....	32
Tab. 5 Základní technické parametry [73].....	35
Tab. 6 Základní technické parametry [62].....	36
Tab. 7 Základní technické parametry [63].....	36
Tab. 8 Základní technické parametry [77].....	37
Tab. 9 Nastavené parametry při laserovém kalení .....	39
Tab. 10 Hloubka prokalené oblasti při zadaných parametrech .....	42
Tab. 11 Tvrdosti jednotlivých vzorků .....	46
Tab. 12 Zvolené a vypočtené hodnoty.....	49
Tab. 13 Orientační cena centimetru kalené stopy.....	51

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č. 1 – Konstrukce laserové diody

Příloha č. 2 – Vybrané druhy laserových diod

Příloha č. 3 – Materiálový list litiny ČSN 42 2430

# Příloha č. 1 – Konstrukce laserové diody

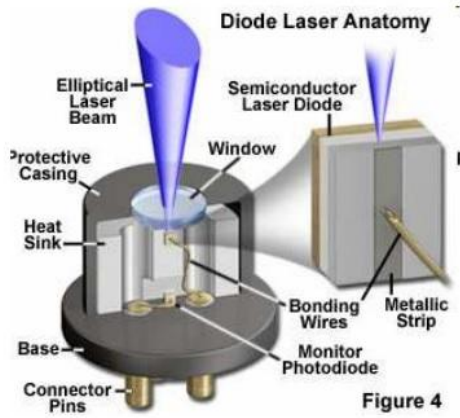


Figure 4

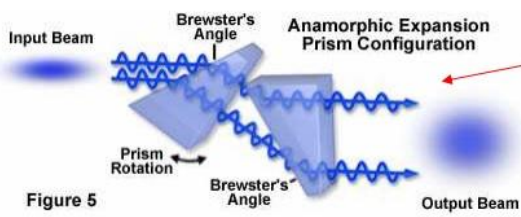
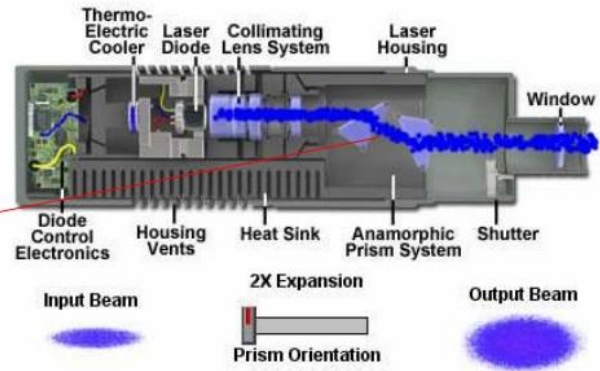


Figure 5



## Příloha č. 2 – Vybrané druhy laserových diod

Typ	Vlnová délka $\lambda$ [nm]	Typické použití
InGaN	405	Drivery pro Blue-ray disky a HD DVD
AlGaInP	635	Červené ukazovátko vyšší kvality
	657	DVD drivery
	670	Červené ukazovátko nižší kvality
AlGaAs	760	Laserové tiskárny
GaAlAs	785	CD přehrávače
GaAlAs	808	Čerpání ND: YVO4 a ND: YAG laserů
	848	PC myš
InGaAs	980	Čerpání Yb: YAG laserů
AlGaAs	1064	Vláknové komunikace
GaInAsP	1300	
	1550	
GaSbAs	2004	Detekce CO <sub>2</sub>
	2680	

ČSN 42 2430		Litina s lupínkovým grafitem		LITINA						
STN 42 2430				42 2430						
<b>Chemické složení [hm. %] <sup>1)</sup></b>										
P			S							
max 0,30			max 0,15							
<b>Charakteristika</b>										
Struktura tvořena perlitem a lupínkovým grafitem.										
Střední hodnota stupně eutektičnosti $S_e = \frac{\% C}{4,23-0,3 (\% Si + \% P)} = 0,81-0,87$										
<b>Mechanické vlastnosti</b>										
Stav	–									
Mez kluzu $R_p$ 0,2 [MPa]	–									
Mez pevnosti $R_m$ [MPa] min	300									
Tažnost $A_5$ [%]	–									
Kontrakce Z [%]	–									
Vrubová houževnatost KC [J.cm <sup>-2</sup> ] min	8,5									
Tvrdość HB max	260									
Modul pružnosti E [GPa]	144,4									
Pevnost v ohybu $R_{m0}$ [MPa] min	490									
Průhyb y [mm] při vzdálenosti podpor 600 mm min	9									
Informativní hodnoty při snížených a zvýšených teplotách										
Teplota [°C]	-60	-40	-20	0	100	200	300	400	500	600
Pevnost v tahu $R_m$ [MPa] min	319	314	309	305	295	284	299	305	242	157
Vrubová houževnatost KC [J.cm <sup>-2</sup> ] min	6,6	7,0	7,6	8,1	9,0	9,6	9,6	9,3	8,6	8,3
Modul pružnosti E [GPa]	–	–	–	–	142,5	138,9	135,4	131,8	128,1	–
Pevnost v tahu a tvrdost válcových tyčí a stěn odlitků různých rozměrů, litych do pískových forem										
Průměr zkušební tyče [mm]	20		30		45		60		90	
Tloušťka stěny odlitku [mm]	8–15		15–30		30–45		45–80		80–120	
Pevnost v tahu $R_m$ [MPa] min	330		300		270		245		215	
Tvrdość HB	220–280		200–260		190–250		180–240		170–230	
Pevnost mezi klíny										
Typ zkušební tělesa	tyč neobrobená Ø 30		tyč obrobená Ø 20		kotouč Ø 20 × 6					
Pevnost mezi klíny $\sigma_{pk}$ [MPa] min	175		205		185					
<b>Fyzikální vlastnosti</b>										
Hustota $\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost $\lambda_1$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Rezistivita $\rho$ [Ω.m]	Lineární smrštění při tuhnutí [%]					
7 350	473	12,3.10 <sup>-6</sup>	49,4	–	1,3					



<b>Odolnost proti degračním procesům</b>					
ODOLNOST PROTI ÚNAVĚ					
Mez únavy při ohybu za rotace $\sigma_{0C} = \min 140 \text{ MPa}$					
<b>Technologické údaje</b>					
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ					
teploty přeměn $A_{11} = 738 + 5 (\% \text{ Si})^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ $A_{12} = 738 + 18 (\% \text{ Si})^{1,75} \text{ } ^\circ\text{C}$					
<b>Použití</b>					
Na odlitky o tloušťce stěn 25–100 mm, např. na značně namáhané strojní odlitky, na stojany těžkých obráběcích strojů, speciální odlitky, součásti armatur.					
<b>Ostatní vlastnosti</b>					
Barevné značení podle ČSN 42 0010			Třída odpadu podle ČSN 42 0030		
–			211		
<b>Porovnání se zahraničními materiály</b>					
<i>ISO</i>		<i>EURO</i>		<i>Německo</i>	
Gr. 300	ISO 185-87	–	–	GG-30	DIN 1691
<i>Francie</i>		<i>Velká Británie</i>		<i>Rusko</i>	
Ft 30 FGL 300	NF A32-101 NF A32-101-87	Gr. 300	BS 1452-77	SČ 30	GOST 1412-85
<i>USA</i>		<i>Japonsko</i>		<i>Kanada</i>	
No. 45	ASTM A48-83	FC 300 FC 30	JIS G5501-89 JIS G5501	–	–
<i>Itálie</i>		<i>Rakousko</i>		<i>Švédsko</i>	
G 30	UNI 5007-69	GG-300 GG-30	ÖNORM M3191-83 ÖNORM M3191	0130-00	MNC 705E-89
<i>Polsko</i>		<i>Maďarsko</i>		<i>Norsko</i>	
ZI 300	PN H-83101	Ov 30	MSZ 8260	–	–
<i>Finsko</i>		<i>Švýcarsko</i>		<i>Španělsko</i>	
GRS 30	SFS H.1151	–	–	FG 30	UNE 36111-73
<i>Belgie</i>		–		–	
FGG 30	NBN 830-01	–		–	
<b>Poznámky</b>					
1) chemické složení volí dodavatel podle druhu tavicích pecí, surovin, materiálu forem a dalších výrobních podmínek					