VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM VLIVU VELIKOSTI SVAZKU NA HLOUBKU PROKALENÍ MATERIÁLU 42CRMO4 PŘI LASEROVÉM KALENÍ

THE STUDY OF THE SPOT SIZE INFLUENCE ON THE DEPTH OF HARDENING OF THE MATERIAL 42CRMO4 DURING LASER HARDENING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. DANIEL KŘÍŽ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Daniel Kříž

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:

Studium vlivu velikosti svazku na hloubku prokalení materiálu 42CrMo4 při laserovém kalení

v anglickém jazyce:

The study of the spot size influence on the depth of hardening of the material 42CrMo4 during laser hardening

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při povrchovém kalení laserem závisí předávání tepla na hustotě výkonu dopadajícího záření. Tato hustota se dá ovlivnit velikostí stopy laserového svazku dopadajícího na materiál. Pomocí speciální kalící hlavy s rozmítáním svazku se dá tato velikost jednoduše měnit. Cílem je najít pro daný materiál závislost mezi parametry rozmítání a výslednou hloubkou prokalení.

Cíle diplomové práce:

Seznamámení se s možnostmi technologie povrchového kalení laserem. Seznámení se s metodikou navržení kalícího 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.l: Laserové technológie,1.vyd., Bratislava, Vydavateĺstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
2.TURŇA, M., Špeciálné metódy zvárania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9.
3.DAĎOUREK, Karel. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Povrchové kalení: Teorie tepelného zpracování. 2007.
4. BULLING, Dieter. Tribotechnika: Laserové kalení proces s velkým potenciálem. In: Tribotechnika: Laserové kalení proces s velkým potenciálem [online]. 2012. vyd. 2012 [cit. 2014-03-16].
5. NĚMEČEK, Stanislav. MATEX PM. Materiálová podstata kalení povrchu laserovým paprskem. 2008.
5.KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. 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 18.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. Ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. Děkan fakulty

ABSTRAKT

KŘÍŽ Daniel, Studium vlivu velikosti svazku na hloubku prokalení materiálu 42CrMo4 při laserovém kalení

Diplomová práce je zaměřena na problematiku povrchového laserového kalení pomocí diskového laseru. V experimentu bylo zakaleno 10 vzorů z oceli 42CrMo4 při měnící se rychlosti kalení a průměru laserového paprsku. V teoretické části jsou zpočátku popsány druhy laserů. Dále metody zpracování tvrdosti povrchu např. druhy kalení a chemicko-tepelné zpracování, následně je popsán použitý materiál. V experimentální části jsou vyhodnoceny snímky makrostruktury, mikrostruktury a porovnány hodnoty tvrdosti jednotlivých vzorků. Dále práce obsahuje technicko-ekonomické zhodnocení a v závěru jsou vyhodnoceny vhodné parametry pro povrchové laserové kalení.

Klíčová slova

laser, ocel 42CrMo4, tvrdost, povrchové kalení, tepelné zpracování

ABSTRACT

KŘÍŽ Daniel, The study of the spot size influence on the depth of hardering of the material 42CrMo4 during laser hardering

This master thesis is focused on surface hardening by using disk laser. Ten samples made of 42CrMo4 steel were hardened at varying speeds of quenching and diameter of the laser beam. The theoretical part initially describes the types of lasers. Further it describes methods of surface hardness processing such as kinds of hardening and chemical-thermal treatment, followed by description of the used material. Images of macrostructure, microstructure and compared values of hardness of single samples are evaluated in the experimental part. The thesis subsequently contains a technical-economic evaluation. Appropriate parameters for surface laser hardening are evaluated in the conclusion.

Key words

Laser, steel 42CrMo4, hardness, surface hardering, heat treatment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŘÍŽ, Daniel. *Studium vlivu velikosti svazku na hloubku prokalení materiálu 42CrMo4 při laserovém kalení.* Brno, 2015. 57s, 3 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Obor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Studium vlivu velikosti svazku na hloubku prokalení materiálu 42CrMo4 při laserovém** vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Libora Mrňi, Ph.D. s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

28.5.2015 ---------- ----------

Datum Bc. Daniel Kříž

PODĚKOVÁNÍ
Děkuji tímto doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky, informace a rady při řešení a vypracování diplomové práce. Dále bych poděkoval Petru Valáškovi za pomoc při měření tvrdosti a Ing. Martinu Julišovi Ph.D za pomoc při vyhodnocování mikrotvrdosti v laboratořích CEITEK.

OBSAH

Abstrakt
Prohlášení
Poděkování
Obsah
ÚVOD **10**
1 LASER **11**
1.1 Dopad laserového paprsku na materiál 12
1.2 Lasery používané v průmyslu 13
1.3 Plynové lasery – CO_2 13
1.4 Pevnolátkové lasery 14
1.5 Použití laserů v průmyslu 17
2 METODY ÚPRAVY TVRDOSTI POVRCHU **22**
2.1 Kalení 22
2.1.1 Martenzitické kalení 23
2.1.2 Bainitické kalení 23
2.2 Indukční kalení 24
2.3 Kalení plamenem 25
2.4 Povrchové kalení laserem 26
2.4.1 Úprava laserového paprsku pro laserové kalení 28
2.5 Chemicko-tepelné zpracování 29
2.5.2 Nitridace 31
3 ZKOUMANÝ MATERIÁL **34**
3.1 Použití materiálu ve firmě KSK 35
4 EXPERIMENT **36**
4.1 Zařízení použité při experimentu 36
4.2. Postup experimentu 41
4.3. Makrostruktura 44
4.4 Mikrostruktura 49
4.5 Tvrdost 51
5 TECHNICKO - EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ **56**
6 ZÁVĚR **57**
Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek
Seznam obrázků a tabulek
Seznam příloh

ÚVOD [37], [40]

Dnes se laserové technologie objevují nejen ve všech odvětvích technického průmyslu, ale také ve zdravotnictví, počítačové technologii apod. Výhodou laserové technologie je její univerzálnost a možnost automatizace specifikované výroby. Ve strojírenském průmyslu se laser používá hlavně při řezání plechů, svařování, pájení, značení a také k laserovému povrchovému kalení.

Laserové povrchové kalení (obr. 1) má mnoho výhod, díky vysoké energii laserového paprsku se součást rychle ohřeje na povrchu a největší část tepla odchází do jádra součásti a nedochází k tak velkému vnitřnímu napětí a deformacím, jako při ostatních typech kalení. Dalšími výhodami je vysoce kvalitní zakalená vrstva, zakalení pouze požadované plochy, nízká oxidace, odpadá chlazení a další. Touto metodou kalení je možné dosáhnout vysokých tvrdostí při zachování houževnatosti jádra. Oproti klasickému objemovému kalení, nebo povrchovému kalení plamenem má technologie řadu výhod ať už v možnosti automatizace, nebo přesnosti výroby. Dalšími způsoby zvýšení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení jsou např. cementace, nitridace nebo navařování materiálu. Ze jmenovaných způsobů zvyšování tvrdosti vychází nejlíp laserové povrchové kalení.

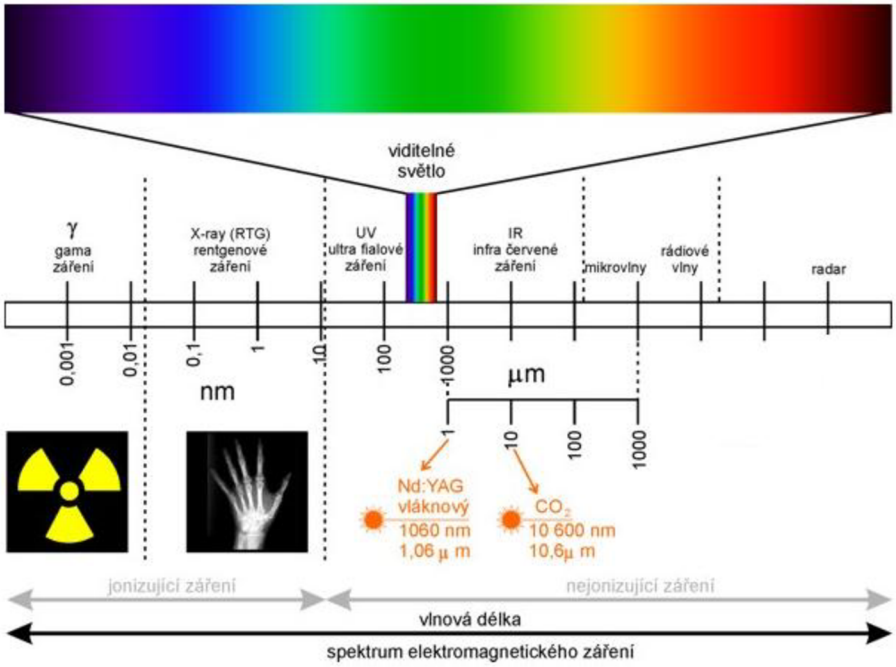
Diplomová práce se zabývá vlivem velikosti svazku na hloubku prokalení při laserovém kalení. Pro experiment byl zadán materiál 42CrMo4 a při různých parametrech procesu kalení bylo vyhotoveno několik vzorků. Byl použit diskový laser s laserovou kalící hlavou, který se nachází v Kuličkových šroubech v Kuřimi, kde je využíván právě k technologii laserového kalení. U vzorků je zjišťována hloubka prokalení, tvrdosti od povrchu součásti analýza mikrostruktury a makrostruktury na mikroskopu.

V závěru diplomové práce je provedeno srovnání parametru kalení a vyhodnocení nejlepších kombinací, které jsou vhodné pro tuto technologii.

Obr. 1 Povrchové kalení laserem [37].

1 LASER [1], [35], [41], [42], [46]

Slovo LASER vyjadřuje zkratku anglických slov Light Amplification by Stimulated of Radiation. Do češtiny se dá tento název přeložit jako Zesílení světla stimulovanou emisí záření. První rozpracování problematiky stimulovaného záření bylo provedeno již v první polovině 20. století. Úspěšné experimenty byly zvládnuty až v roce 1954, kdy Prochov, Basov a Townes sestrojili generátor, který byl schopen pracovat v oblasti centimetrových vln. Laserový paprsek patří do skupiny elektromagnetického záření. V roce 1960 byl zkonstruován laser s vlnovou délkou v oblasti viditelného světla. Mezi nejdůležitější vlastnosti laserového paprsku patří jeho koherentnost, monochromatičnost, směrovost a módová struktura. Jestliže je paprsek v ideálním případě tvořen výhradně fotony stejné délky, hovoří se o monochromatičnosti. Podmínka směrovosti laseru spočívá v koherentnosti paprsku na povrchu polopropustného zrcadla výstupu zařízení. Směrovost se charakterizuje prostorovým úhlem, který se v praxi označuje jako rovinný úhel divergence paprsku. Paprsek má většinou tvar kužele. Při aplikacích využívající laser je důležité nastavení vzdálenosti laserové hlavy od materiálu tak, aby ohnisko paprsku laseru leželo tam, kde je potřeba. Hustota výkonu laseru je velmi vysoká, maximální hustota výkonu na dopadové ploše je 5.10^{13} W.cm^{-2}. Běžně používané výkony jsou v rozsahu od 10^{4} až 10^{9} W.cm^{-2}. Na obr. 2 lze vidět různé druhy záření a jejich viditelné světlo.



Obr. 2 Druhy záření a viditelné světlo[41].

Výhody laserového zdroje:

- vnesené teplo do materiálu laserovým paprskem způsobuje minimální deformace,
- laserový paprsek se v průzračném prostředí šíří beze ztrát,
- zařízení emitující laserové záření umožňuje přesné dávkování energie,
- svazek fotonů vycházející ze zařízení nemá elektrický náboj a není ovlivňovaný elektrickým nebo magnetickým polem,
- malá divergence paprsku, nízká rozbíhavost
- přeměna světelné energie na tepelnou se uskutečňuje přímo na povrchu materiálu,
- schopnost soustředit energii na velmi malou plochu.

V tab. 1 je vidět rozdíl mezi laserovým paprskem a klasickým zdrojem světla.

Tab. 1 Porovnání laserového paprsku s klasickým zdrojem světla [46].

klasický zdroj světla	Laser
laserové záření se šíří po celém prostoru rovnoměrně	laserové záření je ve formě úzkého paprsku malého průměru
světelné vlny nejsou synchronizovány	koherentní- pouze jedna synchronizovaná vlna
zaostření světla pouze do plošky	zaostření laserového svazku do bodu
více vlnových délek- barevné záření	monochromatický paprsek- pouze jedna barva

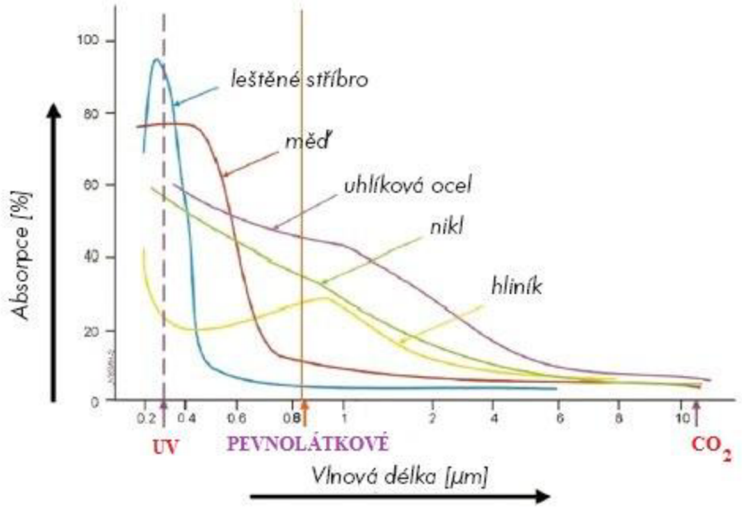
1.1 Dopad laserového paprsku na materiál [1], [19], [32]

Základní podmínkou využívání laserového záření pro veškeré zpracování materiálu ve strojírenství je absorpce paprsku do zpracovávaného materiálu. Světelná energie paprsku se přemění na energii tepelnou při dopadu na materiál. Záření je pohlcováno materiálem, energie dopadu paprsku se dělí na energii odraženou, absorbovanou a prošlou. Vzhledem k tomu, že kovové materiály bývají neprůhledné, rovná se prošlá energie nule, pokud nedojde k propálení materiálu. Teplo, které vzniká na povrchu, lze vysvětlit jako reakci dopadajících atomů na povrch a vznik elektrického proudu. Každý materiál má svou elektrickou vodivost a při dodání vyššího elektrického proudu než je materiál schopen odvést, vzniká teplo. Při rostoucí teplotě se elektrická vodivost snižuje. Kovy, které mají nízkou vodivost, mají vysoký koeficient absorpce. Dále je dokázáno, že s rostoucí teplotou také roste koeficient absorpce. Dalším nemalým faktorem, který ovlivňuje interakci laserového paprsku s materiálem je stav povrchu součásti. Vliv stavu povrchu materiálu na absorpci paprsku při vlnové délce 10,6 µm lze vidět v tab. 2.

Tab. 2 Druhy materiálu a jejich koeficient absorpce [19].

Materiál	Leštěný povrch Povrch [-]	Oxidovaný povrch při 600°C/2h [-]
Au	0,01	-
Al	0,034	0,25 - 0,5
Fe	0,05	0,33 - 0,74
Zr	0,083	0,45 - 0,56
Ti	0,094	0,18 - 0,25

Na obr. 3 je zobrazena závislost absorpce na vlnové délce různých druhů laseru. Pevnolátkové lasery mají lepší absorpci než lasery CO_2. V praxi se používají jak pevnolátkové (polovodičové), tak plynné lasery. Rozdíl absorpcí u použití CO_2 laseru není tak výrazný jako při použití laserů pevnolátkových.



Obr. 3 Závislost absorpce na vlnové délce laseru [32].

Absorbci laserového záření lze zlepšit těmito možnostmi:

- posypáním povrchu tenkou vrstvou prášku,
- vytvořením obláčku plazmatu nad povrchem materiálu počátečním vysoko-energetickým impulzem,
- opracováním povrchu, například zdrsněním brusným papírem,
- vytvořením tenké nekovové vrstvy na povrchu materiálu, např. nátěr.

1.2 Lasery používané v průmyslu [1], [35], [48]

V současné době se na trhu vyskytuje mnoho typů laserů, jež se liší svou konstrukcí, typem čerpání, výkonem, účinností a charakterem výstupu. CO_2 lasery, které byly ve strojírenství jednoznačně nejvíce používány, jsou v mnoha případech nahrazovány pevnolátkovými lasery.
Rozdělení základních typu laseru:

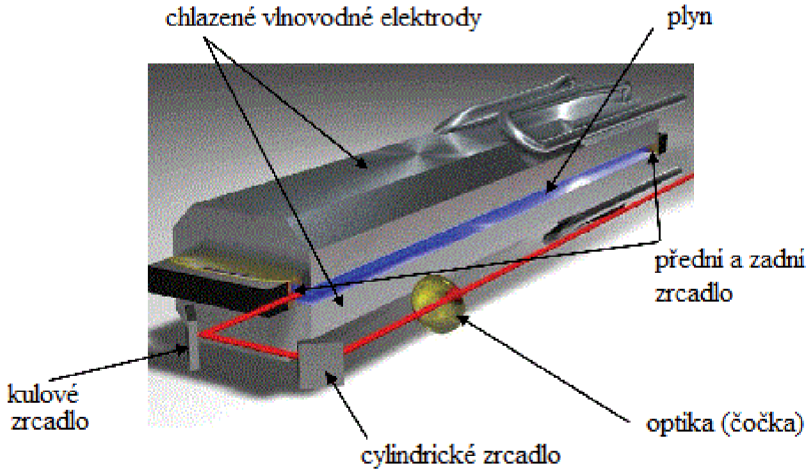
Podle aktivního prostředí:	-plynové
	-kapalinové
	-pevnolátkové - tyčové, vláknové, diskové, polovodičové.
Podle typu čerpání:	-elektrický výboj,
	-optické čerpání,
	-chemickou reakcí.
Podle režimu provozu	-pulzní,
	-kontinuální.

1.3 Plynové lasery – CO_2 [14], [35]

Je to druh plynového laseru, který využívá jako aktivní prostředí směs oxidu uhličitého, dusíku a helia, kde bývá jejich poměr obvykle 1:4:5. Plynové lasery lze rozdělit podle způsobu proudění směsi na lasery s příčným, nebo podélným prouděním. Buzení laserového paprsku se provádí většinou pomocí elektrického výboje. Vlnová délka λ CO_2 laseru je 10,6 μm. Výkon laseru může dosáhnout až 30 kW, tyto lasery jsou rozměrově velké a používají se ve velkých výrobách. Účinnost laseru se pohybuje v intervalu od 10 do 15 %, oproti některým typům laserů jsou CO_2 lasery několikanásobně větší. Lze jej použít jak v pulzním tak v kontinuálním režimu. CO_2 laser je spolehlivý a používá se zejména ve 2D operacích. 2D operacemi je myšleno např. svařování plechů v rovině nebo především řezání plechů. Pro řezání ocelových plechů není potřeba tak velkého výkonu jako pro svařování.

Programování řezací nebo svařovací hlavy není náročné, protože se většinou jedná o pohyb pouze ve 2 osách. Pro výstup paprsku je nutno použít speciální refrakční optiku ZnSe, GaAs, Ge nebo reflexní optiku Si/Cu s Au. Tyto optiky jsou náročné na údržbu a je nutno je kontrolovat. CO_2 laser zvládne řezat kovy i nekovy, např. plasty, papír, sklo, kůži atd. Lasery malých výkonu do 500 W se používají ke značení a gravírování oceli.

Nejmodernějším typem CO_2 laseru je deskový SLAB laser, (obr. 4) který není tak náročný na údržbu jako ostatní plynové lasery, kde je nutná častá kontrola speciální optiky. K odvodu tepla je používáno dvou plochých vodou chlazených elektrod. SLAB laser má nižší spotřebu plynů a energie.



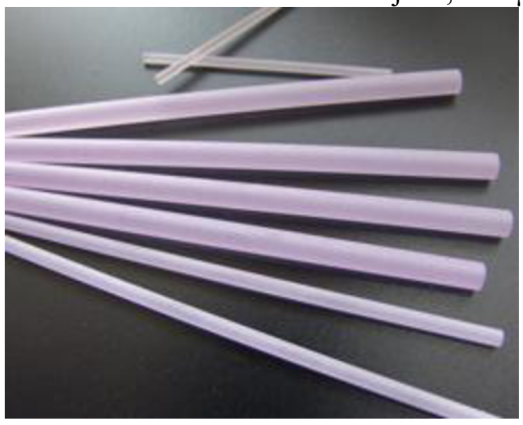
Obr. 4 SLAB laser [14].

1.4 Pevnolátkové lasery [1], [8], [35], [44], [48], [51], [53],

Mezi pevnolátkové lasery patří 3 nejčastěji používané typy laseru, které jsou YAG (Yterbium-hlinitý granát) laser, který je dopovaný neodymem (Nd) nebo yterbiem (Yb), diskové lasery a vláknové lasery. Aktivní prostředí u Nd:Yag laseru tvoří krystalická tyčinka, jež má délku 15 - 20 cm a její průměr je do 10 mm. Jako vedení laserového paprsku je použito optické vlákno, které ale není aktivní a slouží jen jako vedení paprsku. Oproti Nd:YAG laseru je u vláknového laseru optické vlákno aktivní a může dosahovat až několika metrů. Diskový laser má aktivní prostředí krystalický disk většinou o průměru 10 cm a tloušťce 0,25mm.

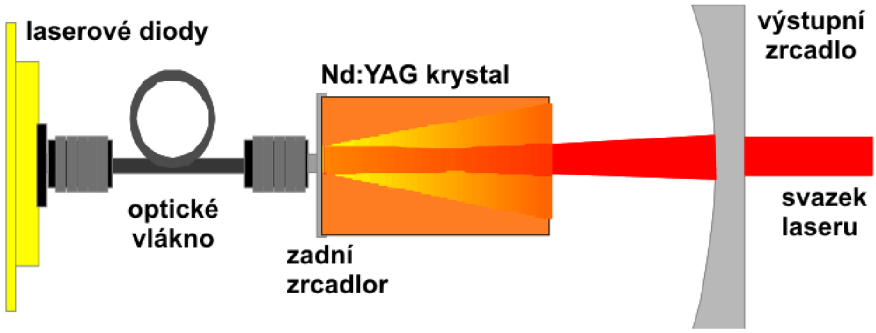
- **Nd-YAG laser**

K tomuto typu laseru je jako aktivní prostředí používán monokrystal (obr. 5). YAG (Yterbium aluminum granát) je dopovaný ionty neodymu. Vlnová délka laserového záření je 1,064 μm. Výkon těchto laserů je maximálně do 6 kW a účinnost zařízení je mezi 3 až 5%. Laser je schopen pracovat v kontinuálním i pulzním režimu. Výhodou pevnolátkových typů laseru je vedení laserového paprsku flexibilním optickým vláknem od zdroje záření až po pracovní laserovou hlavu. Kvalitní a úzký svazek zaručuje dostatečnou hustotu výkonu. Používají se také ve zdravotnictví k odstraněné druhotného šedého zákalu nebo k vytvoření otvorů v duhovce ke snížení nitroočního tlaku.



Obr. 5 Nd-YAG krystal [8].

Buzení Nd-YAG laserů je prováděno dvěma způsoby, buď je laser buzen výbojkami (LPSS- Lamp Pumped Solid State), nebo laserovými diodami (DPSS- Diode Pumped Solid State). Typ sestavení buzení a aktivního prostředí je vidět na obr. 6.



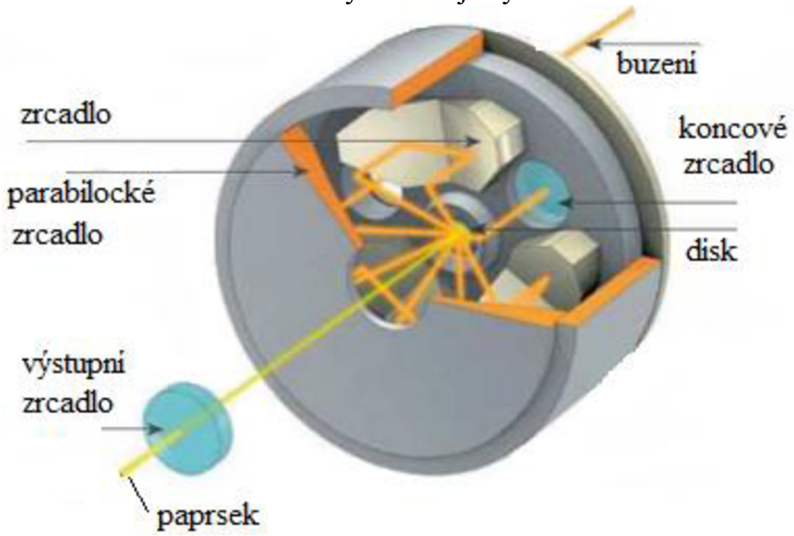
Obr. 6 Buzení Nd-YAG laseru [35].

Buzení pomocí výbojek LPSS má nízkou účinnost a nutnost většího chlazení z důvodu vysoké tepelné energie, jež výbojky vyzařují. Výbojky se musí měnit a tím se zvyšují náklady na jeho provoz. Výhodou je vysoká energie v pulzu a nízké investiční náklady. Tohoto typu laseru je především používáno ve svařování, kde je potřeba hlubšího průvaru nebo k vrtání. Buzení pomocí laserových diod DPSS má vyšší účinnost než buzení výbojkami, ale pořizovací náklady jsou vyšší díky vysoké ceně laserových diod. Na rozdíl od výbojek diody vydrží daleko déle a není potřeba tak velkého chlazení. Použití tohoto typu laserů se nachází hlavně při značení, gravírování kovů a plastů.

- **Diskový laser**

Nejmodernější generací ze skupiny pevnolátkových laserů je diskový laser (obr. 7). Aktivním prostředím je disk z Yb-YAG (Yterbium) laseru, jenž je modifikací Nd-YAG laseru. Výhodou je kompaktnost konstrukce, dobrá kvalita výstupního laserového záření. Vlnová délka záření je 10,7 µm. Jednou z dalších výhod je rovný teplotní profil na disku z Yb-YAG. Čerpání je provedeno vícenásobným dopadem záření laserových diod, které je neaktivním optickým vláknem přivedeno do rezonátoru.

Účinnost čerpání je vysoká, ale účinnost samotného laseru je cca 35%. Chlazení je uskutečněno vzduchem pomocí chladícího trnu, nebo kontaktního chladiče, který zaručuje rovnoměrné chlazení. Jednokotoučové disky dosahují výkonu max. 500 W.

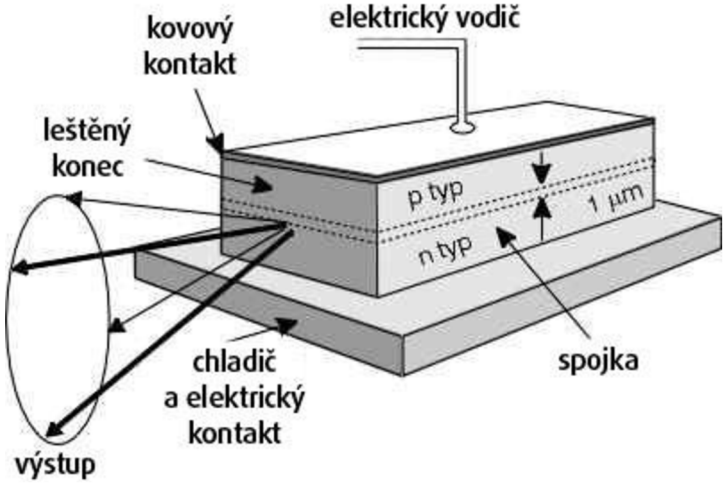


Obr. 7 Diskový laser [53].

Pro dosažení vyššího výkonu (až 16 kW) je možno zapojit více disků sériově. Použití diskového laseru se vyskytuje hlavně ve svařování a řezání kovů, pro jeho přesnost. Díky vedení paprsku v optickém vlákně je možné umístit kompaktní laserovou hlavu na manipulátor nebo průmyslový robot a provádět 3D operace jako je především laserové kalení, značení atd. Nevýhodou je nižší životnost než u laserů vláknových.

- **Polovodičové lasery**

Tento druh laseru je jeden z nejrozšířenějších. Aktivní prostředí tvoří polovodič PN (obr. 8), který se označuje jako laserová dioda. Laserová dioda je tvořena krystalem, jenž je opracován ve tvaru hranolu se stěnami kolmými na sebe. Čerpání aktivního prostředí se děje pomocí proudění elektrického proudu. Aby bylo získáno vyšších výkonů, slučují se laserové diody do sloupců a bloků. Polovodičové lasery mohou dosáhnout výkonu až 10 kW, účinnost je vysoká a dosahuje až 40%. Vlnová délka záření je 1 μm. Laser pracuje pouze v kontinuálním režimu. Záření je viditelné červené a infračervené oblasti.



Obr. 8 Princip polovodičového laseru[44].

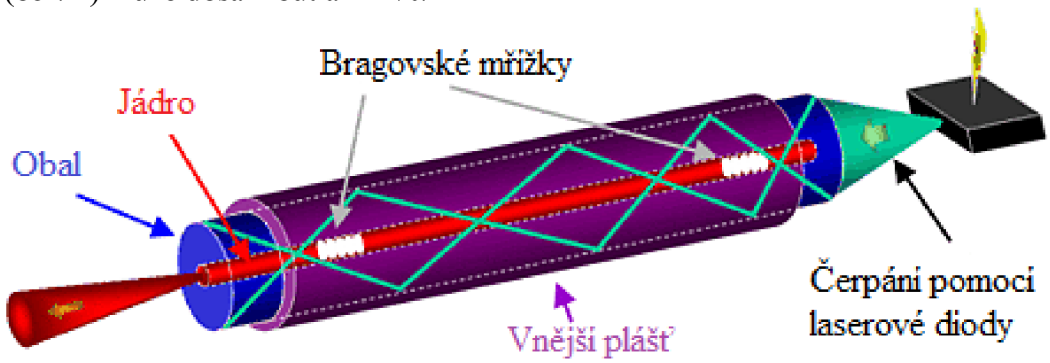
Svazek vystupuje z rezonátoru v různém profilu a pro zaostření svazku se používají mikročočky, jež se nachází na laserových diodách. Vedení svazku je řešeno pomocí optického vlákna, které umožňuje větší vzdálenost mezi zdrojem a laserovou hlavou.

Výstupní laserový paprsek není tak kvalitní jako u jiných pevnolátkových laserů, a proto se používá hlavně při povrchových úpravách součásti. Další využití polovodičových laserů je možné najít ve svařování kovových i nekovových materiálů, výpočetní technice atd. Polovodičové lasery se také používají k čerpání pevnolátkových laserů.

- **Vláknový laser**

Je to nejmodernější typ z řady pevnolátkových laserů. Aktivním prostředím vláknového laseru je aktivní křemíkové optické vlákno, které může mít až několik metrů. Optické vlákno má tloušťku několika mikrometrů. Vlnová délka výstupního svazku je závislá na dopovacím prvku, jímž je většinou ytterbium nebo erbium. Vlnová délka vláknových laserů se pohybuje v rozmezí 1,5 až 2 μm. S použitím ytterbia je možno dosáhnout několikanásobného vyššího výkonu než pomocí ostatních dopovacích prvků. Pomocí laserových modulů je možné paralelním sdružením vláken dosáhnout výkonu až desítek kilowatů. Výhodou vláknového laserů je jeho velmi kvalitní paprsek, který je používán především u přesných operací. Ve strojírenství je to hlavně řezání, vrtání přesných děr, nebo ve svařování s vyššími výkony. Při nižších výkonech několika stovek wattů se lasery používají pro značení nebo gravírování oceli. Dále se využívají například v chirurgii nebo telekomunikacích.

Další nemalou výhodou je relativní jednoduchost konstrukce oproti ostatním typům a nenáročnost na údržbu. Pracovní režim může být kontinuální i pulzní. Účinnost vláknového laseru (obr. 9) může dosáhnout až 40%.



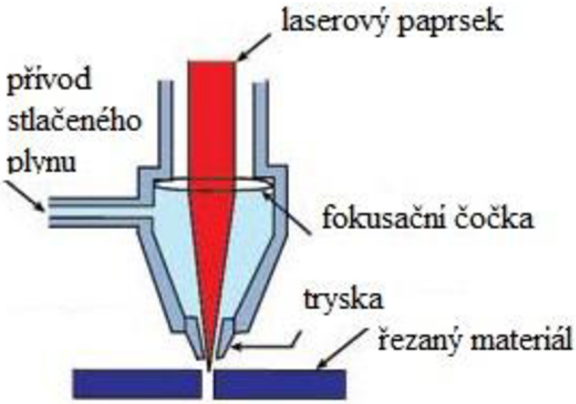
Obr. 9 Schéma vláknového laseru [51].

1.5 Použití laserů v průmyslu [1], [4], [6], [12], [20], [24], [27], [31], [55], [38], [39], [63]

Laserový paprsek je v průmyslu využíván v mnoha případech, to pro své vlastnosti jako je přesnost, orientace paprsku, tloušťka paprsku, vnesené teplo při dopadu na materiál apod. Díky svým kvalitám laser představuje např. při řezání plechů hlavního představitele, bez něhož by se dnešní průmysl neobešel. Laserový paprsek dokáže vnést obrovskou energii do malého bodu, tudíž je více než vhodný pro svařování, řezání, gravírování, značení, nebo k tepelnému zpracování.

- **Laserové řezání**

  Je to nejrozšířenější laserová aplikace ve strojním průmyslu (obr. 10), díky možnosti velmi úzkého řezu od 0,1 do 1 mm s vysokou přesnosti rozměrů. Také tepelně ovlivněná oblast řezu je malá, téměř nulová. Nejrozšířenějším typem laserů pro řezání je CO_2 laser, ale postupně se více zavádí použití pevnolátkových laserů.

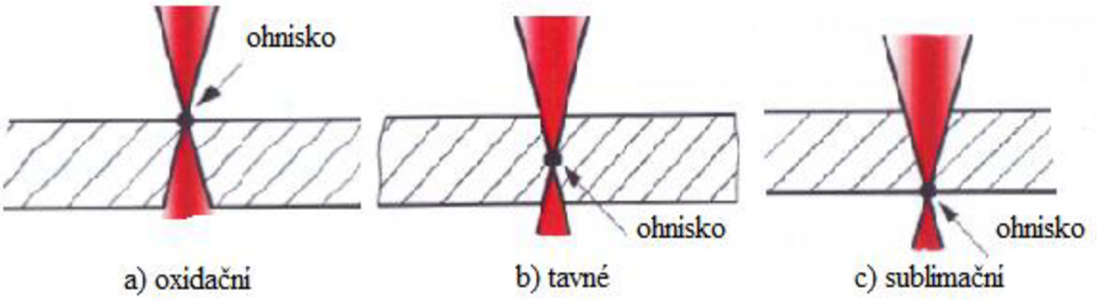


Obr. 10 Laserové řezání [27].

Dnešní zařízení pro řezání plechů obsahují také souřadnicové řezné stoly, které umožňují rychlou výměnu tabulového plechu a zaručují přesnost řezu. Stroje mají vysokou dynamiku a produktivitu díky tzv. létající optice. Při řezání plechů je také možné provádět optimalizaci procesu. Je umožněno řízení výkonu při řezu, řízení vpichu paprsku do materiálu, automatizace výroby apod. Díky robotickým zařízením je možné upevnit laserovou řezací hlavu na rameno robota a řezat ve trojrozměrném prostoru. Tohoto se využívá zejména při řezání profilů, trubek a jiných složitějších součásti. Není nutno vždy řezat kolmo k materiálu, je možné také řezat pod úhlem pro díly, které se dále svařují s úkosem apod. Nevýhodou řezání pod úhlem je odrazivost paprsku od materiálu, a proto maximální úhel naklonění řezací hlavy je 45°.

Laserové řezání se rozděluje do tří skupin, skupiny se liší podle druhu řezaného materiálu, přivedeného plynu, rychlostí řezu apod. Metody se nazývají oxidační, tavné a sublimační.

Oxidační řezání - Při oxidačním řezání (obr. 11a) se používá jako přídavný plyn kyslík, kde roztavený kov částečně shoří v proudu kyslíku. Spotřeba řezného plynu není vysoká. Při řezání vzniká exotermická reakce, která podstatně zvyšuje řeznou rychlost oproti ostatním metodám a snižuje výkon laseru. Při řezání vznikají okuje a řez není tak čistý jako při použití sublimačního nebo tavného způsobu. Je vhodné pro řezání konstrukčních uhlíkatých ocelí.



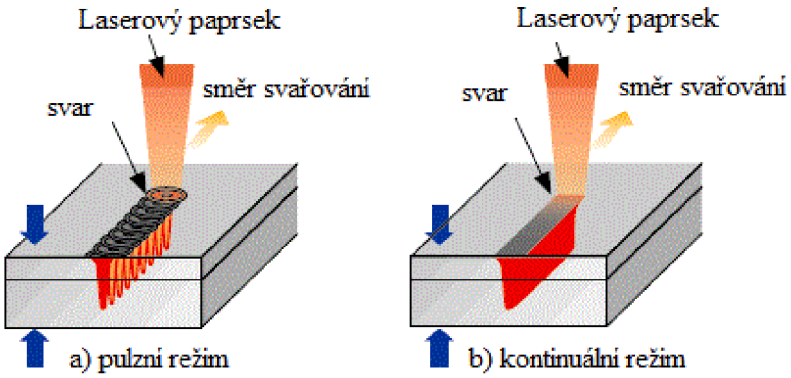
Obr. 11 Druhy řezání laserem [31].

Tavné řezání – Roztavený kov je z řezné spáry odstraňován proudem inertního plynu, jímž je většinou dusík nebo argon. Tato metoda spotřebuje velké množství řezného plynu. Je potřeba vysokého výkonu laseru, materiál se taví pomocí paprsku a přiváděným stlačeným plynem je vyfukáván z řezné spáry. Tento způsob je vhodný pro řezání nerezových ocelí a barevných kovů. Díky pevnolátkovým laserům je tavné řezání tenkých plechů velice rychlé a další výhodou je nezoxidovaná řezná hrana.

Sublimační řezání – Sublimační řezání se používá pro dělení tenkých materiálů, jako jsou fólie, textilie apod. Dále se používá pro řezání dřeva a jiných materiálů, jež se nemají schopnost tavit. Přídavnými plyny jsou dusík, argon nebo také hélium. Materiál se při řezání nevyfoukává z řezné spáry, ale sublimuje, pro sublimaci je potřeba vysokého výkonu laseru.

- **Svařování laserem**

Princip svařování spočívá v působení laserového paprsku, který má vysokou plošnou hustotu výkonu, čímž dochází k ohřevu v místě svaru. Po dosažení teploty tavení svařovaných materiálů dojde ke spojení a následnému ochlazení. Ochlazení je rychlejší než u běžných způsobů svařování, tepelně ovlivněná oblast není tak velká a tím nedochází k velkým vnitřním napětím a deformacím. Svařovat lze v pulzním nebo kontinuálním režimu (obr. 12).



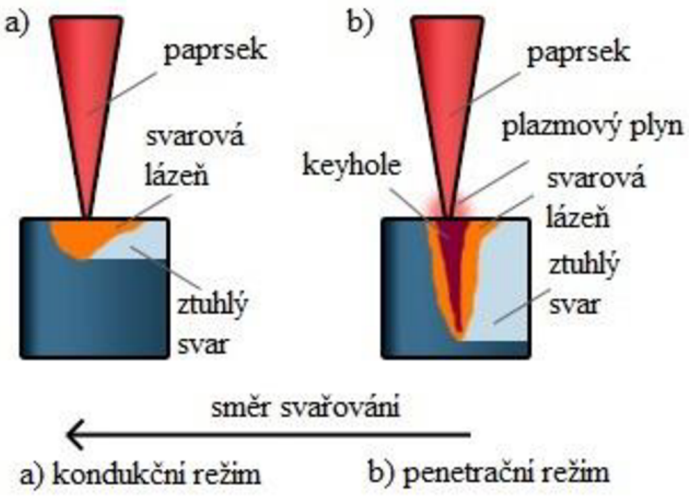
Obr. 12 Režimy laserové svařování [6].

Svařováním pomocí laserového paprsku vzniká velmi kvalitní svar. Svar má dobrou čistotu a vysokou pevnost. Svařování probíhá rychle a je možné nastavovat hloubku průvaru a tloušťku svaru. V drtivé většině se svařuje bez přídavného materiálu. Svařované plochy nesmí být od sebe vzdáleny více jak 0,5 mm, při větší vzdálenosti je možné použít přídavný materiál ve formě drátu. Svařovat lze také složitější tvary pomocí upevnění svařovací hlavy na rameno robota. Nejčastěji se k svařování používají pevnolátkové nebo diodové lasery. Při svařování je k místu

svaru také přiváděn ochranný plyn. Mezi svařovací hlavou a svařovaným materiálem je tzv. crossjet, který chrání svařovací optiku proti plazmovým plynům nebo případnému odprsknutí materiálu.

Dále je možné rozdělit svařování laserem na režimy kondukční a penetrační (obr. 13). Kondukční svařování je prováděno do hustoty výkonu max. 10^6 W.cm^{-2}, kde dochází pouze k minimálnímu odpaření materiálu. Energie je přivedena do místa svaru pouze kondukcí tepla. Svar má menší hloubku průvaru než pulzní režim a má větší tepelně ovlivněnou oblast.

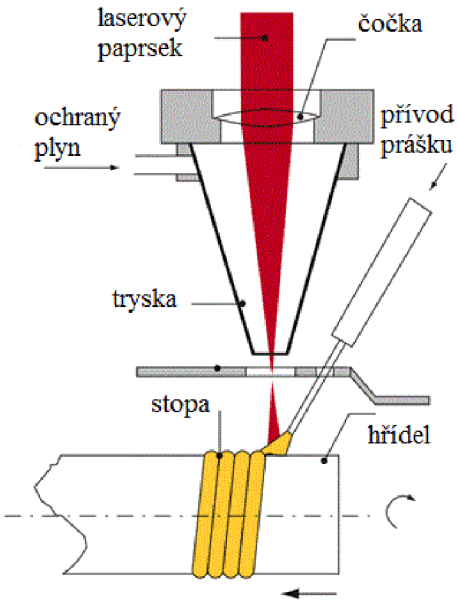
Při penetračním režimu se vytváří v místě dopadu paprsku na svařovaný materiál tzv. keyhole, jež vzniká vytvořením hlubokého a úzkého otvoru, který je vyplněn plazmovými plyny. Ve směru svařování se keyhole utváří a na zadní stěně opět chladne a vzniká svar. Hloubka svaru může být až 25 mm. Při tomto typu svařování vzniká jen velmi malá tepelně ovlivněná oblast, díky velké rychlosti svařování.



Obr. 13 Režimy svařování [20].

- **Laserové navařování**

Laserové navařování je dalším z řady využití laserového paprsku, spočívá v navařování prášku, který je pomocí dávkového podavače podáván do osy laserového paprsku před dopadem na materiál. Prášek je unášen buď plynem, nebo padá samovolně. Prášek, jenž padá na materiál, je nataven paprskem, který také částečně nataví základní materiál a tím vznikne difúzní spojení dvou rozdílných kovů. Tento proces příliš neovlivňuje základní materiál, tudíž nevzniká žádné vnitřní napětí a teplo z nanášené vrstvy je odváděno do materiálu. Přídavné materiály mohou být jak keramické tak kovové např. nástrojové oceli, slitiny Ti, Zr, Co, Fe, kompozity atd. Výhodou laserového navařování (obr. 14) je nízká porezita návaru a také nízké tepelné ovlivnění základního materiálu.

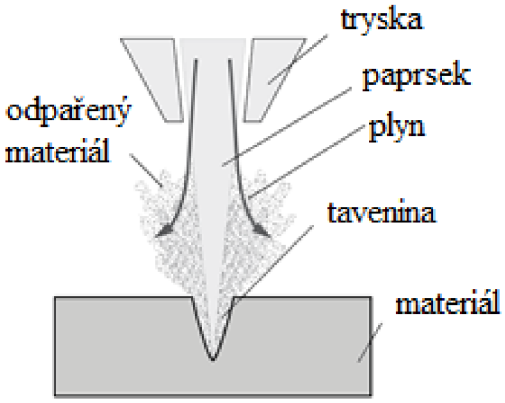


Obr. 14 Laserové navařování [38].

Návary materiálu se provádějí k zajištění lepších vlastností např. otěruvzdornost, tvrdost, teplotní stabilita, korozivzdornost, žáruvzdornost, nebo také k opravám součástí. Vrstvy návaru mohou mít až několik milimetrů. Tato technologie se používá pro navařování hřídelí, proudových motorů, ozubených kol, hřebenů, opravy licích forem atd.

- **Laserové vrtání**

Pro laserové vrtání (obr. 15) se používá krátký impuls laseru s vysokou hustotou výkonu. Paprsek dodává energii do obrobku ve velmi krátké době a tím se materiál taví a odpařuje. Čím větší je energie pulzu, tím víc se materiál taví a odpařuje. Při odpařování dochází ke zvětšení objemu materiálu ve vrtaném otvoru a zvýšení tlaku. Tlak poté vypudí roztavený materiál pryč z otvoru. Vrtat lze v různých režimech (impulsové, nárazové vrtání) podle přesnosti a velikosti děr. Nárazové vrtání je přesnější než vrtání impulsové. Pro vrtání se používají výkonné vláknové lasery. Plošná hustota energie paprsku dosahuje až MW. Výhodou laserového vrtání je vrtání malých a přesných otvorů od 0,1 mm. Další výhody jsou rychlost procesu, bezkontaktnost, spolehlivost a flexibilita. Vrtal lze plast, papír, dřevo, kevlar, barevné kovy, ocel apod.



Obr. 15 Laserové vrtání [63].

- **Laserové značení**

Velmi rozšířenou laserovou aplikací je laserové značení (obr. 16). Jedná se o ovlivnění nebo odpaření povrchové vrstvy za velmi krátký čas. V minulosti se tato metoda používala pouze pro značení hotových dílů nebo ke značení stupnic na měřidlech, ale dnes se značí i spotřební zboží, které se značilo inkoustem nebo barvou. Výhodou je vysoká rychlost značení oproti starším metodám. Dále je to bezkontaktní způsob značení, takže nedochází k poškození okolního materiálu, například otlačení razníku. Nejčastěji se používají CO_2 lasery, avšak dnes se prosazují vláknové lasery pro svou jednoduchost a nenáročnost na údržbu, účinnost a schopnost pracovat v pulzním i kontinuálním režimu. Požadovaný výkon pro značení do 100 W. Pohyb laserové hlavy je řešen pomocí plotrového systému, kde je hlava umístěna na pohyblivých částech, kterým je umožněn pohyb v osách x a y. Výhodou tohoto systému je popisování velkých ploch. Rychlejším způsobem je popisování přes masku, kde je vytvořena šablona, přes niž je materiál osvícen. Tohoto způsobu se využívá zejména v popisování velkých sérii díky rychlosti metody. Dalším způsobem vytvoření obrazu na materiálu je pomocí rozmítání svazku, tento princip je popsán v kap. 2.4.1.

Obr. 16 Příklad laserového značení šroubu [55].

- **Laserové gravírování (texturování)**

Dalším příkladem laserových aplikací je laserové gravírování (obr. 17). Je to obdoba laserového značení, kde je však použito vyšších výkonů a dochází k odpařování materiálu v místě působení paprsku. Touto technologií je možné vytvářet jemné reliéfy nebo dutiny větších hloubek. Omezení laserového gravírování je ve velikosti nejmenšího detailu, jenž odpovídá tloušťce paprsku. Gravírování je používáno při výrobě razníku, detailů forem pro vstřikování plastů. Další aplikace této metody přichází v úvahu při gravírování různých tvarů a log firem nebo výrobě mazacích drážek pro kluzná ložiska apod. Gravírovat je možné sklo, ocel, barevné kovy a jiné.

Zvláštním druhem gravírování je texturování. Pomocí této metody je možné vytvořit na povrchu texturu, která změní jeho vlastnosti. Tohoto je využíváno zejména ke zdrsnění povrchu nebo pro změnu koeficientu tření. Díky zdrsnění a rovnoměrné textuře je například umožněno mazivu rovnoměrné nanášení.

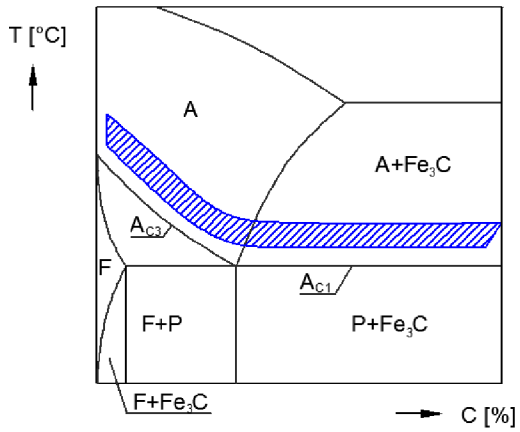
Obr. 17 Příklad laserového gravírování [55].

2 METODY ÚPRAVY TVRDOSTI POVRCHU [2], [64], [72]

Dnes existuje spousta metod zpracování povrchu, na něhož klademe vysoké nároky, jak při zatěžování silou, otěrem, či teplotně. Povrch zpracováváme kvůli zvýšení jeho životnosti v určitých podmínkách. Největší podíl na tepelném zpracovávání má kalení. Jedná se o zpevňování povrchu fázovou transformací. Je to druh povrchové úpravy, který nám umožňuje získání vyšší tvrdosti na povrchu součásti za zachování houževnatosti jádra.

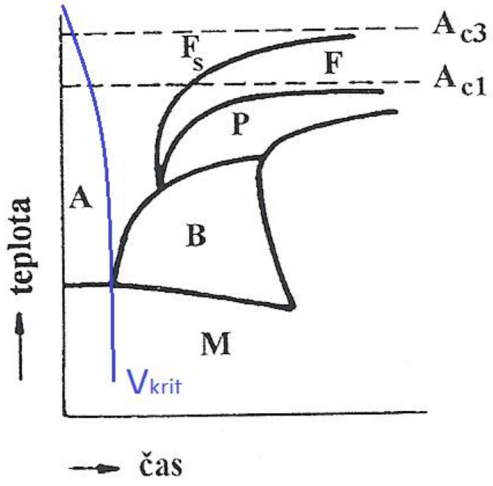
2.1 Kalení [2], [18], [64], [72]

Kalení je jedním ze způsobů tepelného zpracování materiálu. Umožňuje zvýšit tvrdost materiálu na povrchu a zachovat houževnatost jádra. Postupem při kalení je ohřev na kalící teplotu a následné ochlazení v daném ochlazovacím médiu. Díky rychlému ochlazení z kalící teploty se austenitická struktura přemění na strukturu bainitickou nebo martenzitickou. Kalící teplotu volíme 30 – 50 °C nad teplotu A_{c1} u nadeutektoidních ocelí a nad A_{c3} u podeutektoidních ocelí, tyto teploty jsou zobrazeny na (obr. 18). Oceli, které nemusíme ochlazovat v médiích, se nazývají samokalitelné. Mezi samokalitelné oceli patří například rychlořezné oceli. Oceli s obsahem uhlíku pod 0,2 % jsou nekalitelné. Při obsahu uhlíku nad 0,3 % jsou oceli dobře kalitelné.



Obr. 18 Diagram Fe-Fe3C a pásmo kalících teplot [72].

Ochlazovací prostředí je voleno dle materiálu, chladí se v solné nebo vodní lázni, nebo také v oleji. Typ vodní lázně je volen dle prokalitelnosti materiálu, která se určuje pomocí Jominyho čelní zkoušky prokalitelnosti. Zkouška spočívá v zahřátí zkušebního válečku a poté ochlazování čela vzorku vodní sprchou. Dále se vybrousí ploška po obvodu a měří se tvrdost se zvyšující se vzdálenosti od čela, tímto způsobem je zjišťováno, jakou má materiál schopnost zakalení. Ochlazování ve vodní lázni je nejrychlejší, následuje ochlazování v minerálním oleji a nejpomalejší je ochlazování v roztavené solné lázni. Při ochlazování ve vodní lázni je potřeba lázeň vířit, aby nedocházelo k vytvoření vzduchového polštáře, jenž by značně snížil ochlazovací rychlost a zakalení by nebylo správné. Při vysoké rychlosti ochlazování vzniká velké napětí v materiálu, které může způsobit prasknutí. Napětí vzniká v důsledku velkých teplotních rozdílů na povrchu a v jádře součásti. Rychlost ochlazování je určována z diagramu ARA. Ochlazovací rychlost musí být větší než kritická rychlost ochlazování (obr. 19). Kritická rychlost ochlazování je nejpomalejší rychlost, kdy výslednou strukturu tvoří jen martenzit.



Obr. 19 ARA diagram podeutektoidní oceli [72].

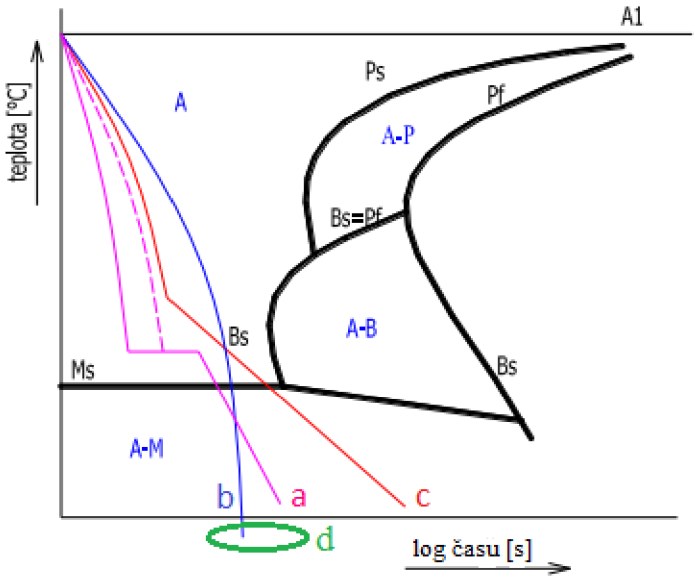
Základní rozdělení kalení je na kalení martenzitické a bainitické. Tyto dva druhy kalení mají další své rozdělení.

Martenzitické - nepřetržité,
-přetržité – termální, se zmrazováním, lomené.
Bainitické - izotermické,
- nepřetržité.

2.1.1 Martenzitické kalení [72], [64]

Při použití nepřetržitého kalení (Obr. 20) křivka *b* se ohřátá součást kalí pouze v jednom prostředí, nejčastěji ve vodě. Tento způsob se používá při snížených požadavcích na zakalenou součást. Přechod přes křivky M_s (martenzit start) a M_f (martenzit finiš) je velice rychlý.

U termálního kalení (obr. 20) křivka *a* je první fáze ohřevu stejná jako při nepřetržitém kalení. Při dosažení teploty, těsně nad hranici křivky M_s se kalená součást vytáhne z chladícího média a vloží se do média s nižšími chladícími schopnostmi např. solná lázeň, kde se po určitou dobu udržuje nad křivkou M_s. Důvodem je částečné vyrovnání teploty na povrchu a v jádře součásti. Před začátkem přeměny na bainit se součást vyjme z lázně a dochladí se na vzduchu. Důvodem tohoto pracnějšího procesu je, co největší odstranění vnitřního napětí.



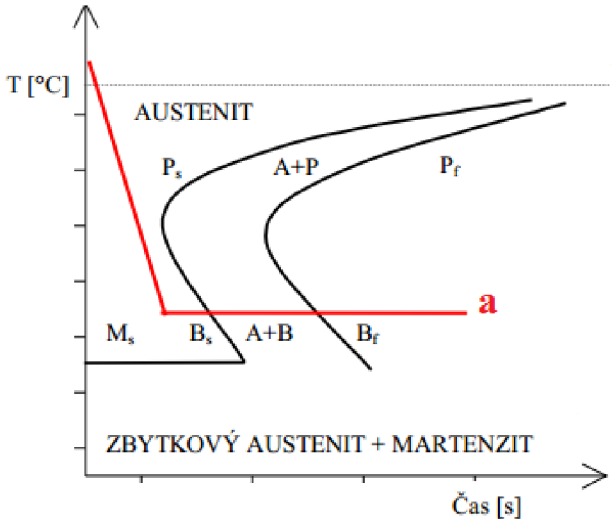
Obr. 20 ARA diagram s typy martenzitického kalení [72].

Dalším představitelem martenzitického kalení je kalení se zmrazováním (obr. 20) křivka *b*. Tento postup se používá zejména u nadeutektoidních ocelí, které mají teplotu konce martenzitické přeměny pod 0°C. Nejprve se ochlazuje ve vodní lázni a poté se chladí v kapalném dusíku, jenž je schopen ochladit součást pod bod mrazu. Toto kalení je velmi nákladné. Při lomeném kalení (obr. 20) křivka *c* se ohřátá součást ochlazuje prudce jako při nepřetržitém kalení, ale těsně před teplotou M_s se předmět vyjme z prvotní ochlazovací lázně a vloží se do lázně s nižší ochlazovací schopností například do oleje.

2.1.2 Bainitické kalení [68], [72]

Při izotermickém kalení se materiál ochladí těsně pod křivky IRA diagramu. Ochlazuje se v solné nebo kovové lázni. Součást necháme v lázni tak dlouho, dokud se austenit zcela nepřemění na bainit, poté se součást vyjme z lázně a dochladí se na vzduchu. Bainit je formou perlitu vznikající při přeměně austenitu. Bainit není tak tvrdý jako martenzit, avšak je houževnatější, tudíž není tak náchylný na praskání. Pokud vznikne při bainitickém kalení pouze bainitická struktura bez přítomnosti martenzitu, nemusí se dále součást tepelně zpracovávat.

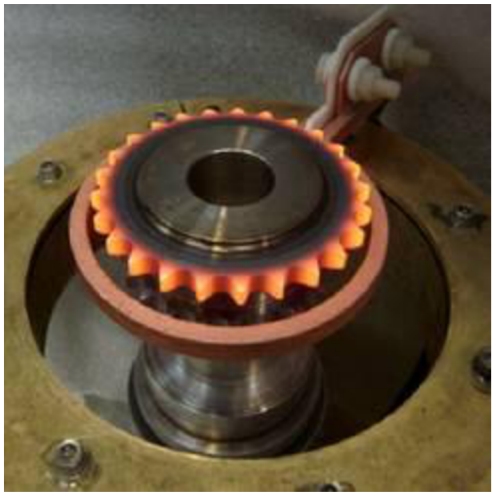
Jestliže u slitinových ocelí je perlitická a bainitická část zřetelně oddělená, může se provést nepřetržité bainitické kalení. Podle rychlosti ochlazování vzniká buď samotný bainit, nebo směs bainitu a martenzitu. Křivkám v diagramu se někdy také říka „nos“ (obr. 21).



Obr. 21 IRA diagram bainitického kalení [72].

2.2 Indukční kalení [10], [23], [56], [17]

Indukční kalení (obr. 22) je založeno na ohřátí dané povrchové vrstvy indukovanými proudy. Tyto proudy mohou dosahovat středních až vysokých frekvencí, střední frekvence jsou od 1 kHz až 15kHz. Při používání vyšších frekvencí je rozsah 150 kHz až 1MHz. Principem indukčního ohřevu je, že kolem každého vodiče, kterým protéká elektrický proud, vzniká magnetické pole. Střídavý proud vybudí střídavé magnetické pole. Pokud tento vodič přiblížíme dostatečně blízko ke kovovému předmětu, díky elektromagnetické indukci se v něm vybudí tzv. vířivé proudy. Ty způsobí ohřev povrchové vrstvy předmětu. Výhodou tohoto ohřevu je bezkontaktnost mezi induktorem a zahřívaným materiálem. Induktor je elektrický vodič většinou v podobě smyčky s jedním nebo více vinutími, dá se také označit cívkou. Problémem je kombinace vytvoření silného magnetického pole a vzájemného umístění součásti, který se má zahřát v ohnisku elektromagnetického pole tak, aby byl přenos silových čar optimální a zahříval obrobek rovnoměrně. Výsledné vířivé a magnetické proudy mají na povrchu obrobku největší intenzitu, takže je nejvíce ohřívaná povrchová vrstva. Tento typ kalení je dobře regulovatelný. Nevýhodou je, že induktor má pro každou danou ohřívanou součást jiný tvar. Použití této metody hlavně ve velkosériové výrobě, protože se nevyplatí vyrobit induktor pro malé série.



Obr. 22 Indukční kalení [23].

Hloubka průniku magnetického střídavého pole se dá vypočítat pomocí vztahu, který zahrnuje frekvenci, magnetickou permeabilitu kovu a elektrický odpor:

$$h = \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}} \quad [\text{mm}] \qquad (2.2)$$

kde ρ [Ω.m] -specifický elektrický odpor
μ [-] -relativní magnetická permeabilita kovu
f [Hz] -frekvence.

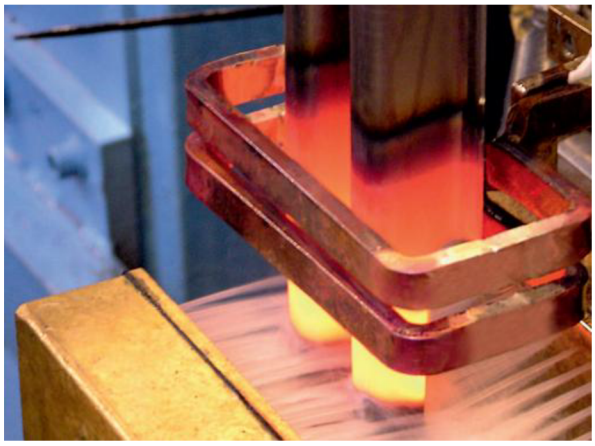
Tloušťka ohřáté vrstvy, kterou protéká proud, je nepřímo úměrná frekvenci a je také závislá na době a rychlosti ohřevu (tab. 3).

Tab. 3 Frekvence doporučené pro použití indukčního kalení oceli [17].

Hloubka [mm]	f_{min} [kHz]	$f_{opt.}$ [kHz]	$f_{max.}$ [kHz]
1	15	60	/
1,5	7	25	100
2	4	15	60
3	1,5	7	30
4	1	4	15
6	0,5	1,5	8
10	0,15	0,5	2,5

Pro indukční kalení je potřeba získání velkých proudů (1000 - 10 000A). Při takových proudech by se induktor, jenž je vytvořen z měděných trubek hned roztavil, proto musí být chlazen vodou. Voda musí induktorem proudit po celou dobu ohřevu.

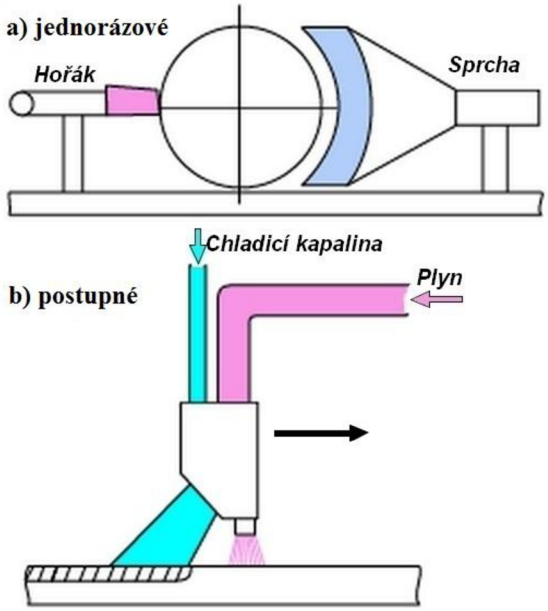
Na obr. 23 je vidět princip nepřetržitého indukčního kalení, kde profil prochází induktorem a je ohříván. Ihned po ohřevu následuje vodní sprcha, která ochlazuje ohřátou vrstvu. Lze také kalit přetržitým způsobem, kde se materiál ohřeje a po vyjmutí z induktoru se vloží do chladící lázně.



Obr. 23 Nepřetržité indukční kalení [23].

2.3 Kalení plamenem [15], [16], [18],

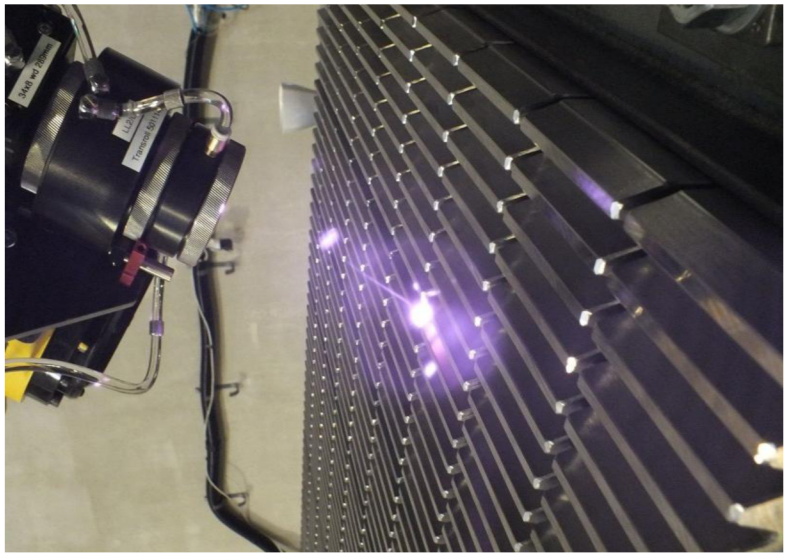
Tato metoda je nejdéle používaným způsobem kalení. Jako zdroj tepla se používá kyslíko-acetylénový plamen, který dosahuje teploty až 3200°C. Plamen můžeme rozdělit do 3 skupin: neutrální, oxidační a redukční. Neutrální plamen má poměr O_2:C_2H_2=1:1, přebytek acetylénu v plamenu značí redukční plamen a při přebytku kyslíku dostáváme plamen oxidační. V porovnání s metodou indukčního ohřevu je kalení plamenem pomalejší, nestabilnější a nelze zaručit hloubku zakalené vrstvy na dané kalené ploše všude konstantní. Kalit lze dvěma způsoby- pohyblivý hořák, nebo pohyblivá součást. Je-li použit pohyblivý hořák, je součástí hořáku také vodní sprcha, která ihned po požadovaném ohřátí zchladí ohřátý povrch. Hloubka zakalené vrstvy je nejméně 2mm. Kalení plamenem lze vidět na (obr. 24).



Obr. 24 Kalení plamenem [15].

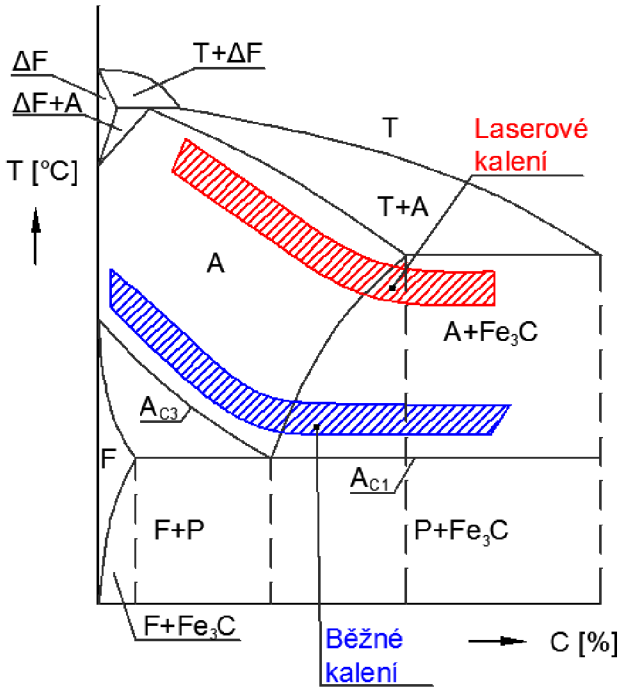
2.4 Povrchové kalení laserem [2], [3], [5], [40], [54], [67], [71], [72]

Laser je zdroj vysoce energetického záření, jež umožňuje ohřev nebo natavení vrstvy povrchu materiálu. Tento děj je založen na interakci laserového paprsku se strukturou materiálu. Je to velmi rychlý děj, který se pohybuje v desetinách sekundy. Výhodou této metody je, že po zakalení není na materiálu v podstatě žádná přechodová oblast. Díky tomu je materiál méně deformačně namáhán. Při laserovém kalení (obr. 25) se nemusí součást dále ochlazovat v ochlazovacím médiu, materiál odvede teplo z natavené oblasti do svého jádra a okolí. Díky tomuto způsobu samoochlazování chladne povrchová vrstva jako poslední, nastává samozakalení. Nevýhodou laserového kalení je maximální prokalená tloušťka, jež je cca 2 mm v závislosti na tepelné vodivosti materiálu. Jestliže by se zvedl příliš výkon pro ohřev materiálu, materiál by se mohl začít spalovat a hořet.



Obr. 25 Kalení laserem [40].

Při kalení musíme dosáhnout teploty austenitizace materiálu. Tuto podmínku nelze obejít výkonnějšími lasery ani změnou pohybu laserové kalící hlavy. Jednou z možností je tzv. hybridní kalení, které kombinuje laserové kalení s indukčním ohřevem, kde induktor je součásti kalící hlavy. Tloušťka stěny kalené součásti by měla být minimálně 10x silnější než kalená hloubka, aby se teplo dostatečně rychle odvedlo z místa ohřevu. Možností, jak zakalit tyto díly, je ochlazování přivedeným proudem vzduchu nebo ochlazením v lázni. Běžné diagramy pro tepelné zpracování oceli neplatí při kalení laserem, viz obr. 26. Čím větší zrno, tím je lepší vytvrditelnost kaleného materiálu. Struktura není dostatečně homogenizována při rychlém ohřevu, rozpuštěný uhlík se nedostane do feritických zrn a způsobuje rozkolísání hodnot tvrdosti. Tento problém nastává u velkých odlitků, forem nebo strojních dílů.



Obr. 26 Diagram kalících teplot [72].

U vysoce legovaných a uhlíkových materiálů je pozitivní rychlost zpracování, při níž je zachovávána jemnozrnnost struktury. Při zpracování vzniká jemnozrnný martenzit, který není náchylný ke vzniku a postupnému šíření trhlin. Při porovnání s objemovým kalením je povrchové kalení lepší, vzniká tzv. supertvrdost. Karbidy, které jsou obsaženy v materiálu, potřebují čas na rozpuštění. Čím větší je karbid, tím delší dobu potřebuje k rozpuštění. Jestliže se karbid celý nerozpustí, nebude mít matrice dostatek uhlíku.

Při nedostatku uhlíku by se materiál choval jako nízkouhlíkový. Při kalení je potřeba rozlišovat, zda je kalena tvářená (jemnozrnná) nebo litá (hrubozrnná) součást. Musí se zohlednit, jak byla součást před kalením zpracována. Při pomalu transformující se rovnovážné struktuře bude rozpouštění karbidů trvat déle, protože jsou podstatně větší. Materiály martenzitické nebo bainitické mají karbidy podstatně menší, proto jsou snadno rozpustitelné. U žíhaných materiálů může být transformační teplota Ac_3 až o 200 °C větší než u materiálů kalených. Pásmo kalících teplot, při kalení laserem lze vidět na obr. 26. Parametry pro povrchové kalení laserem se liší pro konstrukční a nástrojovou ocel díky svému obsahu karbidů a legujícím prvkům. Na kaleném povrchu vzniká malá oxidační vrstvička, která nemá z hlediska použití žádný vliv a dá se jednoduše odstranit obrobením nebo broušením. Oxidační vrstvě se dá předejít tím, že materiál kalíme s přívodem ochranného plynu.

Obr. 27 Kalený segment ohýbacího nástroje [67].

Řízení výkonu laseru je snadné díky systémům, které jsou dnes běžně na trhu. Software dokáže dodržet teplotu s přesností ±10 K. Tato přesnost je rozhodující hlavně při měnící se tepelné vodivosti materiálu (dva různé materiály). Teplotu můžeme měřit v místě kalení termokamerou, jež může být součásti kalící hlavy. Teplota je vyhodnocena a řídicí systém upraví výkon laseru. Uspořádání těchto měřících prvků zajišťuje optimální kalící podmínky a tedy dosažení kvalitního zakalení povrchu bez natavení. Pracovní rychlost pohybu paprsku vůči kalenému materiálu a tvar součásti jsou dalšími parametry pro proces kalení. Pro kalení vnitřních ploch lze použít systém pomocných zrcadel umožňující odklon a rotaci svazku. Pomocí softwaru pro analýzu záření laseru je možné měřit a zobrazit rozdělení hustoty energie v paprsku. Pomocí simulačního softwaru se programuje pohyb laseru podél kalené součásti, jež se importuje z 3D modelářských systémů. Dnes je již možné používat mobilní lasery, umožňující zakalení přímo u zákazníka. Tyto mobilní lasery se používají u velkých součásti (obr. 27), které se obtížně demontují nebo u nichž není umožněn převoz. Jedním z problémů je také šířka laserového paprsku, jež je limitována výkonem laseru. Jeho šířka se obvykle pohybuje v jednotkách milimetrů. Jestliže se kalí širší stopa, než je šířka paprsku, je nutné, aby se stopy překrývaly. Při překrytí stop vzniká tepelně ovlivněná oblast. V místech, kde se stopy překrývají, vznikají rozdílné tvrdosti povrchu a s tím související změny vnitřních napětí.

Kalení laserem je používáno více jak 10 let. Nejvíce se pro kalení laserem používají CO_2 lasery, lasery Nd:YAG, vláknové a vysoce výkonné diodové lasery. Při použití diodových laserů je absorpce energie z paprsku do materiálu vyšší. Jeho účinnost je kolem 35% a je nejhospodárnější. Rychlost růstu teploty je až 1000 $K.s^{-1}$. Lasery lze také použít pro materiály předem nauhličené nebo s nitridovaným povrchem. Nejčastěji se s laserovým kalením lze setkat v automobilovém a strojním průmyslu, kde jsou kladeny vysoké požadavky na tvrdost materiálu. Laserové kalení lze také využít pro malosériovou i velkosériovou výrobu. Ve většině případů není nutné použití speciálního přípravku, který by ekonomicky znevýhodnil kusovou výrobu.

Výhody laserového kalení:

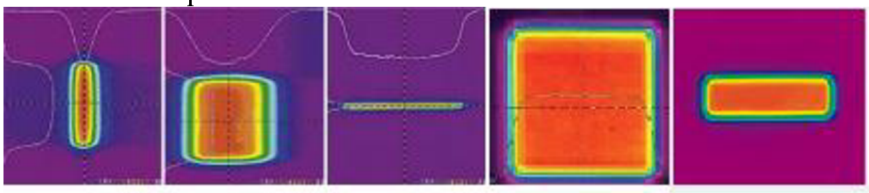
- Lokální povrchové kalení požadovaných míst a zachování houževnatosti neovlivněného materiálu,
- ekologičnost procesu,
- energetická účinnost,
- vysoké procesní rychlosti a efektivita,
- snadná automatizace procesu,
- online řízení teploty procesu,
- nízká teplotní deformace,
- bez povrchových trhlin.

Nejčastější použití:

- Lopatky turbín,
- střižné a ohýbací nástroje,
- tvarově složité licí a lisovací formy,
- pístní kroužky,
- ložisková pouzdra,
- ozubená kola.

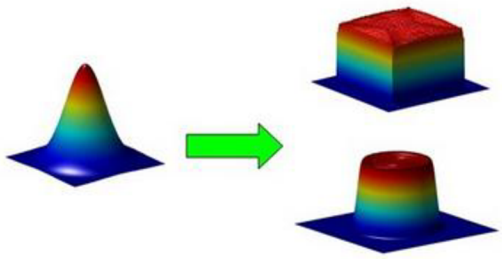
2.4.1 Úprava laserového paprsku pro laserové kalení [2], [5], [26], [36], [52], [54], [57]

Požadovaným výstupním tvarem laserového paprsku (obr. 28) je čtvercový nebo obdélníkový průřez, nikoliv však kruhový, jenž primárně z laserové hlavy vyzařuje. Existuje více možnosti úpravy tvaru paprsku a to buď pomocí sady prizmatických zrcadel nebo tzv. beam integrátoru, který je vhodnější pro své jednoduché použití. Při použití plynového CO_2 laseru se používají prizmatická zrcadla, jež jsou však náročná pro svou konstrukci a seřízení.



Obr. 28 Tvary paprsku pro laserové kalení [52].

Změna kruhového průřezu na obdélníkový lze vidět na obr. 29.

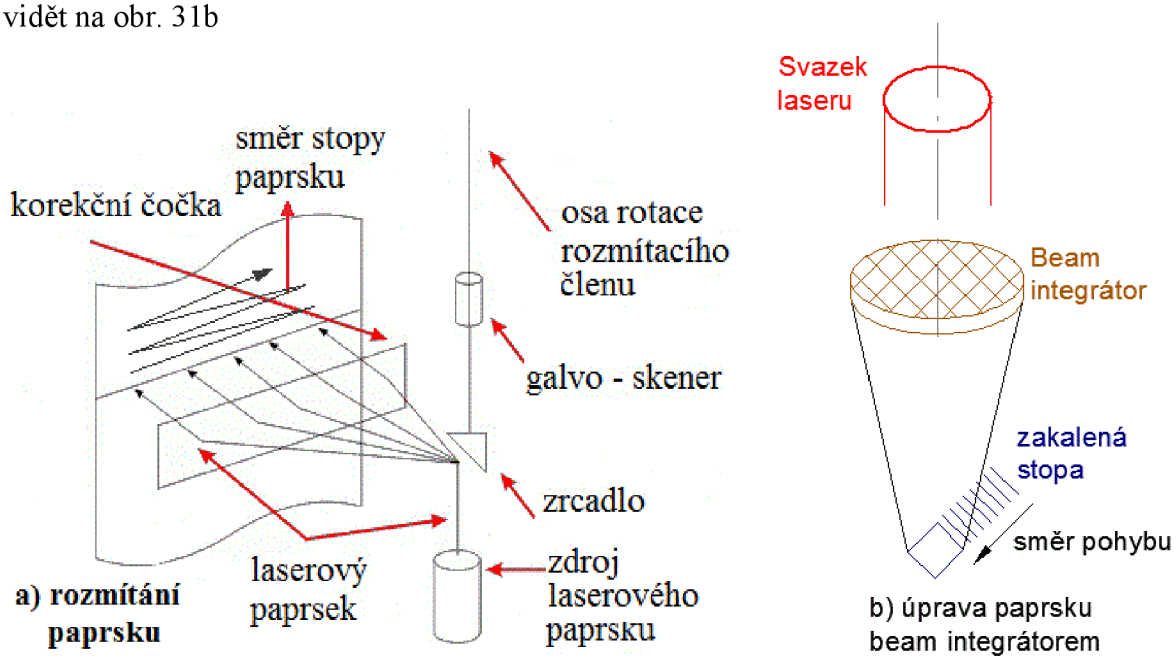


Obr. 29 Přeměna kruhového paprsku na hranatý [36].

Beam integrátor (obr. 30) je utvořen broušeným optickým elementem, které má na svém povrchu broušené plošky tzv. fazetky o velikosti 2 až 6 mm. Beam integrátor má průměr do 75 mm a používá se pro úpravu tvaru paprsku u pevnolátkových laserů. Integrátory jsou vyráběny z ZnSe nebo ZnS materiálu pro CO_2 lasery a křemičité sklo při použití pevnolátkových laserů. Integrátor je používán u výkonných laserů, jež nemají tak dobrou koherenci záření. Použití integrátoru je vhodné zejména v aplikacích, jako je svařování, navařování a tepelná úprava materiálu.

Obr. 30 Beam integrátor [26].

Jedním z dalších způsobů, jak upravit paprsek pro účely tepelného zpracování, je rozmítání paprsku pomocí optiky, jenž se natáčí kolem osy díky galvo-skeneru (obr. 31a). Na ose je také zrcadlo, které svým rychlým natáčením kolem osy odráží úzce fokusovaný laserový paprsek, jenž následně dopadá na materiál. Díky tomu, jde při procesu kalení, velmi rychle a plynule měnit šířku stopy a tím také zakalit tvarově složitá místa. Rychlost rozmítání paprsku je vysoká, a proto vidíme laserové záření při dopadu na materiál jako přímkový zdroj, avšak ve skutečnosti paprsek kmitá. Metoda se nepoužívá pouze pro kalení materiálu, ale také ke značení materiálu, díky své rychlosti změny, velikosti a polohy paprsku. Princip dopadu laserového paprsku pomocí beam integrátoru lze vidět na obr. 31b



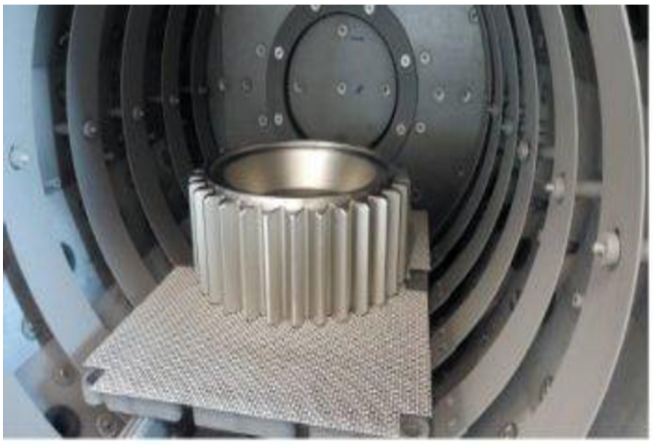
Obr. 31 Princip rozmítání laserového paprsku a dopad pomocí beam integrátoru. [57].

2.5 Chemicko-tepelné zpracování [9], [30]

Mezi tvrdostní zpracování povrchu se také řadí *povrchové Chemicko-tepelné pracování (CHTZ),* které uplatňuje vliv zvýšené teploty společně s fyzikálně chemickým působením okolního prostředí na součást. Požadovaným výsledkem CHTZ je změna chemického složení povrchu součásti. Změny jsou dále využívány jak z technologického, tak z konstrukčního hlediska. Jde o difúzi na dlouhé vzdálenosti a čas, potřebný k procesu je závislý na teplotě procesu.

2.5.1 Cementace [9], [30], [58],

Je to chemicko-tepelné zpracování (obr. 32), kde součást na jejím povrchu sytíme uhlíkem. Koncentrace uhlíku se volí na eutektoidní či těsně nadeutektoidní koncentraci (0,8 - 0,1 hm% C). Cementace se používá za velmi zvýšené teploty. Dosažená tvrdost po cementaci může být až 800 HV, přičemž jsou získány až po tepelném zpracování. K cementování se používají oceli, které mají obsah uhlíku od 0,1 do 0,25 hmotnostního objemu. Z hlediska zachování houževnatosti jádra je tento obsah uhlíku ideální.



Obr. 32 Nacementované ozubené kolo [58].

Jestliže je cementační pásmo malé, může dojít k deformaci povrchu. Předejít tomuto problému se dá zvětšením hloubky cementace nebo použitím oceli s vyššími mechanickými vlastnostmi.

Tenké cementační vrstvy se používají u součástí, na něž nejsou kladeny tak velké požadované mechanické vlastnosti. Použití tohoto chemicko-tepelného zpracování je zejména u součástí, které musí odolávat otěru. Déle pak za účelem zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy a zlepšení únavových charakteristik. U nacementovaných součástí roste prokalitelnost, jež je důležitým faktorem při tepelném zpracování. Hloubka cementační vrstvy je 0,5 - 1,5 mm. Teplota cementace se pohybuje v rozmezí 850 – 950 °C, tedy nad teplotu Ac_3. Při překročení rozpustnosti uhlíku v austenitu dojde k precipitaci sekundárního cementitu, což má za následek vznik karbidických destiček, které vedou ke zkřehnutí a přecementování. Cementujeme zejména strojní součástí, jako jsou drážkované hřídele, čepy, řetězová a ozubená kola.

Pro nacementování povrchu jsou používány tyto metody:

Cementace v kyanovodíkových lázních – oxidace roztaveného kyanidu kyslíkem rozpuštěným v lázni CO, problematická metoda.

Vakuová cementace – C_2H_2 se rozkládá za působení povrchu cementované vsázky, velmi kvalitní vrstva, vysoká produktivita bez oxidace povrchu, progresivní metoda.

Cementace v prášku – předmět je zasypán práškovou směsí dřevěného uhlí, uhlík je absorbován na povrchu součásti a difunduje do součásti.

Cementace v plynné atmosféře – atmosféra vzniká štěpením metanu nebo propanu a nedokonalým spálením těchto prvků.

Způsoby tepelného zpracování cementovaných součástí:

Kalení s přichlazením – používá se pro omezení deformací, součást ochladíme na teplotu 500°C a z této teploty se součást zakalí.

Kalení s následným ohřevem – ochlazení součástí na teplotu 600 °C a následný ohřev zjemní strukturu austenitu, kalí se z teploty Ac_3 nebo Ac_1, vhodné pro ložiska a ozubená kola.

Dvojité kalení – při prvním kalení z teploty Ac_3 se zjemní zrno, následným druhým kalením z teploty nad Ac_1 se v cementované vrstvě zjemní martenzit, používá se při operacích za studena, které předcházejí druhému kalení (závity).

Popouštění za nízkých teplot - je poslední způsob tepelného zpracování cementovaných součástí. Popouští se 1 až 2 hodiny pro odstranění vnitřního napětí a tvrdost na povrchu součásti dosahuje 60 až 62 HRC. Popouštěcí teploty jsou 150 – 200 °C.

2.5.2 Nitridace [11], [28], [29], [43], [47], [65], [70]

Je to typ chemicko-tepelného zpracování, který je používán pro zlepšení vlastnosti povrchu součásti. Princip spočívá v obohacování povrchu součásti dusíkem. Při sycení povrchu vznikají tvrdé nitridy. Tyto nitridy způsobují vysokou tvrdost vrstvy bez nutnosti dalšího tepelného zpracování. Výhodou tohoto postupu CHTZ je velká stálost povrchové vrstvy až do teploty nitridování. Pro nitridaci jsou nejvhodnější oceli, jež obsahují hliník, vanad, molybden nebo chróm. Největší podíl pro kvalitní nitridování má hliník, který dokáže utvořit velmi tvrdý nitrid spolu s dusíkem. Před nitridováním se součásti zušlechťují, dále se také často používá žíhání k odstranění vnitřního napětí po obrábění. Nitridace se dá provádět v plynném prostředí nebo v solné lázni.

- Nitridace v solné lázni

  Solné lázně používáme nejčastěji pro nitridování nástrojových ocelí. Nitridování je zejména použito pro řezné nástroje, které oddělují třísku, nebo nástroje tažné, kde vzniká tření kov na kov. Hlavní složkou nitridace jsou tzv. nitridační soli, kyanidy a kyantany. Roztavené soli mají teplotu 520 až 570°C, doba nitridace je 1 až 2 hodiny. Podle složení oceli se vytvoří na povrchu tenká nitridační vrstva, která má 0,03 až 0,05 mm. Tvrdost této vrstvy může být až 1100 HV. Po samotné nitridaci se součást vyjme z nitridační lázně a dochladí se na vzduchu. Jestliže je také požadováno zvýšení únavových vlastností, součást se ochlazuje v teplé vodě, aby byl dusík stále v tuhém roztoku. Před nitridováním se součásti kalí a popouští. Výhodou nitridování je ještě větší odolnost proti otěru a trvanlivost nástroje oproti samotnému tepelnému zpracování.

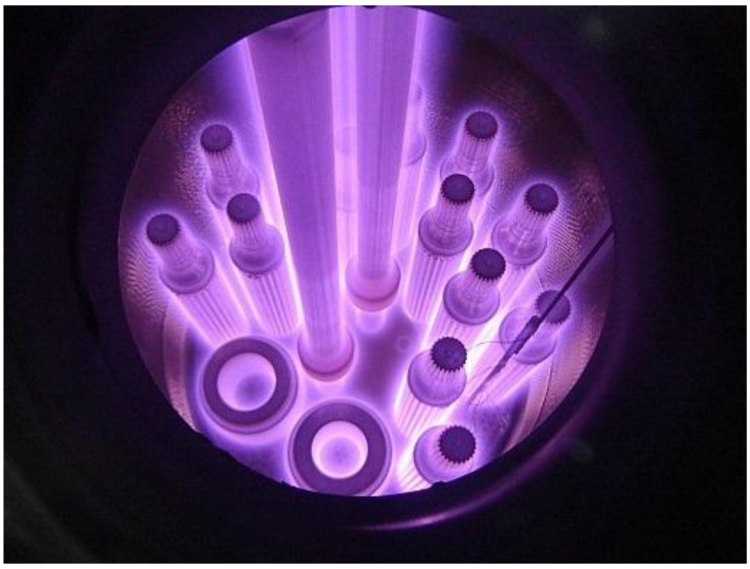
- Nitridace v plynném prostředí

  Nitriduje se ve zvonových pecích (obr. 33), kde nitridačním prvkem je atomární dusík získaný z rozloženého čpavku při teplotě 510 až 580°C. Plochy, které se nemají nitridovat, jsou opatřeny ochrannou vrstvou niklu nebo cínu. Povrch součásti musí být opracovaný, zbavený nečistot, odmaštěn, kovově čistý a nesmí být oduhličený. Důležitým faktorem je teplota a stupeň disociace čpavku. Stupněm disociace je množství zplodin dusíku a vodíku v objemu nitridační atmosféry. Do pece je přiváděn čpavek v takovém množství, aby bylo dosaženo 15 až 30% disociace, po celou dobu nitridace. Jakmile uplyne doba, potřebná k vytvoření nitridační vrstvy, nechá se součást ochladit v peci na 200 °C po dobu 5 až 6 hodin. Poté se zastaví přívod čpavku. Nejúčinnější doba nitridování je 48 hodin kde nitridační vrstva dosahuje hloubky až 0,45 mm. Nitridované součásti mají stříbřitě šedý povrch. U nitridace v plynném prostředí se na součásti mírně zvětšují rozměry. Součást se dále nedá popouštěn ani vyžíhat. Používá se pro součásti, které pracují za zvýšených teplot, např. ventily, vačkové hřídele, zdvihátka, převodová kola atd.

Obr. 33 Nitridační pec[28].

- Plasmová nitridace

  Tento druh nitridace se také někdy označuje jako iontová. Plasmou se označují ionizované plyny, které vznikají výbojem v plynu mezi katodou a anodou. Při plasmové nitridaci je veden elektrický proud plynem, kde nitridované součásti jsou zapojeny jako katody a stěna pece je anoda. Proběhne ionizace dusíku a vzniklé elektrické pole pohybuje anionty dusíku k součástkám. Díky působení elektrického proudu dojde k výboji modro-fialové barvy, který během procesu pokryje celou nitridovanou součást. Proces samotné nitridace probíhá mezi plazmovým plynem a povrchem součásti. Parametry, jež ovlivňují plasmovou nitridaci, jsou teplota vsázky, teplota stěny, tlak v zařízení a doba nitridace. Měření teploty součásti je prováděno přímo na součásti. Atmosféra v zařízení je směs plynu dusíku a vodíku. Na obr. 34 lze vidět uspořádání součásti v peci. Následné ukončení nitridace spočívá v ochlazování součásti v ochranné atmosféře. Výhodou této nitridace je vysoká variabilita řízení procesu, který je možno přizpůsobit různým materiálům. Rozměrové změny a povrchová drsnost součásti jsou malé, a proto je možné součásti před nitridací opracovat načisto.



Obr. 34 Plasmová nitridace hřídelí v peci[29].

Další typy chemicko-tepelného zpracování jsou *Nitrocementování a Karbonitridování.* Oba postupy jsou charakteristické sycením povrchu součásti uhlíkem společně s dusíkem. Rozdílem mezi těmito způsoby je teplota procesu, množství uhlíku a dusíku v povrchové vrstvě a způsob provedení. Sycení povrchu probíhá v okolí teploty Ac_1 nebo Ac3. Jestliže má převládající vliv pro nasycení uhlík, jedná se o *nitrocementaci* a po procesu se součást dále kalí. Při převládajícímu vlivu dusíku na sycení součásti hovoříme o karbonitridaci a po dokončení procesu součást dále nekalíme.

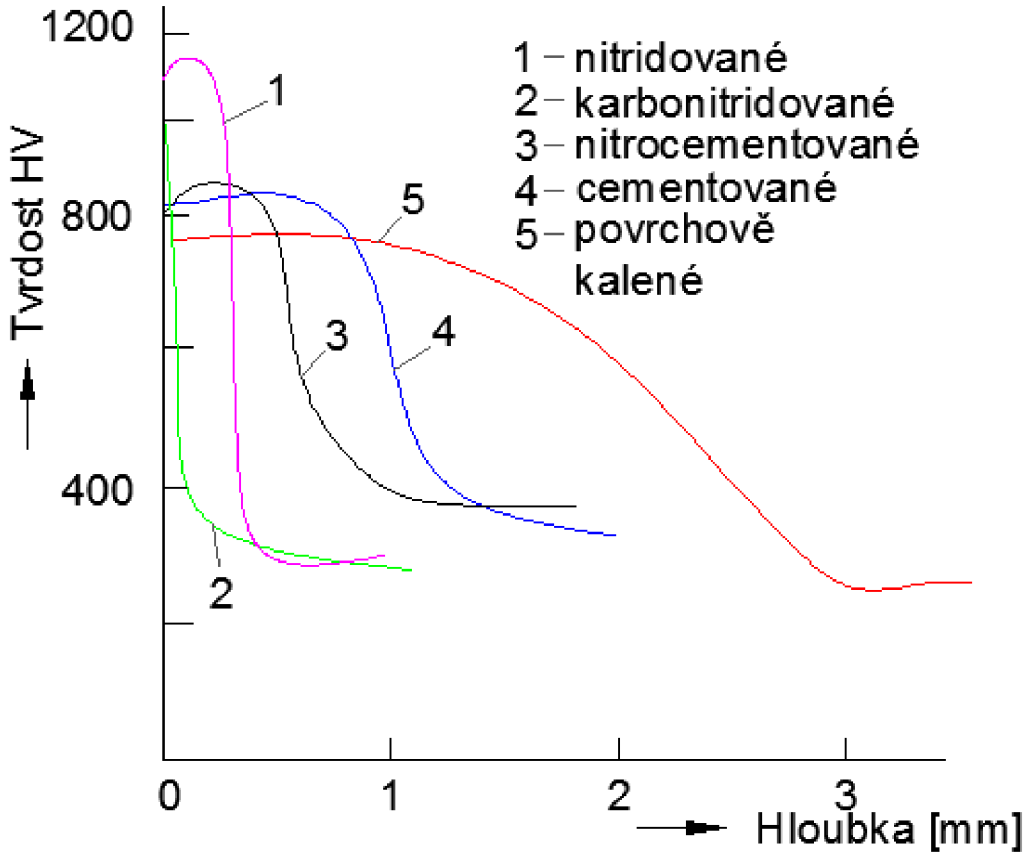
- Nitrocementace

  Nejčastěji probíhá při teplotě 820 až 840 °C v atmosféře, kterou tvoří směs uhlovodíku a čpavku. Doba potřebná pro vytvoření vrstvy se pohybuje mezi 1 až 2 hodinami. Hloubka nanitridocementované vrstvy je 0,3 až 0,4 mm a dosahuje tvrdosti až 800 HV. Oceli pro nitridocementování mají obsah uhlíku 0,25 až 0,4%. Po nitridocementaci je nutno kalit a popouštět. Struktura vrstvy je tvořena uhlíko-dusíkovým martenzitem, zbytkovým austenitem a karbonitridy. Tvrdost vrstvy je nižší než u cementace, ale doba potřebná pro proces je podstatně kratší (dusík zrychluje difůzi uhlíku).

- Karbonitridování

  Atmosféra pro toto CHTZ je směs čpavku s přídavkem uhlovodíku. Sycení povrchu probíhá 4 hodiny při teplotě 600 až 630 °C. Tloušťka vrstvy karbonitridů je 0,05 mm a dosahuje tvrdosti až 1100 HV. Deformace součásti je menší než po nitridocementaci, protože se dále nekalí. Takto zpracované součásti se používají pro svou zvýšenou odolnost proti opotřebení a zadírání lisovadel, řezných nástrojů a nástrojů pro protlačování.

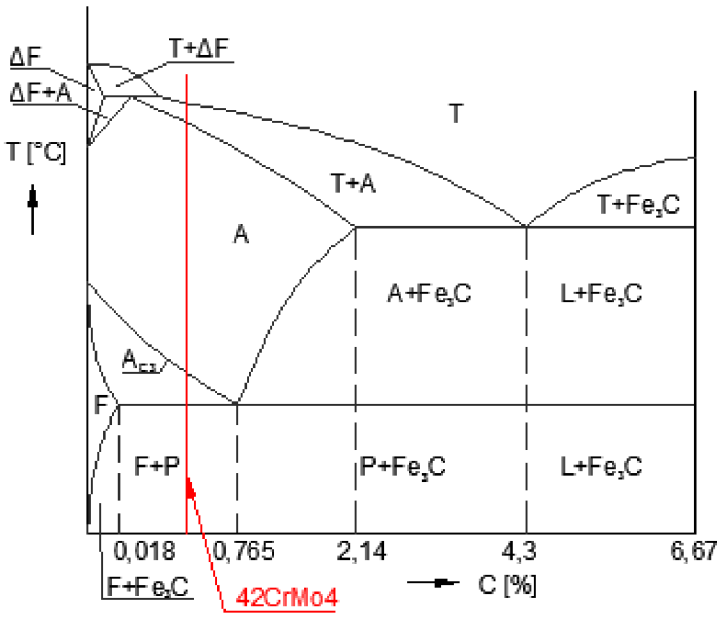
Porovnání tvrdostí metod CHTZ a povrchovým kalením lze vidět na obr. 35.



Obr. 35 Porovnání tvrdosti [70].

3 ZKOUMANÝ MATERIÁL

V experimentu byla použita nízkolegovaná chrom-molybdenová ocel. Označení materiálu dle chemického složení je 42CrMo4. Dle ČSN se tato ocel označuje jako 15 142. Chemické složení materiálu lze vidět v tab. 4, hodnoty jsou převzaty z materiálového listu, a polohu daného materiálu v diagramu Fe-Fe_3C na obr. 36. Tato ocel je vhodná k zušlechťování a po zakalení může dosáhnout tvrdosti až 62 HRC. Do průměru 100 mm je tento druh oceli schopen po zušlechtění dosáhnout pevnosti až přes 1100 MPa. Ocel není náchylná k popouštěcí křehkosti. V kaleném stavu dobře odolává opotřebení a patří mezi nejvíce používané oceli k zušlechťování. Díky své výborné prokalitelnosti se používá pro vysoce namáhané strojní součásti.



Obr. 36 Zkoušené materiál v diagramu Fe- Fe_3C [72].

Tab. 4 Chemické složení oceli.

Chemické složení [%]										
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al
0,42	0,69	0,27	0,011	0,006	0,96	0,11	0,17	0,16	0,01	0,03

Materiál byl dodán firmou CZECH STEEL GROUP s.r.o. ve formě tyčí o průměru 50 mm v délce 1 m. Materiál byl převzat ve stavu +SH a +A. +SH označení znamená, že tyče byly válcovány a loupány, druhé jmenované označení +A značí žíhání na měkko. Tento druh oceli je používán pro výrobu hřídelí, kuličkových šroubů, hřídelí pod ložiska, ozubených kol a spojovací části vagónových souprav. Materiál je také vhodný pro malé výkovky např. ojnice, klikové hřídele apod. Mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu jsou zobrazeny v tab. 5 a jsou vypsány z materiálového listu dané oceli (příloha č. 1) s patřičným atestem. Materiál byl převzat firmou KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM a.s. (dále KSK), pro kterou je experiment prováděn.

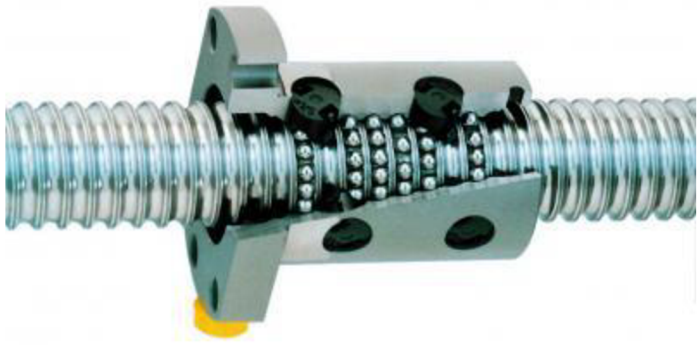
Tab. 5 Základní mechanické vlastnosti materiálu.

Tvrdost [HV]	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Prodloužení [%]
209	1066	953	15,5

3.1 Použití materiálu ve firmě KSK [33], [34], [61],
Materiál, který byl požadován pro zkoušku laserového kalení, se ve firmě KSK používá pro výrobu vodících tyčí a přesných kuličkových šroubů (obr. 37).

Vodící tyče jsou konstrukčním elementem, jenž je vhodný pro zajištění účinného valivého a přesného vedení části mechanismu, které se proti sobě pohybují. Tyče jsou kalené a broušené, většinou kruhového průřezu a je možné je upevnit na lišty, objímky, nebo další upínací elementy. Vodící tyče tvoří základní konstrukční pohybovou jednotku strojů společně s kuličkovým šroubem. Materiál 42CrMo4 je vhodný pro své mechanické vlastnosti a vysokou tvrdost po zakalení až 62 HRC.

Hřídele kuličkových šroubů se také vyrábějí z daného materiálu. Hlavním požadavkem pro výrobu hřídelů je kvalita provedení valivých drah, které musí splňovat určitou životnost. Životnost závisí na kvalitě povrchové vrstvy, po které se odvalují komponenty (kuličky) kuličkového šroubu bodovým stykem. Funkční části hřídelí kuličkových šroubů jsou proto kaleny a následně broušeny.



Obr. 37 Kuličkový šroub [61].

Dnes existuje více způsobů výroby kuličkových šroubů. Firma KSK používá tyto technologie pro výrobu kuličkových šroubů, a to válcování závitů a rotační okružování závitů. Pro velmi přesné kuličkové šrouby se dále profil brousí (obr. 38a) a přesnost šroubů je IT1 až IT3. Válcování závitu (obr. 38b) se používá jak v sériové, tak v kusové výrobě a válcovaný profil se dále kalí a leští. Díky tvářecí technologii vzniká ve šroubu vnitřní napětí spojené s malou deformací osy hřídele a zvýšenou hlučnosti při odvalování. Dosahovaná třída přesnosti je IT 7 někdy také IT 5. Při použití rotačního okružování závitu (obr. 38c) je polotovarem již zakalená tyč. Vzhledem k hloubce zakalené vrstvy se tato technologie používá pouze pro mělké profily a menší velikosti kuliček. Třída přesnosti výroby pomocí okružování je IT 5.

a) broušený b) okružovaný c) válcovaný

Obr. 38 Profily kuličkových šroubů [33].

4 EXPERIMENT

Experiment byl proveden pro firmu KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM a.s. (dále KSK). Firma vlastní nové laserové pracoviště (obr. 39), kde byl experiment proveden, a spočívá v zakalení tyče Ø50 mm, materiál 42CrMo4, pomocí laserové kalící hlavy, která je upevněna na rameni průmyslového robotu. Tyč byla zakalená různými obvodovými rychlostmi rotačního pohybu tyče v polohovadle a změně průměru laserového paprsku. Jediný parametr, jenž byl zachován při odlišných rychlostech kalení, byla teplota povrchu tyče, která byla vždy 1350°C. Vzorky byly poté nařezány ve firmě KSK a dále na Ústavu přístrojové techniky v Brně (dále jen ÚPT) nařezány v dalším směru podélném k ose, zalisovány, vyleštěny a vyleptány. Dále bylo provedeno pod mikroskopem vyhodnocování mikrostruktury a makrostruktury. Následně zkouška mikrotvrdosti v KSK a získané hodnoty zpracovány.

Obr. 39 Laserové pracoviště firmy KSK.

4.1 Zařízení použité při experimentu [21], [22], [25], [45], [49], [50], [59], [60], [62], [69]

Jako první byla použita zařízení, která se nacházejí ve firmě KSK, a to laserová kalící hlava, laserový zdroj, průmyslový robot, polohovadlo a pásová pila. Dále byly použity přístroje pro metalografickou přípravu vzorku a to kotoučová pila, elektrohydraulický lis, metalografické leštička, mikroskop a tvrdoměr.

- **Diskový laser**

  Před laserovým pracovištěm, jež je z důvodu bezpečnosti a odraženým laserovým paprskům ohraničeno plechovými zdmi, bezpečnostními vraty a optickými závorami, je laserový zdroj od firmy TruDisk s označením TruDisk 6006 (obr. 40). Parametry laserového zdroje jsou uvedeny v tab. 6.

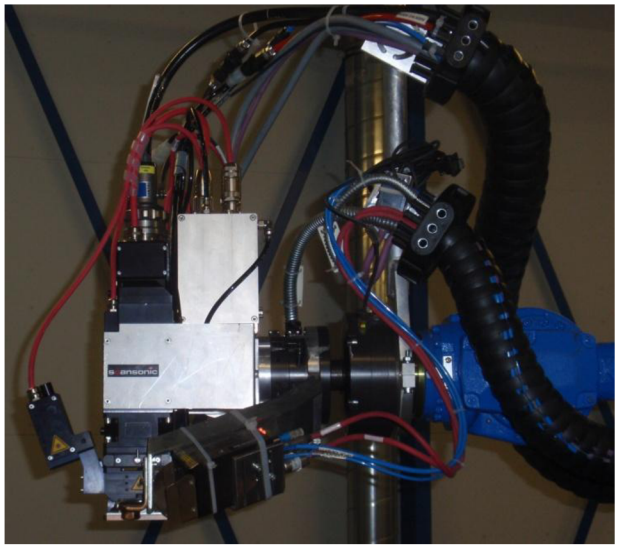
Tab. 6 Parametry laserového zdroje [62].

Výrobce / Typ	TruDisc / TruDisc 6006
Vlnová délka	1030 µm
Výkon	6000 W
Min. kvalita laserového svazku	25 mm.mrad
Rozsah teplot chladící vody	5 – 20°C
Účinnost	>30%
Rozměry	1600 x 1550 x 950 mm

Obr. 40 Laserový zdroj [62].

- **Laserová kalící hlava**

Použitá laserová kalící hlava (obr. 41) je od firmy Scansonic. Tato laserová hlava je velmi všestranná a dobře ovladatelná pomocí ramen robota. Výhodou kalící hlavy je, že v průběhu procesu kalení se mohou měnit parametry kalení jako je výkon laseru, teplota povrchu součásti, rozostření, rozmítání paprsku pomocí zrcadel, změnu průměru laserového paprsku, sledování středového bodu a koeficient emise. Výkon laserů je zpětnovazebně řízen pomocí pyrometru zabudovaného v kalící hlavě, jenž měří teplotu povrchu součásti. Parametry laserové hlavy jsou uvedeny v Tab. 7. Na pracovišti se nacházela také laserová řezací hlava od stejné firmy.



Obr. 41 Laserová kalící hlava [59].

Tab. 7 Parametry kalící hlavy [59].

Typ	Scansonic RLH-A
Zdroj energie	24V/ max. 10A
Rozsah provozních podmínek	-25°C – 70°C
Provozní vlnová délka	1000- 1080µm
Maximální výkon	6000 W
Maximální rozmítání paprsku	50 mm
Hmotnost	15 kg

- **Průmyslový robot**

Průmyslový robot značky Yaskawa Motoman typu MH50-20 (obr. 42). Tento robot slouží k manipulaci s laserovou nebo kalící hlavou. Firma Motoman se specializuje zejména na výrobu svařovacích robotů. Díky manipulaci pomocí robotických ramen jsou pohyby kalící hlavy přesné a je umožněno kalit po složitých křivkách. Průmysloví roboti jsou používány pro svou spolehlivost, přesnost a rychlost. Ve firmě KSK je na kalícím pracovišti umožněn pohyb robota lineárně po posuvném stole pro možnost kalení větších součásti.

Obr. 42 Průmyslový robot [22].

Technické parametry kalícího robota lze vidět v tab. 8.

Tab. 8 Technické parametry průmyslového robota [22].

Výrobce/Typ	Yaskawa Motoman MH50-20
Stupně volnosti	6
Dosahovaná přesnost	±0,15
Pracovní dosah	R=3106 mm
Maximální nosnost ramene	20 kg
Rozsah pracovních teplot	0 až 45°C
Hmotnost	495 kg

- **Laboratorní pila**

  Laboratorní pila (obr. 43), která byla použita pro rozřezání vzorků, se nachází na ÚPT je od firmy MTH. Model použité pily je MIKRON 110. Pila má chlazení, jež zabraňuje, aby byl materiál při dělení řezným kotoučem tepelně ovlivněn. Pila umožňuje přesné řezání, díky němuž odpadá následné hrubé broušení. Parametry pily jsou uvedeny v tab. 9. Přístroj má kyvné rameno, které umožňuje nastavit plynulý přítlak kotouče do řezu.

Obr. 43 Laboratorní pila [25].

Tab. 9 Technické parametry laboratorní pily [25].

Výrobce/Typ	MHT/ MIKRON 110
Průměr kotouče	150 mm / max. 160 mm
Otáčky	500- 4000 ot./min, plynule
Napájení	32/24V, 435 W
Hmotnost	42 kg bez kapaliny
Rozměry	500x630x500 (š,d,v)

- **Metalografický lis**

Nařezané vzorky se dále zalisují do pryskyřice pomocí metalografického lisu od firmy Struers typ CITO PRESS 1 (obr. 44). Tento typ lisu má pouze jednu komoru pro zalisování vzorků, novější mají dávkovač pryskyřice a dva lisovací prostory. Lis je napojen na vodovod a po zalisování vzorků sám podle programu spustí chlazení. Vzorek vložený do lisovací komory je zasypán pryskyřicí Multifast. Po zasypání je komora uzavřena. Doba trvání je 5 minut i s cyklem chlazení. Použitý tlak pro zalisování je 250 barů při teplotě 180 °C. Průměr pecky se vzorkem je 30 mm.

Obr. 44 Metalografický lis [37].

Metalografická leštička

Metalografická leštička (obr. 45) od firmy Struers byla použita pro vyleštění nařezaných a zalitých vzorků. Nařezané a zalité vzorky jsou uloženy do unášecího zařízení, které se otáčí kolem své osy. Brusný kotouč se rovněž otáčí, ale je vyosený oproti ose unášejícího zařízení. Vzorky se přitlačí pružinami a je spuštěn program. Do procesu je přiváděna voda z důvodu chlazení a odplavení třísek. Dále byly vzorky naleptány v zředěném (5%) roztoku Nitalu, opláchnuty vodou a následně osušeny horkovzdušnou pistolí.

Obr. 45 Metalografická leštička [69].

- **Mikroskop Lext 3100**

Konfokální laserový řádkovací mikroskop od firmy Olympus byl použit pro zjištění makrostruktury kalených vzorků. Mikroskop je schopen zobrazovat dvojrozměrný a také i trojrozměrný obraz. Mikroskop se nachází na ÚPT v Brně v laboratoři, která je oddělena od ostatních pracovišť z důvodu zachování čistoty. Mikroskop je schopen změřit drsnost a také se využívá pro analýzu struktury povrchu. Má více objektivů, jež se používají podle potřeby zvětšení, a je umístěn na pneumatickém stole z důvodů eliminace otřesů podlahy.

- **Mikroskop DSX 500**

Pro zjišťování mikrostruktury povrchu byl použit mikroskop Olympus DSX 500, jehož snímky jsou kvalitnější pro zjišťování mikrostruktury. Mikroskop vlastní Středoevropský technologický institut CEITEC v Brně, kde se také struktura zjišťovala. Oba mikroskopy jsou zobrazeny na obr. 46 a parametry jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10 Technické parametry mikroskopu [49], [50].

Výrobce/Typ	OLYMPUS/Lext 3100	OLYMPUS/DSX 500
Zvětšení	120x - 14400x	139x- 7200x
Čočky	5x, 10x, 20x, 50x, 100x	4,5x, 30x
Zorné pole	2560x2560 – 21x21µm	100x100 mm
Rozměry stolu	150x100 mm	100x100 mm
Maximální hmotnost vzorku	10 kg	3 kg
Maximální výška vzorku	100 mm	65 mm
Celková hmotnost	57 kg	36 kg

a) Lext 3100 **b) DSX 500**

Obr. 46 Mikroskop [49], [50].

- **Tvrdoměr**

Tvrdoměr, na němž byly provedeny zkoušky mikrotvrdosti, se nacházel ve firmě KSK. Tvrdoměr je od firmy Qness, jedná se o typ Qness Q10A. Výhodou tohoto tvrdoměru je možnost automatického zjištění úhlopříček vtisku vnikaného tělesa do vzorku. Mikroskop je vybaven dvěma optikami, pro zjištění úhlopříček s možností zvětšení 20x nebo 40x. Zařízení vlastní revolverovou hlavu, na níž jsou připevněny optiky a vnikající tělesa podle zkoušky, která je potřeba.

Tvrdoměr (obr. 47) má motoricky poháněný stůl, na který jsou umísťovány vzorky. Tvrdoměr si sám nastaví výšku stolu. Vše je řízeno systémem Qpix Control, který je instalován na připojeném počítači. Po nastavení parametrů a typu tvrdostní zkoušky tvrdoměr automaticky vytvoří vpichy, změří úhlopříčky a vyhodnotí tvrdosti. Výsledky zkoušek je možno exportovat do excelu nebo vytvořit protokol ve formátu PDF.

Obr. 47 Tvrdoměr Q10A [45].

- **Termokamera**

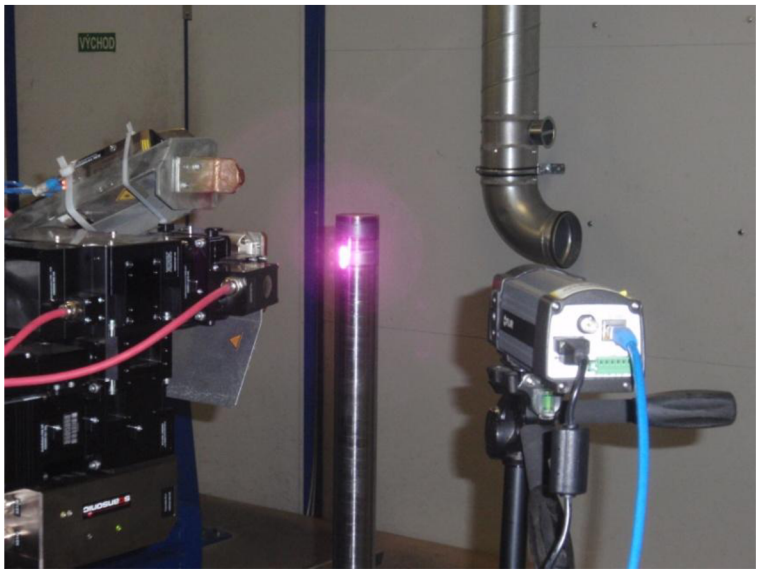
FLIR A310 je profesionální stacionární termokamera (obr. 48), která umožňuje záznam, analýzu a streamování videa v reálném čase s obrazovou frekvencí až 8 Hz. Rozlišení termokamery je 320x240 pixelů. Teplotní citlivost kamery je vysoká a dosahuje přesnosti 0,05 °C. Rozsah kamery v základním provedení má od -20°C do 350 °C. Při potřebě většího rozsahu je možné pořídit speciální filtr, který umožní kameře snímat povrchy o větší teplotě až 1200 °C. Výstup termokamery je možné napojit na PLC jednotku nebo PC. Termokamera se používá pro testování materiálů, výstupu kontroly jakosti, k monitorování procesů, nebo jako součást zpětné vazby řídících systému. Zařízení se stativem bylo zapůjčeno z UPT v Brně.

Obr. 48 Termokamera Flir [21].

4.2. Postup experimentu

Před kalením požadovaného materiálu ve formě tyče Ø50 mm byly dohodnuty podmínky kalení a počet vzorků s vedoucím laserového pracoviště v KSK. Tyč byla upnuta do dvouosého polohovadla a byl naprogramován robot s nastavením kalících parametrů na zdroji. Po zakalení každého vzorku se vyměnila tyč za druhou, aby se dostatečně ochladila a neovlivňovala kalení následujícího vzorku. Při kalení se měnila obvodová rychlost tyče (2,3,5,7 mm/s) za stálé teploty 1350°C na povrchu tyče při procesu kalení. Regulace výkonu kalení se zachováním teploty povrchu se řeší pomocí pyrometru, jenž je součástí kalící hlavy a je napojen na řídicí systém.

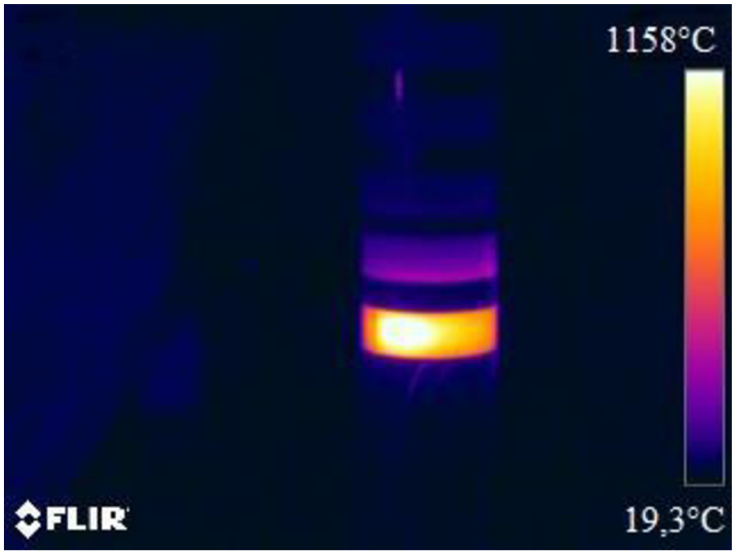
Při experimentu byla použita také termokamera od firmy FLIR, jež byla zapůjčena na ÚPT v Brně. Termokamerou se měřila teplota při procesu jako kontrolní informace o teplotě, kterou primárně měřil již zmiňovaný pyrometr. Problém při měření je s nastavením emisivity materiálu. Emisivita (poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa) je nejdůležitějším parametrem materiálu pro měření pomocí termokamery. Po kalení vzniknou na materiálu zakalené stopy (obr. 50), které mají jinou emisivitu. Při experimentu byla nastavena emisivita základního materiálu.



Obr. 49 Laserové kalení tyče.

Dalším problémem použití kamery byl její teplotní rozsah, který při použití speciálního filtru, jenž byl součásti kamery, měl teplotní rozsah do 1200°C. Snímky z kamery nejsou přesné a jsou uvedeny pouze jako ilustrační.

Jako poslední měnící se parametr, byl průměr paprsku, který byl rozmítán v šířce 15 mm. Bylo provedeno 12 měření, přičemž dvakrát měly dva vzorky stejné parametry a tudíž se následně dva totožné vzorky vyřadily. Pro průměr paprsku je ve firmě KSK používán výraz velikost spotu. Průměry paprsku, jež jsou uvedeny v tab. 11 odpovídají velikosti spotu, který je zapsán v závorce hned za průměry paprsku. Vzdálenost kalící hlavy od tyče byla cca. 300 mm, přesná vzdálenost není pro měření důležitá. Pro všechny vzorky byla zachována povrchová teplota 1350°C.



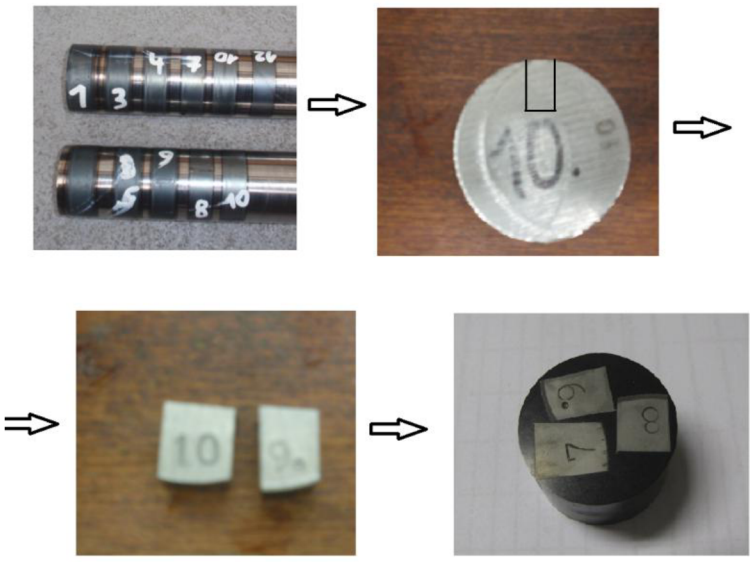
Obr. 50 Snímek chladnutí zakalené tyče.

Pro kalení byly použity parametry, které jsou uvedeny v tab. 11.

Tab. 11 Parametry pro kalení.

Číslo vzorku č.	Obvodová rychlost tyče [mm/s]	Průměr rozmítaného paprsku [mm] (velikost spotu)	Výkon [W]
1	2	6 (13)	1550
2	3	6 (13)	1830
3	5	6 (13)	2300
4	7	6 (13)	3000
5	5	4 (9)	2050
6	5	2 (5)	1650
7	5	1,2 (0)	1150
8	7	4 (9)	2450
9	7	2 (5)	2000
10	7	1,2 (0)	1350

Po zakalení byly vzorky nařezány ve firmě KSK na pásové pile HERKULES s dostatečným emulzním chlazením. Řez byl umístěn na střed zakalené části. Nařezání ve směru kolmém na osu tyče by mělo být provedeno spíše na laboratorní pile s ještě větším přívodem chladící emulze. Dalším možným postupem nařezání vzorků bylo rozřezání tyče v podélném směru a poté připravit metalografické vzorky, kde by byl patrný příčný průřez zakalené stopy (tedy nejen hloubka, ale i šířka). Jelikož byly vzorky nařezány v KSK prvním způsobem, experiment je vyhodnocen pro tento typ nařezání. Po rozřezání se vzorky uložily do komory pro zalisování v metalografickém lisu, byla přidána pryskyřice a spuštěn proces zalisování. Následovalo vyleštění vzorků na metalurgické leštičce za přívodu kapaliny pro odvod třísek. Dále byly vzorky vyleptány Nitalem a osušeny horkovzdušnou pistolí. Vzorky se zalívají do tzv. pecek pro jejich lepší manipulovatelnost při měření tvrdosti, zkoumání mikrostruktury a makrostruktury. Postup přípravy vzorků je vidět na obr. 51.



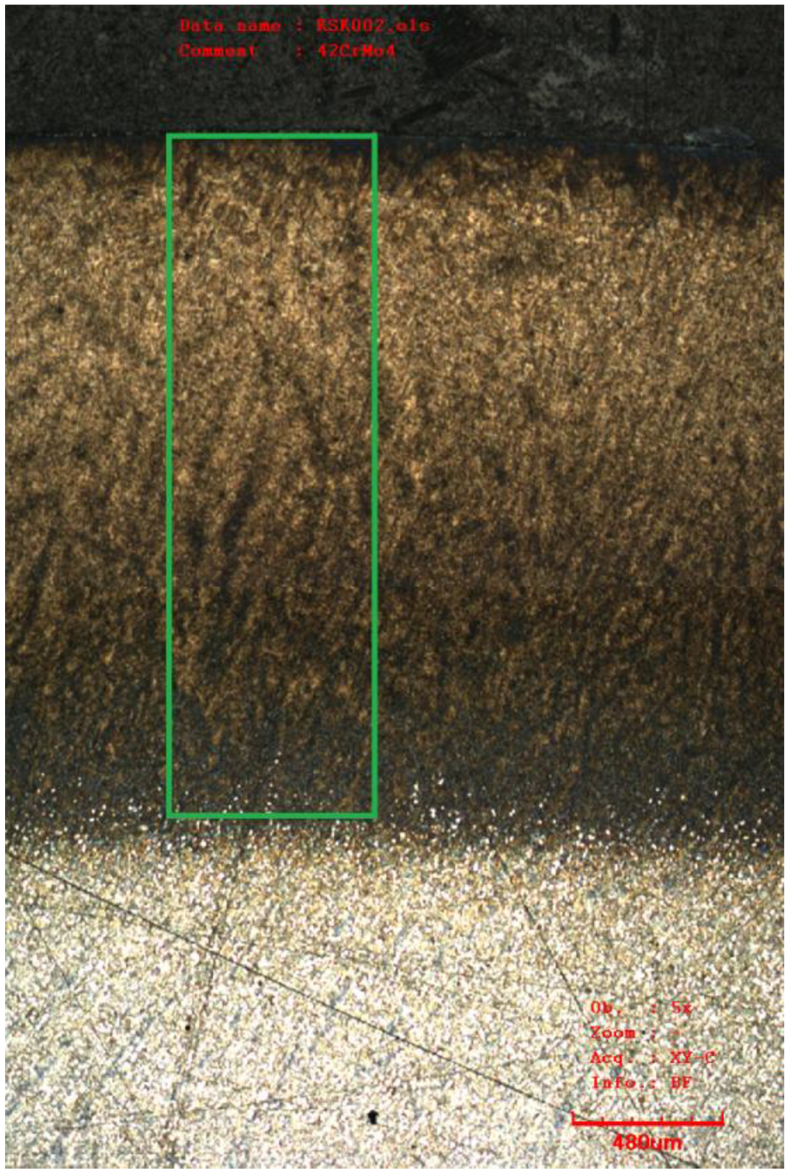
Obr. 51 Příprava vzorků.

Po přípravě vzorků následovalo zkoumání struktur. S použitím mikroskopu Olympus byly nafoceny snímky makrostruktury a následovně také mikrostruktury u vzorku č. 1. Na fotkách makrostruktur je vidět hloubka zakalené vrstvy a u fotek mikrostruktur je vidět martenzitická struktura. Po nafocení struktur byla změřena tvrdost na mikrotvrdoměru (KSK). Tvrdoměr je schopen automaticky změřit úhlopříčky vtisku vnikajícího tělesa, pokud je povrch na vzorcích lesklý. Jelikož byly vzorky naleptány z důvodu nafocení struktur, bylo nutné vzorky přeleštit na leštičce. Pro měření mikrotvrdosti byla použita metoda HV 1. Čas setrvání indentoru při zatížení 1 kg byl 5 s. Pro zjištění tvrdosti vzorku č. 1 bylo provedeno 14 vpichů. Při měření ostatních vzorků bylo provedeno pouze 10 vpichů, které však byly dostačující. Vpichy byly od sebe vzdáleny po 0,2 mm.

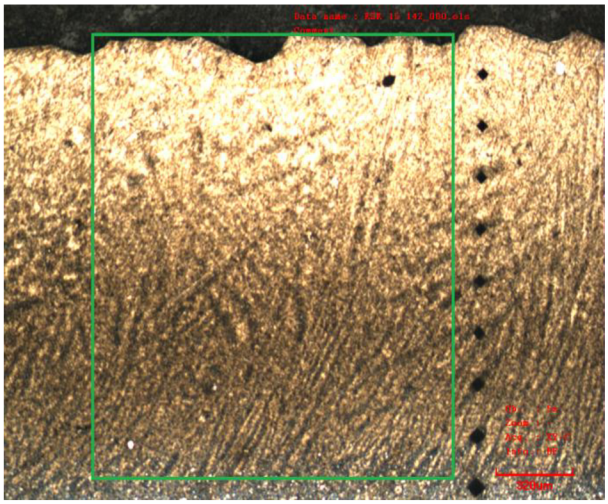
4.3. Makrostruktura

Na následujících snímcích bude možné vidět makrostruktury vzorků, které byly pořízeny konfokálním mikroskopem Olympus. Na snímcích lze viděl zakalenou oblast, oblast tepelně ovlivněnou, neovlivněnou apod. Bylo použito zvětšení mikroskopu 120x. U první skupiny čtyř vzorků se měnila obvodová rychlost tyče a průměr paprsku zůstával stejný Na vzorku č. 1 (obr. 52) podle makrostruktury je zakalená oblast až do hloubky 2,22mm.

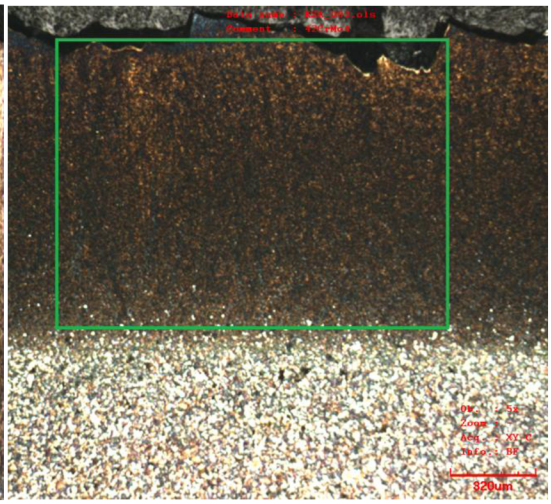
U vyfocení struktury bylo použito skládání obrazu, aby bylo umožněno zobrazení větší hloubky. Vzorek byl zakalen obvodovou rychlostí tyče 2mm/s s největším průměrem paprsku, tudíž se dá očekávat největší zakalená hloubka.



Obr. 52 Vzorek č. 1.

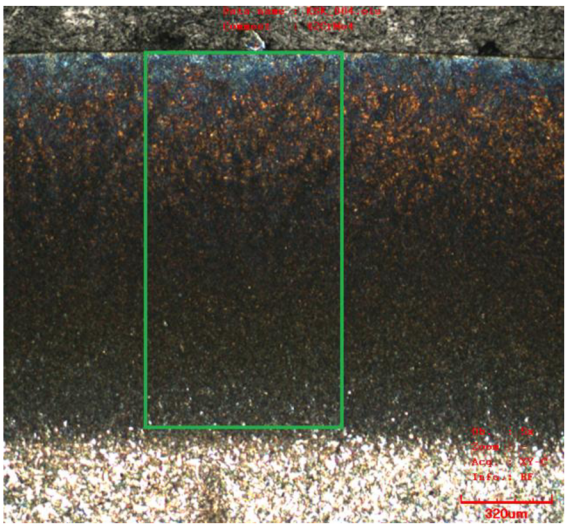


Obr. 53 Vzorek č. 2.

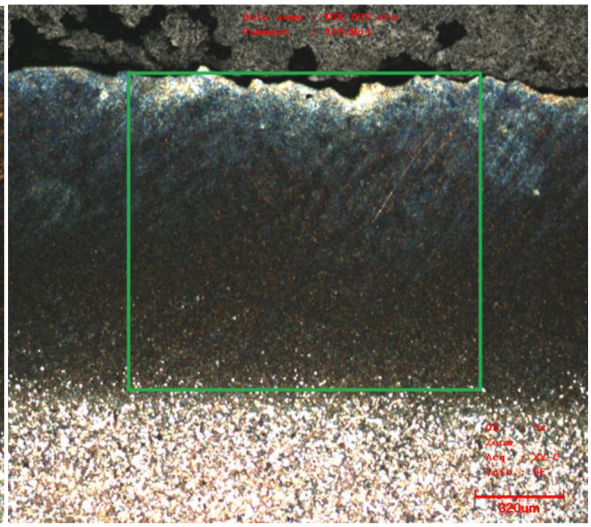


Obr. 54 Vzorek č. 3.

Na obr. 53 lze vidět zakalenou vrstvu do hloubky 1,52 mm. Vzorek byl kalen obvodovou rychlostí 3mm/s. Lze také vidět vpichy pro mikrotvrdost a okraj zkoumaného vzorku, který je potrhaný po řezu pásovou pilou. Pilový pás byl na zubech osazen připájenými destičkami z kubického nitridu bóru, aby dokázal uřezat zakalený materiál. Vzorek č. 3 (obr. 54) byl opět kalen největším průměrem paprsku laseru. Obvodová rychlost tyče byla 5mm/s a dosažená hloubka zakalené oblasti je 1, 28 mm.

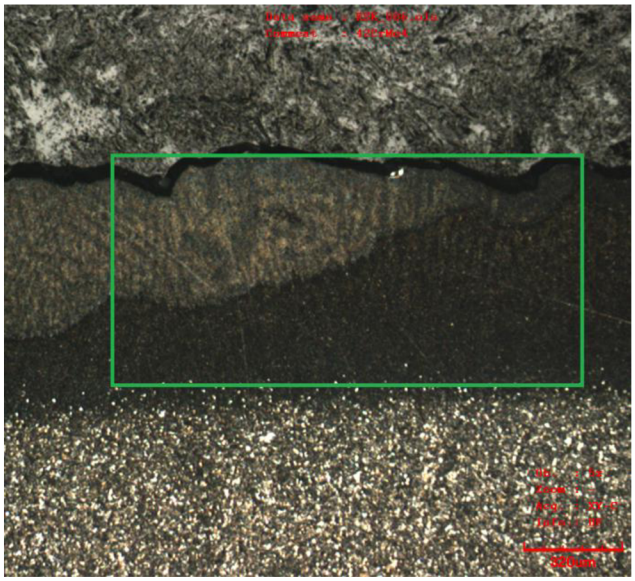


Obr. 55 Vzorek č. 4.

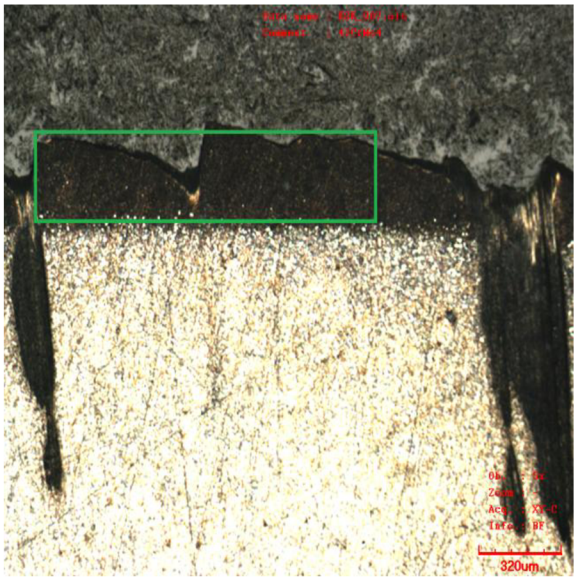


Obr. 56 Vzorek č. 5.

Makrostruktura vzorku č. 4 je vidět na obr. 55 a hloubka jeho kalené vrstvy je 1,3mm, tento vzorek se kalil obvodovou rychlosti 7 mm/s s největším průměrem paprsku. Dále jsou vidět modrá místa na povrchu vzorku, která vznikla nejspíše vzlínáním nitalu po leptání a možném nedůsledném omytí. Vzorek č. 5 (obr. 56) je řazen do druhé skupiny tří vzorků a to s obvodovou rychlostí kalení 5 mm/s, kde se dále měnily průměry paprsku. U tohoto vzorku byl použit průměr 6 mm a naměřená hodnota hloubky zakalení byla zjištěna 1,15 mm.

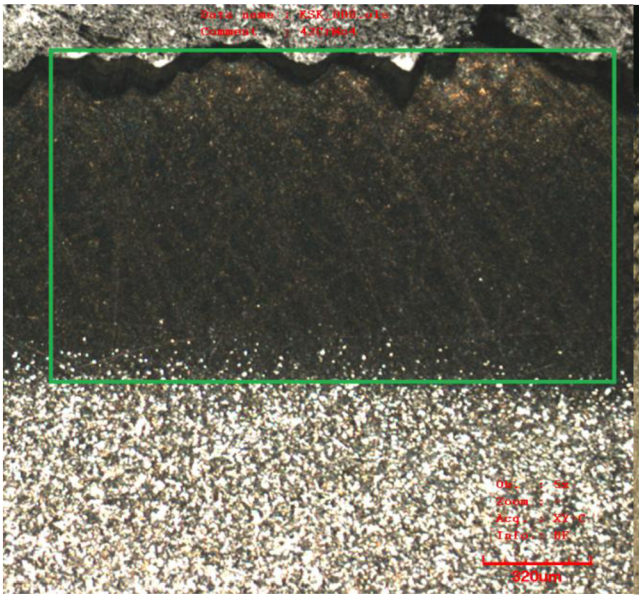


Obr. 57 Vzorek č. 6.

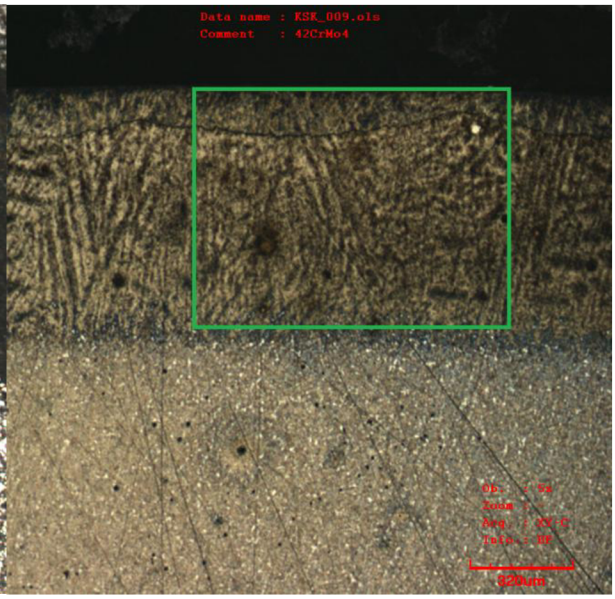


Obr. 58 Vzorek č. 7.

Vzorek č. 6 (obr. 57) má na snímku makrostruktury dvě zbarvení. To může být zapříčiněno špatným osušením po vyleptání nebo jiným úhlem odrazu osvětlení při focení. Vzorek byl kalen opět obvodovou rychlostí 5 mm/s a byl použit průměr paprsku 2 mm. Výsledná naměřena hloubka vrstvy je 0,78 mm. Na vedlejším snímku (obr. 58) je vyobrazen vzorek č. 7 a jsou vidět stopy po pile, které se nepodařilo vyleštěním na metalografické leštičce odstranit, avšak pro zjištění hloubky vrstvy zakalené oblasti stopy nemají vliv. Hloubka zakalené vrstvy je malá a byla naměřena hodnota 0,27 mm, díky malému průměru paprsku 1,2 mm.



Obr. 59 Vzorek č. 8.

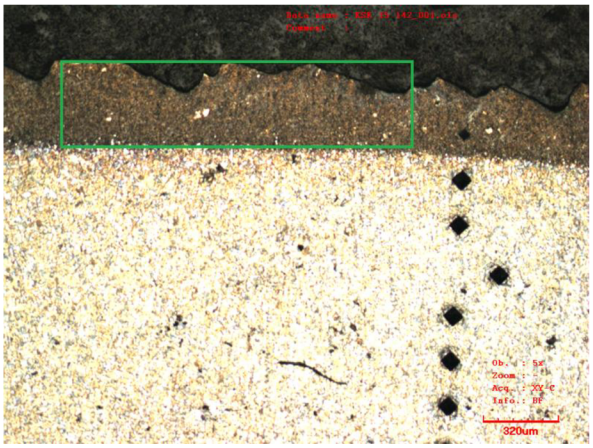


Obr. 60 Vzorek č. 9.

Třetí a poslední skupinou jsou vzorky, které byly kaleny obvodovou rychlostí 7 mm/s a znova se měnil průměr paprsku. Na obr. 59 je vyobrazena makrostruktura vzorku č. 8 a pro kalení byl použit průměr paprsku 4 mm. Byla naměřena hloubka 1,05 mm. Další vzorek je č. 9 (obr. 60),

kde je vidět trhlina, která je nejspíš způsobena vadou v materiálu. Vzorek je kalen průměrem paprsku 2 mm a dosažená zakalená hloubka je 0,73 mm.

Poslední vzorek č. 10 je na obr. 61. Kalení bylo provedeno s obvodovou rychlosti 7 mm/s za použití nejmenšího průměru paprsku 1,2 mm. Naměřená zakalená vrstva je 0,26 mm. Dále jsou na snímku vidět stopy po vniknutí indentoru pro zjištění mikrotvrdosti.



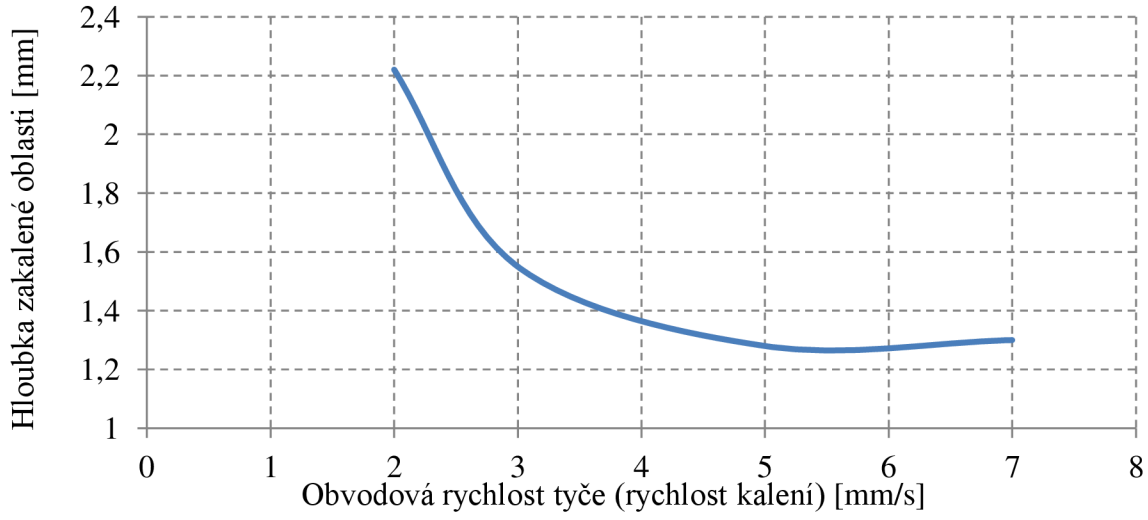
Obr. 61 Vzorek č. 10.

Naměřené hloubky zakalené vrstvy pomocí snímku makrostruktury jsou pro přehlednost zobrazeny v tab. 12.

Tab. 12 Hloubka zakalené vrstvy.

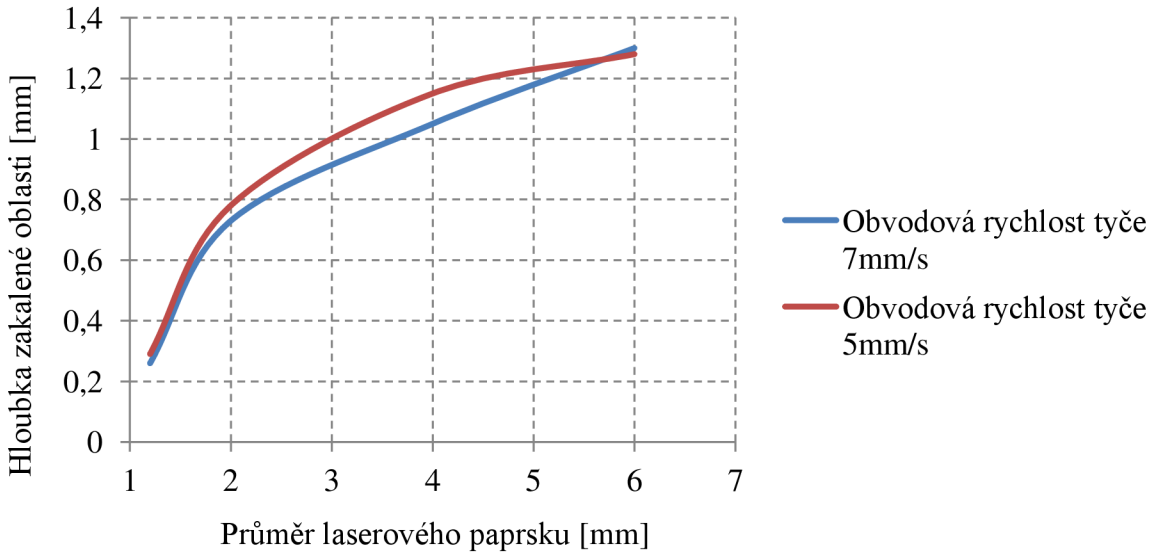
Vzorek č.	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
Průměr paprsku [mm]	6	6	6	6	4	2	1,2	4	2	1,2
Obvodová rychlost [mm/s]	2	3	5	7	5	5	5	7	7	7
Zakalená hloubka [mm]	2,22	1,55	1,28	1,30	1,15	0,78	0,29	1,05	0,73	0,26

V tab. 12 jsou zobrazeny parametry kalení a výsledné hloubky zakalené oblasti, které byly naměřeny ze snímků makrostruktury. Lze vyčíst, že největší zakalenou oblast měl vzorek č. 1. Tento výsledek není nijak překvapující, protože byl kalen největším průměrem laserového paprsku s nejnižší obvodovou rychlostí tyče v polohovadle a tudíž bylo materiálu dodáno největší vnesené teplo. U vzorků č. 1 až č. 4 se postupně zvyšovala obvodová rychlost a při měření bylo zjištěno také postupné snižování hloubky zakalené oblasti. U vzorku 3 a 4 jsou hodnoty téměř shodné a možnou chybou je nepřesnost odměřování hloubky ze snímků a určení přechodu mezi zakalenou a nezakalenou vrstvou. Závislost hloubky zakalené oblasti na obvodové rychlosti tyče (rychlost kalení) pro vzorky 1 až 4 lze vidět na obr. 62. Ostatní vzorky nelze porovnávat podle rychlosti kalení z důvodu použití jiného průměru paprsku.



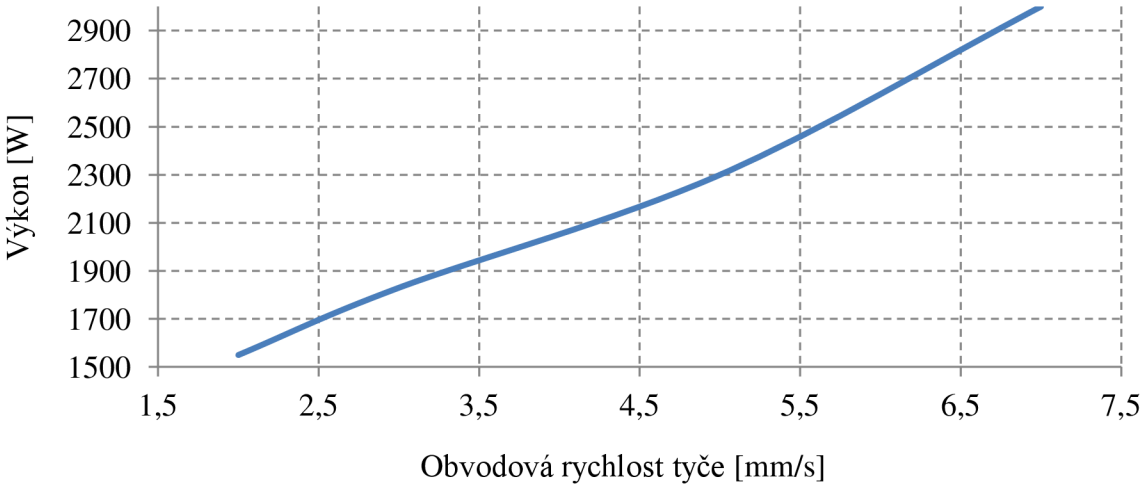
Obr. 62 Graf závislosti hloubky zakalené oblasti na rychlosti kalení.

Vzorky 3, 5, 6, 7 byly kaleny obvodovou rychlostí tyče 5 mm/s se změnami průměru paprsku od největšího k nejmenšímu. Grafickou závislost lze vidět na obr. 63. Při zmenšování průměru paprsku také klesá hloubka prokalené oblasti. Vzorky 4, 8, 9, 10 byly kaleny obvodovou rychlostí 7 mm/s (obr. 63) a opět se měnil průměr laserového paprsku. Lze tedy říci, že se zmenšujícím se průměrem paprsku klesá také hloubka zakalené oblasti, pokud je dodržena stejná kalící rychlost a povrchová teplota materiálu.



Obr. 63 Závislost hloubky zakalené oblasti na průměru laserového paprsku.

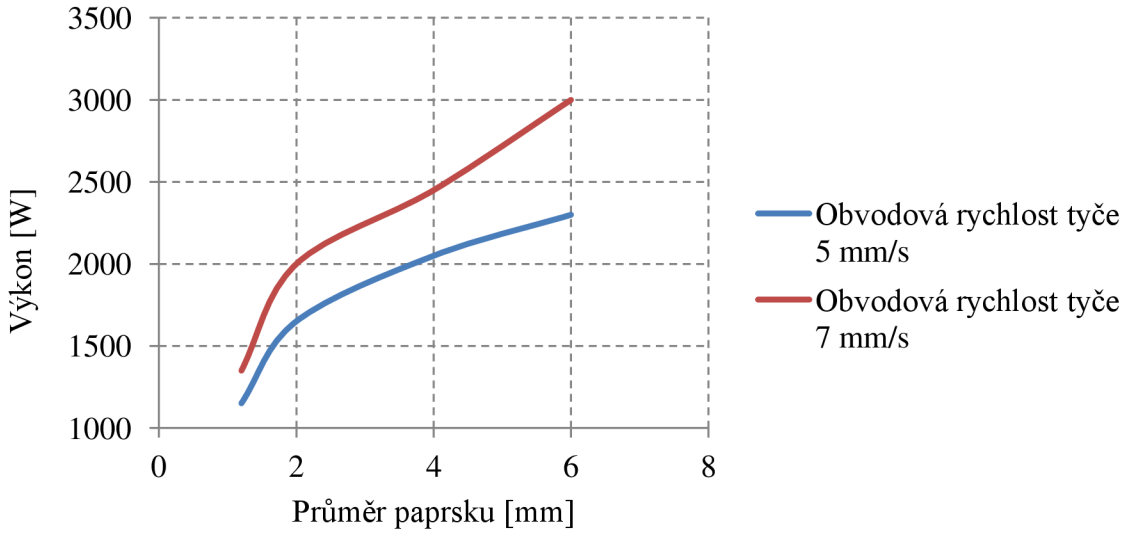
Ze snímků makrostruktury je možné konstatovat, že optimální parametry kalení pro největší hloubku zakalené oblasti u daného materiálu jsou u vzorků 1 až 4, kde výrazně největší hloubku oblasti vykazuje vzorek 1.



Obr. 64 Závislost použitého výkonu na obvodové rychlosti tyče.

Obr. 64 zobrazuje závislost použitého výkonu na obvodové rychlosti kalené tyče. Z grafu lze vidět, že při zvyšování obvodové rychlosti se musí zvyšovat výkon laserového zdroje tak, aby byla zachována požadovaná teplota povrchu 1350 °C. Závislost mezi danými veličinami je téměř lineární, tudíž se dá říci, že se zvyšující se rychlostí je úměrně zvyšován výkon softwarem kalícího zařízení. Zvyšující se výkon pro zachování povrchové teploty při použití vyšších obvodových rychlostí neznamená zvětšení hloubky zakalené oblasti. Nejvýznamnějším parametrem pro hloubku zakalení je průměr kalícího paprsku.

Na předchozím grafu (obr. 64) je vidět již téměř zmiňovaná lineární pomalu rostoucí závislost mezi výkonem a obvodovou rychlosti. Závislost výkonu na průměru paprsku je zobrazena na obr. 65. Jak na předchozím grafu, tak i tato závislost je rostoucí s rostoucím průměrem paprsku. Jestliže je použito většího průměru paprsku, je světelné záření dopadající na povrch kaleného materiálu pohlcováno větší plochou, tudíž se musí zvýšit výkon laserového zdroje za účelem zachování teploty na povrchu.

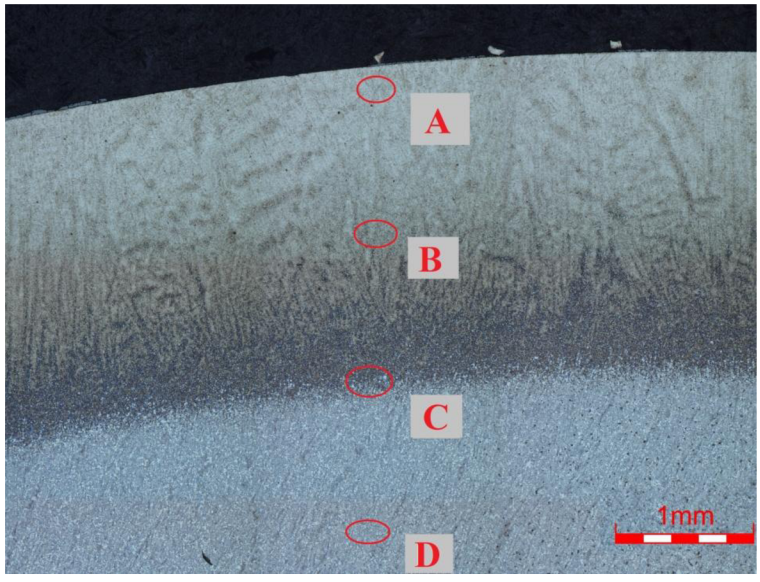


Obr. 65 Závislost výkonu na průměru paprsku.

4.4 Mikrostruktura

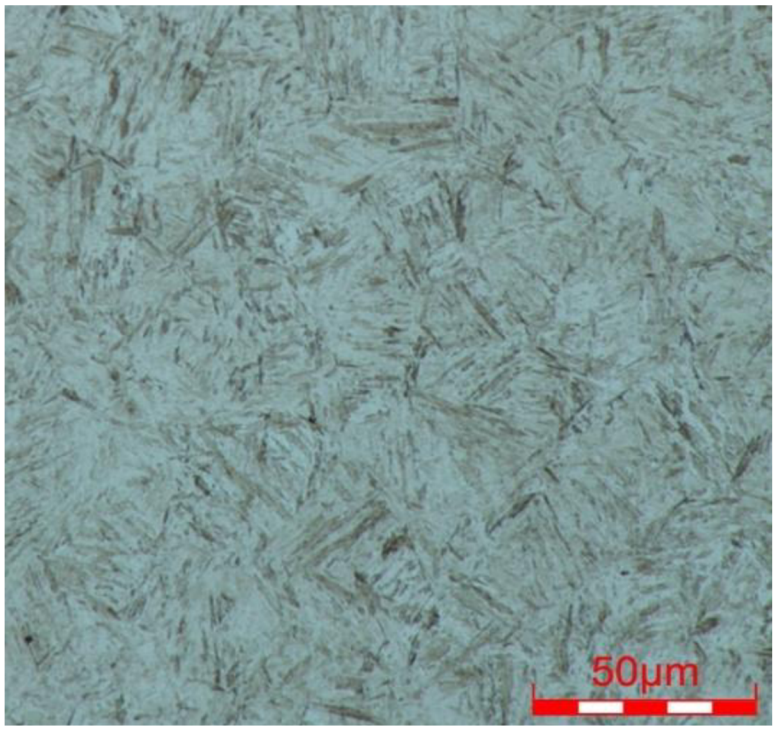
Mikrostruktura vzorku byla zkoumána zvětšením od 139x až po 1000x. Vyhodnocení mikrostruktury bylo provedeno pouze u vzorku č. 1, protože ostatní vzorky budou hodně podobné. Pro vyhodnocení mikrostruktury bylo zhotoveno pět snímků. První snímek zobrazuje vzorek od základního materiálu až po povrch, druhý se zvětšením 1000x zobrazuje zakalenou oblast na povrchu, následně před přechodovou oblastí, přechodovou oblast a poslední se zvětšením 1000x zobrazuje základní materiál.

Ve spodní části snímku (obr. 66) je vidět základní materiál, který se skládá z velké části z feritických zrn a zrn sorbitického typu. Feritická zrna jsou rozpoznatelná jako světlá a tmavá jsou pak sorbitická s částečně rozpuštěnými zrny perlitu. Směrem k povrchu přechází na martenzitickou strukturu. Na snímku lze vidět rozmístění detailů zkoumaných míst struktury.



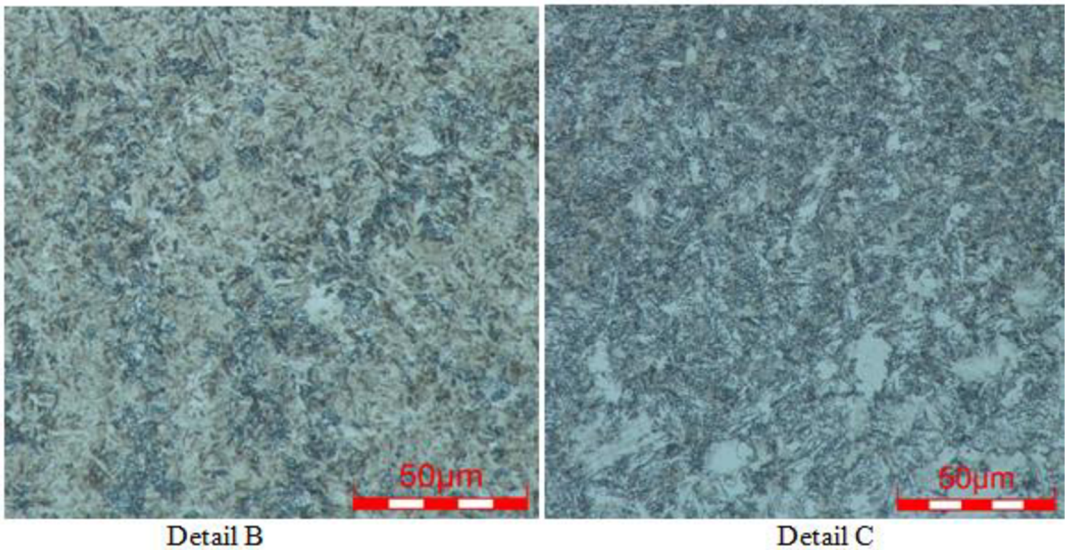
Obr. 66 Mikrostruktura vzorku č. 1- 139x zvětšeno.

Na obr. 67 Detail A z počátečního obr. 66 je zobrazeno zvětšení mikrostruktury vzorku 1. Bylo použito zvětšení 1000x. Je možné vidět zakalenou strukturu, která se skládá z hrubého martenzitu. Hrubý martenzit se vytvořil díky vysoké povrchové teplotě při kalení. Martenzit je typický svým jehlicovitým tvarem.



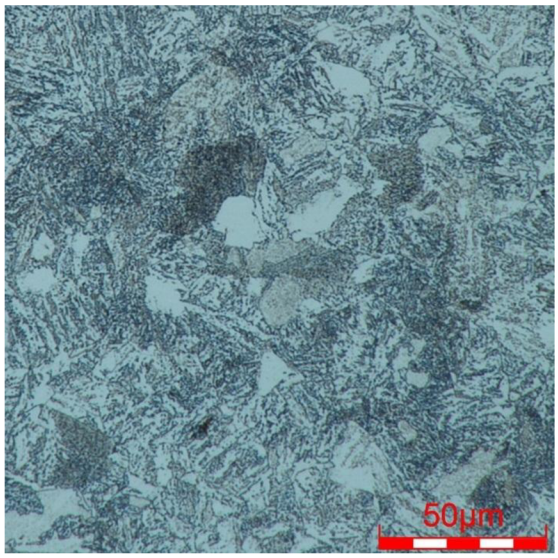
Obr. 67 Detail A - mikrostruktura vzorku č. 1 – 1000x zvětšeno.

Snímky na obr. 68 jsou pořízeny se zvětšením 1000x. Detail B je umístěn ještě v zakalené oblasti těsně nad přechodovou oblastí. Struktura snímku je martenzitická a oproti Detailu A, kde se vyskytoval hrubý martenzit, se zde vyskytuje jemnozrnný martenzit. Detail C zobrazuje přechodovou oblast mezi zakalenou oblastí a oblasti tepelně neovlivněnou. V horní části snímku se vyskytuje jemnozrnný martenzit a ve spodní části již tepelně skoro neovlivněný materiál.



Obr. 68 Detail B, C- mikrostruktura vzorku č. 1 1000x zvětšeno.

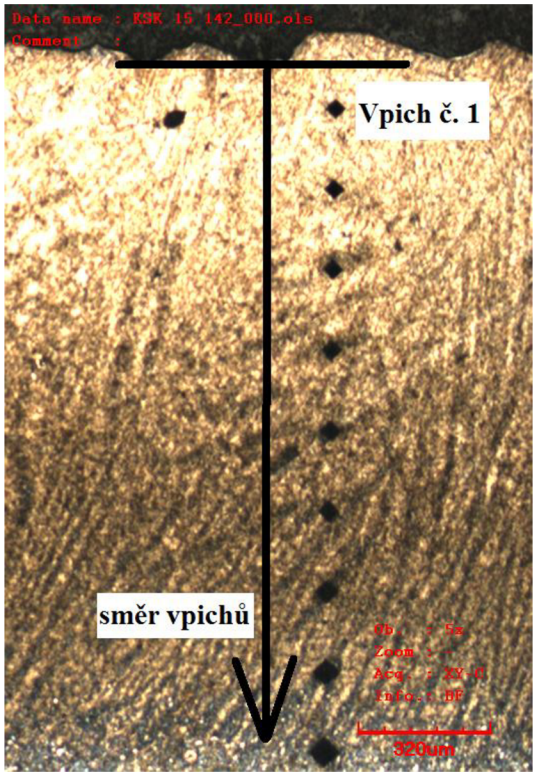
Na snímku obr. 69 je zobrazena struktura základního tepelně neovlivněného materiálu. Struktura vzorku je složena z feritických světlých zrn a zrn sorbitického typu a částečně rozpuštěného perlitu. Materiál byl dodán ve stavu vyžíhaném na měkko, avšak při tepelném zpracování byl nejspíš ohřev na žíhací teplotu vyšší (nad Ac_1, Ac_3). Po rychlejším ochlazení, což má za důsledek vznik jehlicovitých zrn feritu, se austenit přeměnil na směs bainitu s minimálním množstvím martenzitu.



Obr. 69 Detail D- mikrostruktura vzorku č. 1 1000 zvětšeno.

4.5 Tvrdost [13]

Po zkoumání mikrostruktury a makrostruktury následovalo měření mikrotvrdosti, které bylo provedeno ve firmě KSK na mikrotvrdoměru laserového pracoviště. Pro automatické měření úhlopříček pomocí mikrotvrdoměru musely být vzorky znovu po vyleptání pro zkoumání struktur vybroušeny tak, aby byl schopen mikroskop úhlopříčky rozpoznat a následně vyhodnotit. Na prvním vzorku bylo provedeno 14 vpichů. U ostatních vzorků bylo napícháno pouze 10 vpichů, které byly pro zjištění hloubky změny tvrdosti dostačující. Vpichy byly od sebe vzdáleny po 0,2 mm. První vpich byl proveden 0,2 mm od povrchu vzorku a ostatní vpichy následovaly na kolmici k tečně povrchu vzorku (obr. 70).



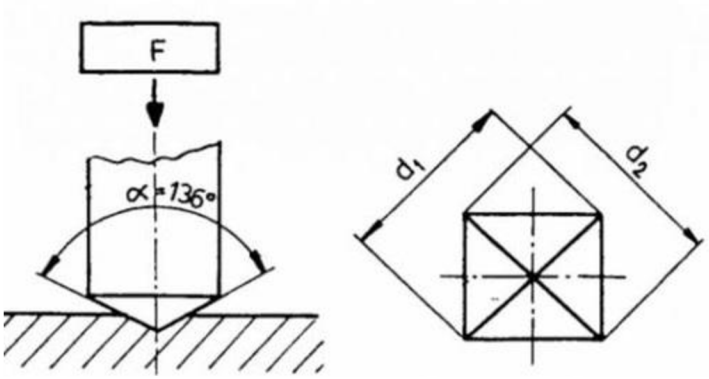
Obr. 70 Pořadí a směr vpichů při zjišťování tvrdosti.

Měření tvrdosti dle Vickerse je zakládáno na vtlačování cizího tělesa do předem připraveného povrchu daného materiálu. Cizí těleso se při zkoušce označuje jako indentor a má tvar čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° (obr. 71). Tento úhel byl vypočten jako optimální tak, aby tření co nejméně ovlivňovalo naměřené hodnoty tvrdosti. Indentor je vtlačován předem stanovenou silou od 10 do 1000 N kolmo k povrchu. Pro zjištění tvrdosti byla použita síla 10N což značí typ zatížení HV1.

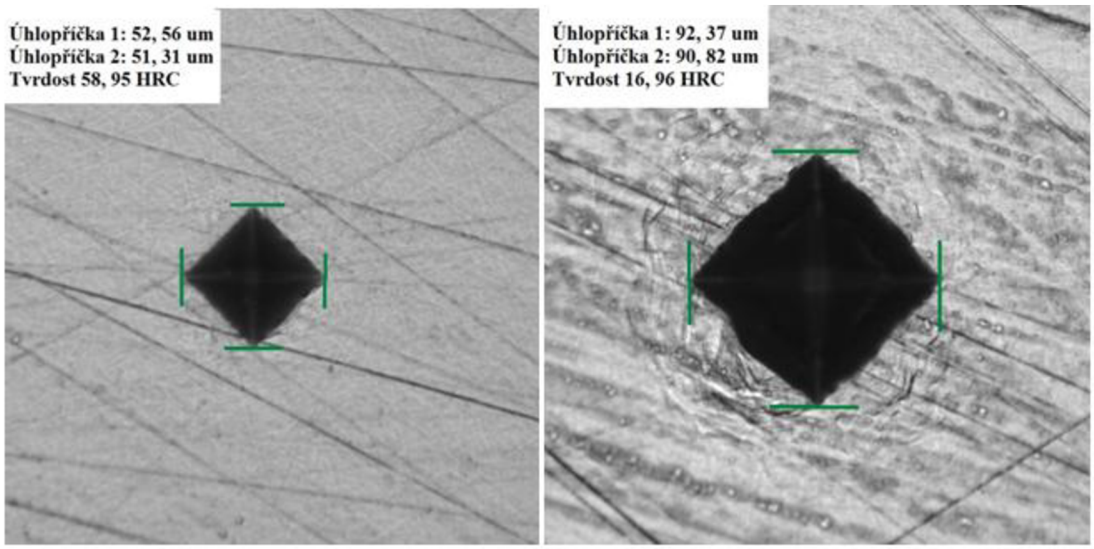
Po vtlačení indentoru se měří úhlopříčky vtisku, které jsou dosazeny do vztahu (4.5) pro výpočet tvrdosti.

$$HV = 0{,}189.\frac{F}{d^2} \quad [-] \tag{4.5}$$

kde F [N] - síla vtlačování
d [mm] - úhlopříčka vtisku.



Obr. 71 Měření tvrdosti dle Vickerse [13].



Obr. 72 Porovnání vpichů.

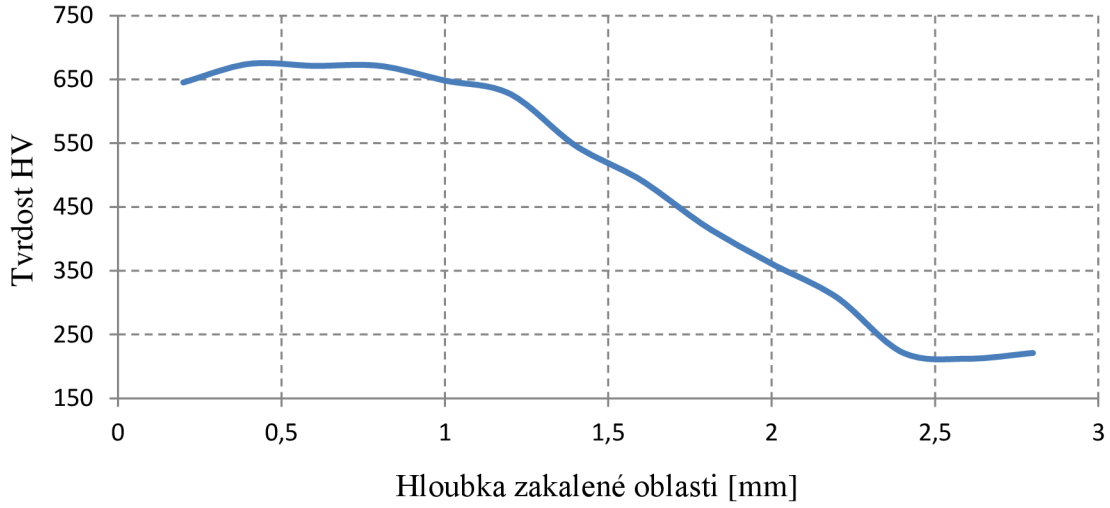
Na obr. 72 je vidět rozdíl mezi vpichem do tvrdé zakalené oblasti *a)* a vpichem do měkké tepelně neovlivněné oblasti *b)*. Vpich *a)* se nacházel ve vzdálenosti 0,2 mm od povrchu, tedy v nejtvrdší zakalené oblasti, snímek byl pořízen optikou tvrdoměru. Lze pozorovat stopy po metalografickém leštění, které však neovlivní průběh měření. Na snímku *b)* je patrné vytlačení materiálu vnikajícím indentorem, který byl umístěn 2,8 mm od povrchu. Patrná deformace okolního materiálu je způsobena velkým vtiskem indentoru díky nízké tvrdosti základního materiálu. Obrázky jsou zobrazeny ve stejném měřítku.

Naměřené hodnoty tvrdosti jsou zobrazeny v tab. 13. Výsledné hodnoty tvrdosti byly převzaty z naměřených protokolů pro jednotlivé vzorky. Příklad protokolu je uveden v příloze č. 2.

Tab. 13Naměřené hodnoty tvrdosti.

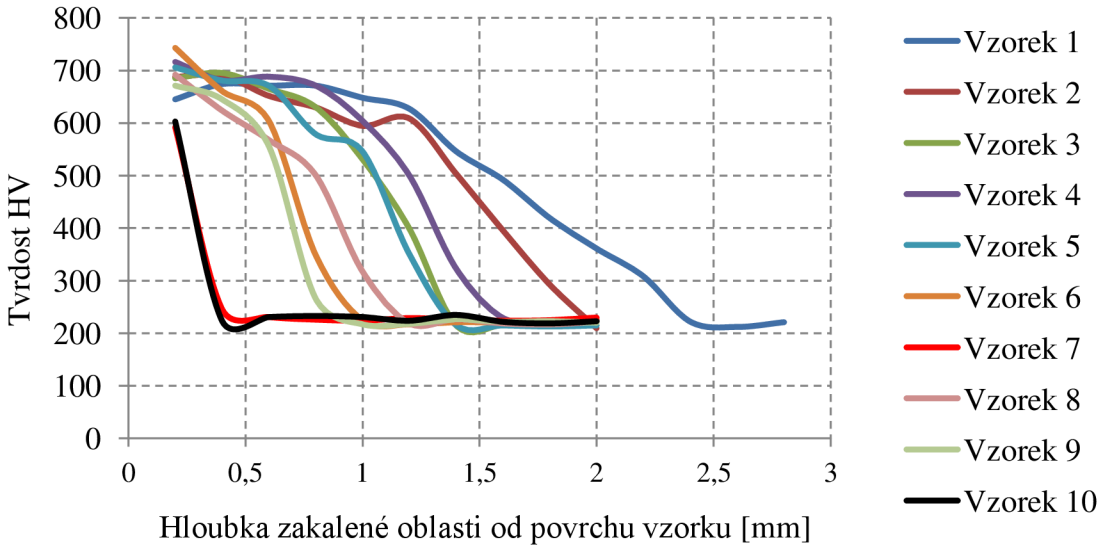
	Tvrdost HV 1 [HV] Vzorek č.									
Vpich č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	645	688	685	716	706	743	592	692	671	603
2	674	691	695	681	681	661	246	624	645	224
3	671	652	665	688	671	604	231	568	556	231
4	671	630	630	671	579	349	226	501	266	233
5	648	595	531	604	546	225	224	318	217	231
6	627	609	399	500	351	217	229	219	218	224
7	546	504	215	323	216	221	226	227	226	235
8	492	396	216	229	215	221	224	219	222	222
9	419	293	222	224	213	224	225	217	223	219
10	361	210	223	225	215	227	230	222	220	223
11	308	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	222	/	/	/	/	/	/	/	/	/
13	212	/	/	/	/	/	/	/	/	/
14	221	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Na obr. 73 je vyobrazen průběh naměřené tvrdosti vzorku 1. Při prvním vpichu 0,2 mm od povrchu je naměřena tvrdost 645 HV, dalo by se očekávat, že tato hodnota bude nejvyšší. Avšak nejvyšší hodnota tvrdosti není hned pod povrchem, ale hlouběji cca od 0,4 mm. U tohoto vzorku byla naměřená nejhlubší zakalená oblast a rovněž také největší tvrdost pod povrchem součásti. Průběh tvrdosti dle grafu znázorňuje, že do určité hloubky se tvrdost výrazně nemění a poté začne prudce klesat. To je způsobeno pomalou obvodovou rychlostí s kombinací největšího průměru paprsku 6 mm a tudíž také největšího vneseného tepla.

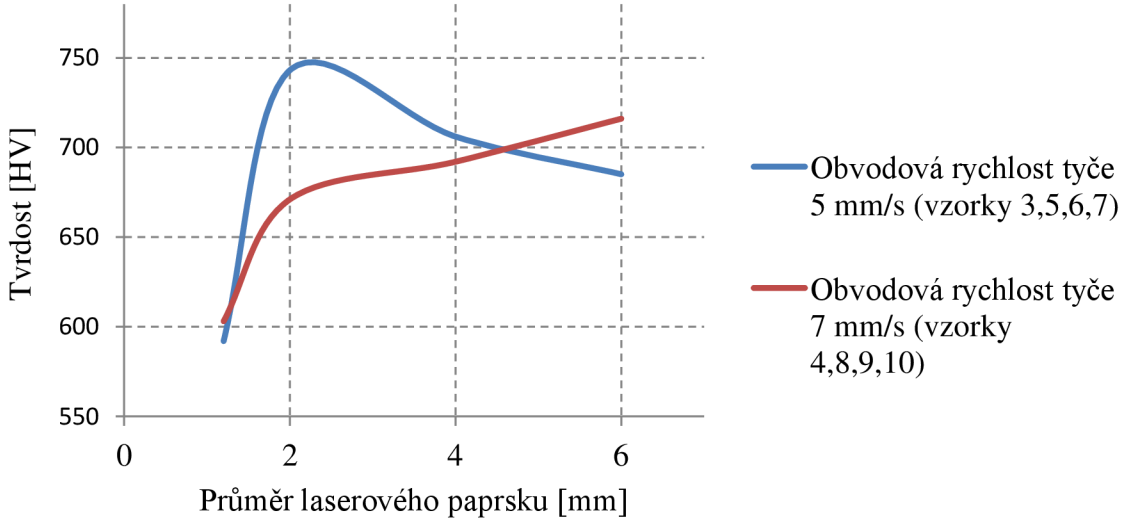


Obr. 73 Závislost tvrdosti na hloubce zakalené oblasti vzorku č. 1.

Na obr. 74 jsou zobrazeny průběhy tvrdostí všech vzorků. Lze zpozorovat, že tvrdosti většiny vzorků mají u povrchu téměř stejnou tvrdost, což je způsobeno zachováním teploty na povrchu vzorků 1350°C při kalení. Tvrdosti se zvětšující se hloubkou klesají až na hodnotu tvrdosti základního materiálu 210 HV. Vzorky 7 a 10 byly kaleny nejmenším průměrem laserového paprsku a tudíž jejich průběh tvrdosti prudce klesá, až na tvrdost tepelně neovlivněného materiálu a odpovídá naměřené hloubce kalené oblasti.

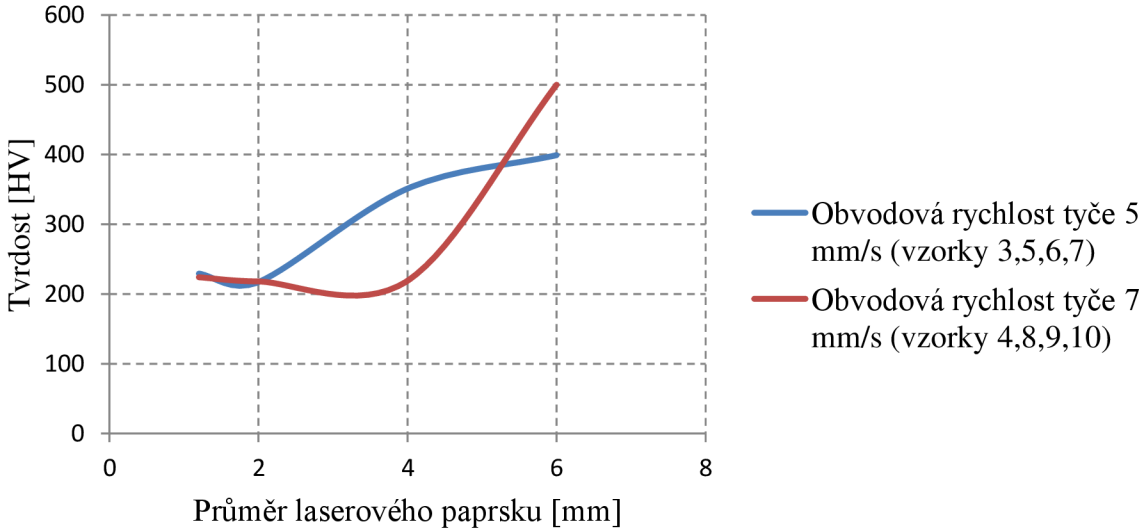


Obr. 74 Závislost tvrdosti na hloubce zakalené oblasti.



Obr. 75 Závislost tvrdosti na průměru paprsku u vzorků 3 až 10, vpich č. 1.

Na obr. 75 a obr. 76 jsou zobrazeny průběhy tvrdosti u vpichů 1 a 6. Vpich 6 byl zvolen díky jeho umístění 1,2 mm od povrchu, kde se u některých vzorků nacházela přechodová oblast. Z grafů vyplývá, že z pohledu tvrdosti do hloubky jsou na tom nejlépe vzorky, které byly kaleny největším průměrem paprsku.



Obr. 76 Závislost tvrdosti na průměru paprsku u vzorků 3 až 10, vpich č. 6.

Při porovnání tvrdosti do hloubky zakalené oblasti mají nejlepší výsledky vzorky 1 až 5, které z většiny vykazují hodnoty tvrdosti přes 500 HV v hloubce až 1,2 mm. U vzorku č. 6 byla naměřena největší hodnota tvrdosti u povrchu, což může být způsobeno vpichem do tvrdé, struktury. Nejnižší tvrdosti do hloubky materiálu byly zjištěny u vzorku 7 a 10, tudíž jsou tyto podmínky kalení nevyhovující.

5 TECHNICKO - EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Laserové kalení je metoda, která je často srovnávaná s metodou povrchového indukčního kalení. Kalení pomocí laserové kalící hlavy se dá snadno automatizovat a použít při kalení tvarově složitých součástí, jež by nebylo možné, nebo velmi obtížné indukčně zakalit. Největší položkou pro zařízení laserového kalícího pracoviště je bezpochyby pořizovací cena laserového zdroje s potřebnými komponenty. Cena těchto přístrojů se pohybuje v řádech miliónu a proto je zapotřebí spočítat cenu pořízení tohoto pracoviště nebo použít indukční kalení k čemuž je zapotřebí induktoru a vysokofrekvenčního zdroje, který není zdaleka tak drahý jako laser.

Pro vyhodnocení technicko-ekonomického srovnání bylo poptáno laserové kalení u firmy KSK a indukční kalení u firmy Q.I.P. s.r.o., která se specializuje zejména na tepelné a chemicko-tepelné zpracování kovů. K vyhodnocení byla zvolena válcová tyč průměru 50 mm. Požadované zakalené pásmo šířky 50 mm se nachází 50 mm od čela vymyšlené válcové součásti. Poptávka obsahovala dvě varianty k vyčíslení cenové nabídky. První varianta obsahovala požadavek na 1 kus a druhá pro vyhotovení 100 ks součásti. Požadovaným parametrem zakalené oblasti je tvrdost 600 HV v hloubce 0,8 mm.

Nabídky firem jsou zobrazeny v tab. 14. U nabídky od firmy Q.I.P., pro indukční kalení, je cena samotného kalení jednoho kusu 50 Kč, avšak výroba induktoru, sprchy a upínacího přípravku je cca 6000 Kč. Dále je v ceně započítaná příprava stroje a odzkoušení procesu kalení což činí 3000 Kč.

Tab. 14 Porovnání cen laserového a indukčního kalení.

	Varianta1: Cena 1 ks	Varianta 2: Cena 1 ks	Varianta 2: Cena 100 ks
Laserové kalení (KSK)	1035 Kč	144 Kč	14 400 Kč
Indukční kalení (Q.I.P)	9050 Kč	140 Kč	14 000 Kč

Čas potřebný pro vyhotovení laserového kalení 100 kusů součásti je odhadován na dvě osmihodinové pracovní směny i s přípravou pracoviště a odzkoušením procesu. Doba indukčního kalení potřebná pro upnutí a zakalení jsou 3 minuty, tudíž pro vyhotovení 100 ks je potřeba jednu směnu, avšak pro výrobu induktoru se sprchou a upínacím přípravkem je potřeba určitě delší doby.

Z tab. 14 lze vyčíst, že pro výrobu výrobní dávky do 100 ks je laserové kalení levnější než indukční, protože výroba induktoru s ostatními přípravky je drahá a výroba by se nevyplatila. Pro laserové kalení je potřeba zvolit optimální podmínky kalení a naprogramovat pohyb laserové hlavy bez nutnosti pořízení dalšího zařízení. Při výrobní sérii nad 100 ks se indukční kalení stává levnějším z důvodu rozpočítání pořizovacích nákladů na potřebné zařízení, nicméně indukčním kalením není možné získat tak kvalitní povrchové zakalení jako při použití laserového kalení. Toto technicko-ekonomické zhodnocení platí pouze pro danou poptávanou jednoduchou součást, ale pro kalení tvarově složitějších součásti bude výhodnější použití laserového kalení.

6 ZÁVĚR

Cílem této závěrečné práce bylo seznámení se s technologií laserového povrchového kalení, navržení metodiky experimentu a vyhodnocení mechanických a metalografických vlastností zakalené vrstvy. Povrchové kalení laserem je moderní a progresivní metoda tepelného zpracování kovů. Výhodami použití laseru pro povrchové kalení je minimální tepelné ovlivnění materiálu do hloubky směrem k jádru, rychlost kalení (obvodová rychlost tyče), tvarová složitost součásti a vznik tvrdé martenzitické jemné struktury. Při experimentu byl použit diskový laser, bylo zakaleno 10 vzorků materiálu 42CrMo4. Při procesu tepelného zpracování se měnila rychlost kalení, výkon laseru a průměr dopadajícího rozmítaného paprsku. Podmínkami, které zůstaly konstantní po celou dobu procesu, byla povrchová teplota součásti a vzdálenost laserové hlavy od povrchu součásti. Pro vyhodnocení bylo zapotřebí metalograficky připravit vzorky a následné pořízení snímků mikrostruktury a makrostruktury. Dalším kritériem vyhodnocení bylo měření mikrotvrdosti a hloubky zakalené oblasti.

Ze všech kalících parametrů, jež byly použity, jsou nejméně vhodné parametry u vzorků č. 7 a 10. Vzorky byly kaleny nejmenším průměrem paprsku, který hodně ovlivňuje hloubku zakalení. Při zjišťování hloubky zakalení bylo naměřeno pouhých 0,26 až 0,29 mm. Hodnota tvrdosti pod povrchem byla naměřena 600 HV, což je také méně než u ostatních. Tyto parametry nejsou vhodné pro laserové kalení.

U vzorků 1 až 4 jsou podmínky pro kalení optimální, průměr paprsku byl 6 mm a obvodová rychlost 3 až 7 mm/s. Byla naměřena největší hloubka zakalené oblasti, jež se pohybuje od 2,22 do 1,3 mm, přičemž největší hloubku má vzorek 1. Při procesu kalení se postupně zvyšovala obvodová rychlost tyče, tudíž se také zmenšovala hloubka zakalení. Vzorky byly kaleny stejným průměrem paprsku. Při porovnání tvrdosti vzorků je zjištěna skoro stejná hodnota tvrdosti u povrchu (690 HV), a to díky zachování teploty na povrchu. Zbývající vzorky 5, 6, 8, 9 dosahují hloubky zakalení minimálně 0,73 mm. Vzorky byly kaleny obvodovou rychlostí 5 a 7 mm/s a průměrem paprsku 2 a 4 mm. Hodnoty tvrdosti na povrchu jsou opět hodně podobné jako u vzorků 1 až 4.

Pro závěrečné zhodnocení parametrů, vhodných pro laserové kalení, jsou vybrány vzorky 1 až 4, které mají největší hloubku zakalení díky největšímu průměru paprsku, jenž má na hloubku zakalení největší vliv. Měnící se obvodová rychlost tyče tolik neovlivňuje hloubku a tvrdost zakalení oblasti jako již zmiňovaný průměr laserového paprsku. Pro komplexnost vyhodnocení nejlepších parametrů kalení by byla možná ještě zkouška otěruvzdornosti, ta však nebyla požadována. Pro ekonomické vyhodnocení vhodných kalících parametrů hrají roli rychlostí kalení, které nejsou závratně odlišné, aby výrazně ovlivnily cenu kalení. Nicméně finanční roli také hraje použitý výkon, jenž se mění s měnícími se parametry pro zachování povrchové teploty. Při určování kalících parametrů jsou nejdůležitější požadavky zákazníka na hloubku zakalení a tvrdost zakalené oblasti. Teprve po jejich vyhodnocení je možné vybrat optimální parametry. Na základě provedeného experimentu a vyhodnocení vzniklých vzorků mají pracovníci laserového pracoviště v KSK dostatek informací pro určení parametrů potřebných pro kalení daného materiálu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BENKO, B., FODEREK, P., KOSEČEK, M., BIELAK, R.l: Laserové technológie,1.vyd.,Bratislava, Vydavateĺstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
2. BULLING, Dieter. Tribotechnika: Laserové kalení proces s velkým potenciálem. In: Tribotechnika: Laserové kalení proces s velkým potenciálem [online]. 2012. vyd. 2012 [cit. 2014-03-16].
3. DAĎOUREK, Karel. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Povrchové kalení: Teorie tepelného zpracování. 2007
4. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.
5. NĚMEČEK, Stanislav. MATEX PM. Materiálová podstata kalení povrchu laserovým paprskem. 2008.
6. TURŇA, M., Špeciálné metódy zvárania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9.
7. *Avio: Fiber Laser Welder* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.avio.co.jp/english/products/assem/lineup/laser/fiber.html
8. *Bjpcrystal: Nd:YAG Laser Crystal* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.bjpcrystal.com/3-yag-laser-crystal-1.html
9. *Bodycote: Cementace v atmosférách* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.bodycote.com/cs-CZ/services/heat-treatment/case-hardening-with-subsequent-hardening-operation/atmospheric-carburising.aspx
10. *Bodycote: Indukční kalení* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.bodycote.com/cs-CZ/services/heat-treatment/harden-and-temper/induction-hardening.aspx
11. *Bodycote: Nitridace v plynu* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.bodycote.com/cs-CZ/services/heat-treatment/case-hardening-without-subsequent-hardening-operation/gas-nitriding.aspx
12. BRAJER, Jan. *Engineering: Návrh a optimalizace laserových technologii* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/smartwelding/motoman/robots.htm
13. *Chempoint: Tvrdost (mikrotvrdost) – významná mechanická vlastnost materiálů* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.chempoint.cz/tvrdost-mikrotvrdost
14. COHERENT: DIAMOND CO2 Lasers [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.coherent.com/products/?790/DIAMOND-CO2-Lasers
15. *Commons wikimedia: Povrchové kalení plamenem* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Povrchov%C3%A9_kalen%C3%AD_plamenem.jpg
16. DAĎOUREK, Karel. *Povrchové kalení* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf
17. DAĎOUREK, Karel. *Povrchové kalení* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/02povrkal.pdf
18. DRIML, Bohuslav. *Kalení a popouštění* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf
19. DUNOROVSKÝ, Jiří a Ladislav KOLAŘÍK. *Laserové techlologie* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/laser.pdf
20. *Eagle: Laser welding* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.eagle-group.eu/en/laser-welding
21. *FLIR: Stacionární termokamery Flir A300 a A310* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-a300-flir-a310/
22. *Hadyna: Svařovací robot* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/smartwelding/motoman/robots.htm

23. Introductoheat Europe: Induktionshärten. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.hwg-inductoheat.de/
24. *IStrojírenství: Svařování laserem- poslední trendy* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?nazev=svarovani-laserem-posledni-trendy
25. *ISOTEK: Metalografické přístroje MTH* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.isotek.sk/metalograficke-pristroje.html
26. *Iiviinfrared: Micron High Power Optics and Materials* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.iiviinfrared.com/1-Micron-Optics-Materials/1micron-optics_materials.html
27. *Intricutlaser: laser cutting* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.intricutlaser.com/faqs
28. *Kalírna: Nitridace v plynu* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.kalirna.cz/cz/sluzby/item/26-nitridace-v-plynu.html
29. *Kalírna Výškov: Plazmová nitridace* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.kalirna-vyskov.cz/technologie/plazmova-nitridace
30. KRAUS, V. *Tepelné zpracování kovů* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://tzs.kmm.zcu.cz/chtz.pdf
31. Kolkop, David. Technologie řezání laserem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 64 s., 4 přílohy. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
32. KOŘÁN, Pavel. *MMPrůmyslové Spektrum: Průmyslové lasery* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html
33. *KS-Kuřím: Technologie zhotovení závitu* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.ks-kurim.cz/kulickove-srouby/technologie-zhotoveni/
34. *KSK precise Motion: Vodící tyče* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.ks-kurim.cz/doplnkovy-sortiment/vodici-tyce/
35. *Lao Lasery a Optika: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128
36. *Laser Components: Aplication Note Top - Hat* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1
37. *LaserTec: Laser hardering* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://lasertec.pl/hartowanie-laserowe/?lang=en
38. *Laser treatment: Laser Cladding* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.uk-finishing.org.uk/N-COAT70/laser.htm
39. *LaserTherm: Laserové navařování* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-navarovani/
40. *LaserTherm: Návrh zařízení* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.lasertherm.cz/sluzby/navrh-zarizeni/
41. *Leonardo Technology: Druhy laseru* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?start=5
42. *Leonardo Technology: Laser e-learning* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning
43. *MEDUNA: Nitridace v plynu* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://kalirna.cz/cz/sluzby/item/26-nitridace-v-plynu.html
44. *Mega-blog: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/
45. *Metrotest: Tvrdoměr Q10A* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.metrotest.cz/tvrdomer-rockwell.html
46. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techniky_2013__mrna.pdf

47. *MMPrůmyslové Spektrum: Plazmová nitridace* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/novinka/plazmova-nitridace.html
48. HAVRILLA, David. *MMPrůmyslové spektrum: Třetí generace diskových laserů* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/treti-generace-diskovych-laseru.html
49. *Olympus: LEXT OLS3100* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.olympus-global.com/en/news/2007a/nr070125lext31e.jsp
50. *Olympus: DSX500* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: https://www.olympus-ims.com/cs/microscope/dsx500/
51. *ORC: How fibre lasers work* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.orc.soton.ac.uk/61.html
52. *Photonics: Beam delivery* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=17573
53. *Protonics: Fiber vs. Disk* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=47616
54. *Photonics: Micromachining Medical Devices* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=17573
55. *PPlaser: Technologie laserového gravírování* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.pplaser.cz/sluzby/laserove-gravirovani/
56. *Rajmont: Indukční kalení* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-kaleni/
57. *Printing: Konstrukční principy osvitových jednotek* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.printing.cz/clanky/pokrocilejsi-temata/konstrukcni-principy-osvitovych-jednotek-1169c
58. SALABOVÁ, Petra. *Podtlaková cementace* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32013/podtlakova-cementace.html
59. SCANSONIC: Remote Laser Hardening - Adaptive. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://www.scansonic.de/en/products/rlh-a-remote-laser-hardening-adaptive
60. *Struers: Metalografický lis CitoPress* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?top_id=3
61. THÜRING, Josef. *MMPrůmyslové spektrum: Volba kuličkových šroubů* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/volba-kulickovych-sroubu.html
62. *TruDisc: TruDisk lasers* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.us.trumpf.com/en/products/laser-technology/products/solid-state-lasers/disk-lasers/trudisk.html
63. *TRUMPF: Vrtání* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/vrtani.html
64. *Tumlikovo: Kalení* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.tumlikovo.cz/rubriky/procesy/tepelne-zpracovani/kaleni/
65. *Tumlikovo: Nitridování ocelí* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.tumlikovo.cz/rubriky/procesy/chemicko-tepelne-zpracovani-kovu/nitridovani/
66. *Tumlikovo: Nitridování povrchu nástrojů* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.tumlikovo.cz/nitridovani-povrchu-nastroju/
67. SCHUBERT, Steffan. *Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů: MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html
68. *Strojírenství: Bainitické kalení* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/bainitick-kalen.html

69. *Struers: Tegramin* [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?top_id=3
70. VĚCHET, Stanislav a Karel NĚMEC. *Slideplayer: Tepelné zpracování* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://slideplayer.cz/slide/2810347/
71. *VUTS Liberec: Laserové kalení* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.vuts.cz/laserove-kaleni-1.html
72. ŽÁČEK, Jaroslav. *Tepelné zpracování kovů* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2888

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Legenda	Jednotka
2D	Dvojrozměrný	
3D	Trojrozměrný	
+A	Žíhání stav materiálu	
+SH	Válcovaný a loupaný stav materiálu	
ARA	Anizotermický rozpad austenitu	
CHTZ	Chemicko-tepelné zpracování	
ČSN	Česká technická norma	
DPSS	Diode Pumped Solid State	
EN	Evropská norma	
HRC	Tvrdost dle Rockwella	
HV	Tvrdost dle Vickerse	
IRA	Izotermický rozpad	
ISO	International Organization for Standardization	
KSK	Kuličkové šrouby Kuřim	
LASER	Light Amplification by Stimuled Emmision od Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření)	
LPSS	Lamp Pumped Solid State	
Obr.	Obrázek	
PN	PN přechod (polovodič)	
Tab.	Tabulka	
ÚPT	Ústav přístrojové techniky	
VUT	Vysoké učení technické	
YAG	Yttrium aluminium granát	
Ac_1	Překrystalizační teplota	[°C]
Ac_3	Překrystalizační teplota	[°C]
d	Průměr vtisku (aritmetický průměr dvou úhlopříček)	[mm]
F	Síla	[N]
f	Frekvence	[Hz]
h	Hloubka průniku střídavého magnetického pole	[mm]
Mf	Teplota konce vzniku martenzitu	[°C]
Ms	Teplota začátku vzniku martenzitu	[°C]
T	Teplota	[°C]
λ	Vlnová délka laserového paprsku	[m]
μ	Relativní magnetická permeabilita kovu	[-]
ρ	Specifický elektrický odpor	[Ω.m]

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1 Povrchové kalení laserem [37]. 10
Obr. 2 Druhy záření a viditelné světlo[41]. 11
Obr. 3 Závislost absorpce na vlnové délce laseru [32]. 13
Obr. 4 SLAB laser [14]. 14
Obr. 5 Nd-YAG krystal [8]. 14
Obr. 6 Buzení Nd-YAG laseru [35]. 15
Obr. 7 Diskový laser [53]. 15
Obr. 8 Princip polovodičového laseru[44]. 16
Obr. 9 Schéma vláknového laseru [51]. 17
Obr. 10 Laserové řezání [27]. 17
Obr. 11 Druhy řezání laserem [31]. 18
Obr. 12 Režimy laserové svařování [6]. 18
Obr. 13 Režimy svařování [20]. 19
Obr. 14 Laserové navařování [38]. 19
Obr. 15 Laserové vrtání [63]. 20
Obr. 16 Příklad laserového značení šroubu [55]. 20
Obr. 17 Příklad laserového gravírování [55]. 21
Obr. 18 Diagram Fe-Fe3C a pásmo kalících teplot [72]. 22
Obr. 19 ARA diagram podeutektoidní oceli [72]. 22
Obr. 20 ARA diagram s typy martenzitického kalení [72]. 23
Obr. 21 IRA diagram bainitického kalení [72]. 24
Obr. 22 Indukční kalení [23]. 24
Obr. 23 Nepřetržité indukční kalení [23]. 25
Obr. 24 Kalení plamenem [15]. 25
Obr. 25 Kalení laserem [40]. 26
Obr. 26 Diagram kalících teplot [72]. 26
Obr. 27 Kalený segment ohýbacího nástroje [67]. 27
Obr. 28 Tvary paprsku pro laserové kalení [52]. 28
Obr. 29 Přeměna kruhového paprsku na hranatý [36]. 28
Obr. 30 Beam integrátor [26]. 29
Obr. 31 Princip rozmítání laserového paprsku a dopad pomocí beam integrátoru. [57]. 29
Obr. 32 Nacementované ozubené kolo [58]. 30
Obr. 33 Nitridační pec[28]. 31
Obr. 34 Plasmová nitridace hřídelí v peci[29]. 32
Obr. 35 Porovnání tvrdosti [70]. 33
Obr. 36 Zkoušené materiál v diagramu Fe- Fe_3C [72]. 34
Obr. 37 Kuličkový šroub [61]. 35
Obr. 38 Profily kuličkových šroubů [33]. 35
Obr. 40 Laserový zdroj [62]. 36
Obr. 41 Laserová kalící hlava 37
Obr. 42 Průmyslový robot [22]. 37
Obr. 43 Laboratorní pila [25]. 38
Obr. 44 Metalografický lis [37]. 39
Obr. 45 Metalografická leštička [69]. 39
Obr. 46 Mikroskop [49], [50]. 40
Obr. 47 Tvrdoměr Q10A [45]. 41
Obr. 48 Termokamera Flir [21]. 41
Obr. 49 Laserové kalení tyče. 42
Obr. 50 Snímek chladnutí zakalené tyče. 42

Obr. 51 Příprava vzorků. 43
Obr. 52 Vzorek č. 1. 44
Obr. 53 Vzorek č. 2. 45
Obr. 54 Vzorek č. 3. 45
Obr. 55 Vzorek č. 4. 45
Obr. 56 Vzorek č. 5. 45
Obr. 57 Vzorek č. 6. 46
Obr. 58 Vzorek č. 7. 46
Obr. 59 Vzorek č. 8. 46
Obr. 60 Vzorek č. 9. 46
Obr. 61 Vzorek č. 10. 47
Obr. 62 Graf závislosti hloubky zakalené oblasti na rychlosti kalení. 47
Obr. 63 Závislost hloubky zakalené oblasti na průměru laserového paprsku. 48
Obr. 64 Závislost použitého výkonu na obvodové rychlosti tyče. 48
Obr. 65 Závislost výkonu na průměru paprsku. 49
Obr. 66 Mikrostruktura vzorku č. 1- 139x zvětšeno. 49
Obr. 67 Detail A - mikrostruktura vzorku č. 1 – 1000x zvětšeno. 50
Obr. 68 Detail B, C- mikrostruktura vzorku č. 1 1000x zvětšeno. 50
Obr. 69 Detail D- mikrostruktura vzorku č. 1 1000 zvětšeno. 51
Obr. 70 Pořadí a směr vpichů při zjišťování tvrdosti 51
Obr. 71 Měření tvrdosti dle Vickerse [13]. 52
Obr. 72 Porovnání vpichů. 52
Obr. 73 Závislost tvrdosti na hloubce zakalené oblasti vzorku č. 1. 53
Obr. 74 Závislost tvrdosti na hloubce zakalené oblasti. 54
Obr. 75 Závislost tvrdosti na průměru paprsku u vzorků 3 až 10, vpich č. 1. 54
Obr. 76 Závislost tvrdosti na průměru paprsku u vzorků 3 až 10, vpich č. 6. 55

Tab. 1 Porovnání laserového paprsku s klasickým zdrojem světla [46]. 12
Tab. 2 Druhy materiálu a jejich koeficient absorpce [19]. 12
Tab. 3 Frekvence doporučené pro použití indukčního kalení oceli [17]. 25
Tab. 4 Chemické složení oceli. 34
Tab. 5 Základní mechanické vlastnosti materiálu. 34
Tab. 6 Parametry laserového zdroje [62]. 36
Tab. 7 Parametry kalící hlavy [59]. 37
Tab. 8 Technické parametry průmyslového robota [22]. 38
Tab. 9 Technické parametry laboratorní pily [25]. 38
Tab. 10 Technické parametry mikroskopu [49],[50]. 40
Tab. 11 Parametry pro kalení. 43
Tab. 12 Hloubka zakalené vrstvy 47
Tab. 13Naměřené hodnoty tvrdosti. 53
Tab. 14 Porovnání cen laserového a indukčního kalení 56

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Materiálová list oceli 42CrMo4
Příloha 2 Protokol o měření tvrdost v KSK
Příloha 3 Snímky mikrostruktury ve větší velikosti

AV 037-2014

CZECH STEEL GROUP

Jakostní osvědčení - Inspection certificate - Abnahmeprüfzeugnis

podle - according to - gemäss EN 10204/3.1

Dodavatel: (Supplier, Lieferant):	CZECH STEEL GROUP s.r.o. Kubelíkova 1224/42 130 00 Praha 3	Odběratel: (Customer, Abnehmer):	Kuličkové šrouby Kuřim a.: Blanenská 1277 664 34 Kuřim

Předmět dodávky - Subject of delivery - Lieferunggegenstand

Číslo - No. - Nr.	Jakost - Grade - Güte Norma - Standard	Rozměr - Dimension Norma - Standard	Délka - Lenght - Länge	Počet ks-Number of pieces-Stückzahl	Váha-Weight-Gewicht	Tepelné zpracování-Heat treatment-Wärmebehandlung Provedení - Execution	Číslo tavby-Heat No.-Schmelze Nr.
1	42CrMo4 EN 10083	pr. 49,5 h11 EN 10278			5050 kg	+A +SH loupaná kruhová ocel	64728
2							
3							
4							
5							

Chemické složení - Chemical composition - Chemische Zusammensetzung

Číslo tavby Heat No. Schmelze Nr.	Obsah v % Gehalt in % - Content in %													
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	W	Co	Ti
64728	0,42	0,69	0,27	0,011	0,006	0,96	0,11	0,17	0,16	0,01	0,03			

Přejímací zkoušky - Inspection tests - Abnahmeprüfungen

		1	2	3	4	5
100% Ultrasonic test						
Norma - Standard						
Tvrdost - Hardnes - Härte	HB	209				
Pevnost v tahu - Tensile strenght - Zugfestigkeit (Rm)	MPa	1066				
Mez kluzu - Yield strenhgt - Streckgrenze (Rp) 0,2%	MPa	953				
Prodloužení - Elongation - Bruchdehnung (A5)	%	15,5				
Mikročistota – Microcleannes						
Norma – Standard						
Velikost zrna - Grain size - Korngrösse						
Norma - Standard						

Místo (Location, Ort):	Praha	Vystavil:	
Datum (Date, Datum):	15.8.2014	(Made out by, ausgefertigt durch):	Ing. Martin Tomaštík

K DL 14/919

ŠTORE STEEL
Podjetje za proizvodnjo jekel d.o.o.

Date: 22.08.2014

INSPECTION CERTIFICATE

EN 10204/3.1 **No.: ATK1411407**

Purchaser

ZDAS SGS GmbH
Holzener Strasse 44
D-58708 Menden

Order No.: 4510087447
Our order No.: 05-14-00321/001
Delivery note: 30-14-04483
Delivery date: 22.08.2014
Transport: By truck 2H69966 5H59728

Product: PEELED ROLLED ROUND STEEL SOFT ANNEALED EN 10278 (h11) EN 10083-3 / 42CrMo4+A

Cast No.	Quality	Dim (mm)	Weight (kg)	Bundle	Melting furnace	Dim. of billet
64728	42CrMo4	39,6	5,707	6	E	#180

CHEMICAL COMPOSITION OF CAST (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al
0,42	0,27	0,69	0,011	0,006	0,96	0,11	0,17	0,01	0,16	0,027

MECHANICAL PROPERTIES

Hardness in as delivered condition: 200 HB;
Jominy DIN 50191

mm	1	1,5	2	3	3,5	4	5	6	6,5	7	8	9	10	11	12	13	15	20
HRc		59		59			56			53		51		48		45	42	41

mm	25	30	35	40	45	50
HRc	40	39	38	38	37	36

Heat treatment of samples:QUENCHED AND TEMPERED
Temperature (°C):840(+20-20)/610(+70-70)
Media:Oil, Water

Yield stress N/mm²	Tensile strenght N/mm²	Elongation %	Reduction of area	Impact test Joule 1	Joule 2	Joule 3	Typ	°C
953	1066	15,5	63,8	101	105	103	ISO-V	20

We hereby certify, that the material described above complies with the terms of the order contract.

Inspection supervisor
Aleš Skale

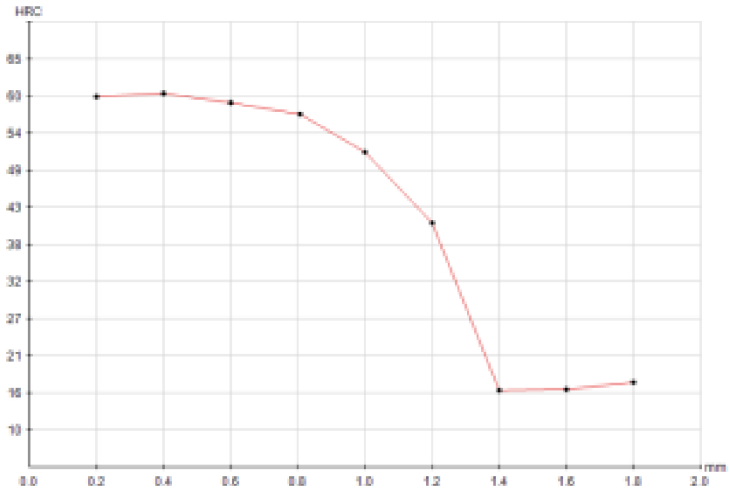
Skale Aleš

Measurement protokol

KSK PRECISE MOTION

Sample: Vzorek 3

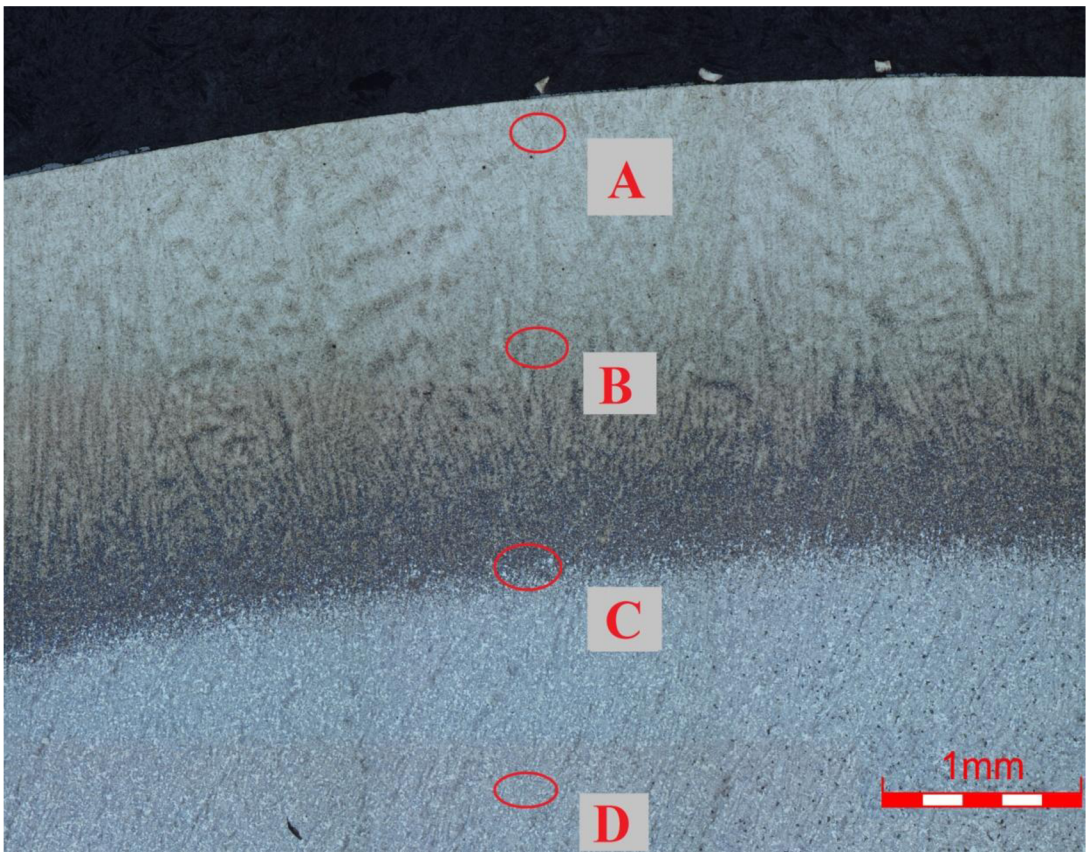
Test: Zk. postup1



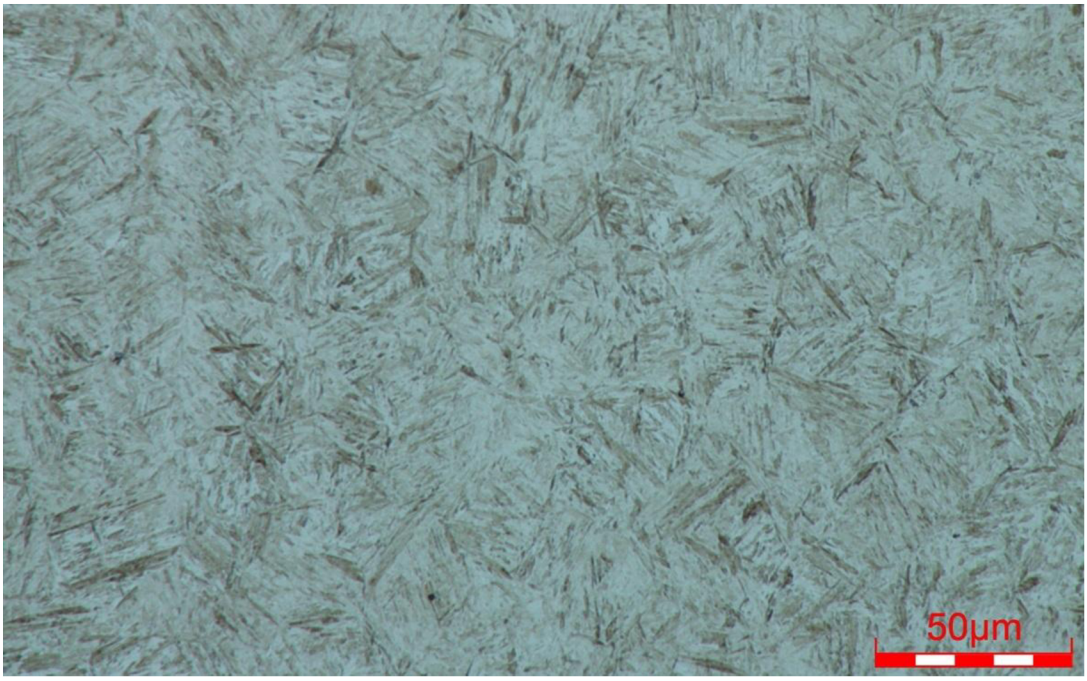
Nbr	Hardness	Method	X - Position
1	685	HV 1	0,20
2	695	HV 1	0,40
3	665	HV 1	0,60
4	630	HV 1	0,81
5	531	HV 1	1,00
6	399	HV 1	1,20
7	215	HV 1	1,40
8	216	HV 1	1,60
9	222	HV 1	1,80
10	223	HV 1	2,00

Date: 10.4.2015 Signature: _____

Mikrostruktura vzorku č. 1- 139x zvětšeno.

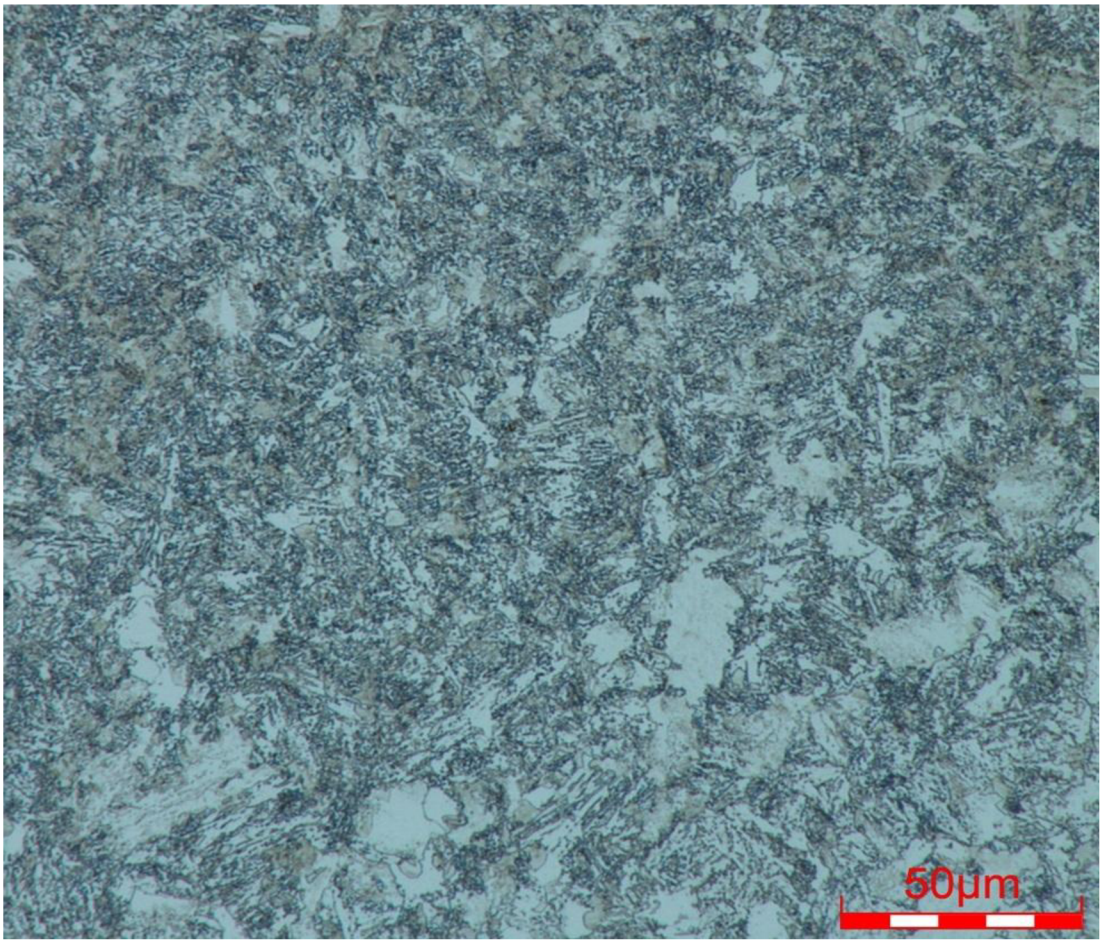
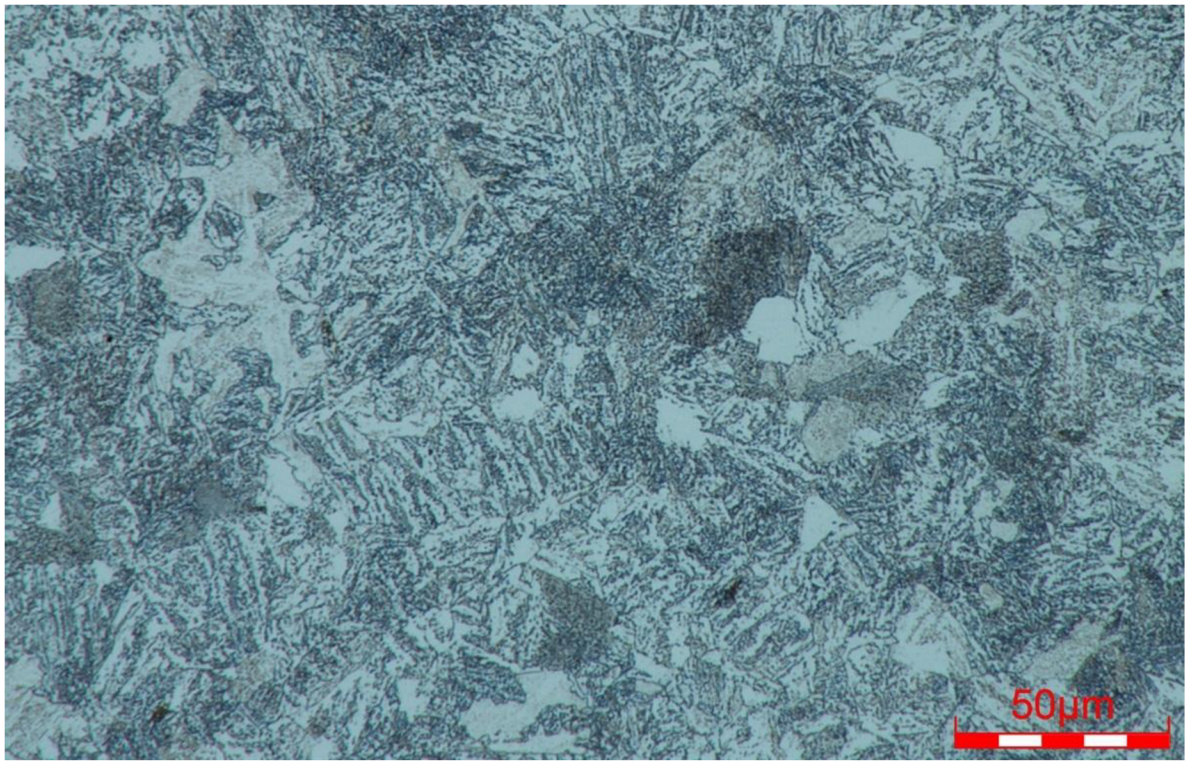


Detail A - mikrostruktura vzorku č. 1 – 1000x zvětšeno.



Detail B - mikrostruktura vzorku č. 1 1000x zvětšeno.

Detail C - mikrostruktura vzorku č. 1 1000x zvětšeno.



Detail D - mikrostruktura vzorku č. 1 1000x zvětšeno.