



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POVRCHOVÉ KALENÍ OCELÍ VLÁKNOVÝM YBYAG LASEREM

SURFACE HARDENING OF STEELS BY YBYAG FIBER LASER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN HROMADA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Hromada

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

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

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

Povrchové kalení ocelí vláknovým YbYAG laserem

v anglickém jazyce:

Surface hardening of steels by YbYAG fiber laser

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

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

Cíle diplomové práce:

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

Seznam odborné literatury:

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 2.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

HROMADA Martin, Povrchové kalení ocelí vláknovým YbYAG laserem

Diplomová práce je zaměřena na povrchové kalení laserem pomocí vláknového Yb:YAG laseru. Experiment je založen na zakalení jednotlivých vzorků z oceli 12 050 při různých parametrech vzdálenosti a rychlosti pohybu laserové hlavy. V teoretické části je nejprve popsán princip laseru, poté druhy laserů, využití laseru v průmyslu, druhy kalení a způsoby měření tvrdosti. V praktické části jsou nejprve vyhodnoceny snímky makrostruktury, mikrostruktury a naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse. V závěru byl proveden rozbor výsledků laserového kalení a následně byly vybrány vhodné kalící parametry.

KLÍČOVÁ SLOVA

povrchové kalení laserem, laser, ocel 12 050, tepelné zpracování, tvrdost

ABSTRACT

HROMADA Martin, Surface hardening of steels by YbYAG fiber laser

Diploma thesis is focused on laser hardening by Yb:YAG fiber laser. Experiment is based on hardening of testing pieces made of steel 12 050 with different parameters of distance and movement speed of laser head. In theoretical part are described principle of laser, types of lasers, laser technology in industry, types of lasers, types of hardening and types of hardness measuring. In practical part are firstly evaluated macrostructure and microstructure photos and Vickers hardness. In conclusion are analyzed the results of laser hardening and after that the best laser hardening parameters were selected.

KEYWORDS

laser hardening, laser, steel 12 050, heat treatment, hardness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HROMADA, Martin. *Povrchové kalení ocelí vláknovým YbYAG laserem*. Brno, 2013. 56s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením RNDr. Libora Mrňi, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2013

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za poskytnutí potřebných rad, informací, podkladů a za bezproblémovou komunikaci při řešení této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval paní Jarmile Houdkové za zpracování vzorků a panu Vojtěchu Řiháčkovi za pomoc při měření tvrdosti. Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017).

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
1 LASERY OBECNĚ	11
1.1 HISTORIE	11
1.2 ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU	12
1.3 INTERAKCE LASERU S MATERIÁLEM	12
2 LASERY POUŽÍVANÉ V PRŮMYSLU	14
2.1 CO ₂ LASERY	14
2.2 PEVNOLÁTKOVÉ LASERY	15
2.2.1 Nd:YAG lasery	15
2.2.2 Vláknové lasery	16
2.3 POLOVODIČOVÉ LASERY	17
3 VYUŽITÍ LASERU VE STROJÍRENSKÝCH TECHNOLOGIÍCH	18
3.1 SVAŘOVÁNÍ	18
3.2 ŘEZÁNÍ	19
3.2.1 Metody laserového řezání	20
3.3 NAVAŘOVÁNÍ	21
3.4 ZNAČENÍ	22
4 KALENÍ	23
4.1 DRUHY KALENÍ	24
4.2 POVRCHOVÉ KALENÍ	26
4.3 POVRCHOVÉ KALENÍ LASEREM	27
5 MĚŘENÍ TVRDOSTI	30
5.1 METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI	30
5.1.1 Tvrdost dle Brinella	30
5.1.2 Tvrdost dle Rockwella	31
5.1.3 Tvrdost dle Vickerse	32
5.1.4 Mikrotvrdost dle Vickerse a Knoop	33
6 PRAKTICKÁ ČÁST	35
6.1 STROJE POUŽITÉ PŘI EXPERIMENTU	35
6.2 VOLBA MATERIÁLU	39
6.3 NÁVRH EXPERIMENTU	39
6.4 POSTUP PROVEDENÍ EXPERIMENTU	40
6.5 VYHODNOCENÍ	42
6.5.1 Makrostruktura	44
6.5.2 Mikrostruktura	49
6.5.3 Tvrdost	51
7 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	55
8 ZÁVĚR	56

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých zkratk a symbolů

Seznam obrázků a tabulek

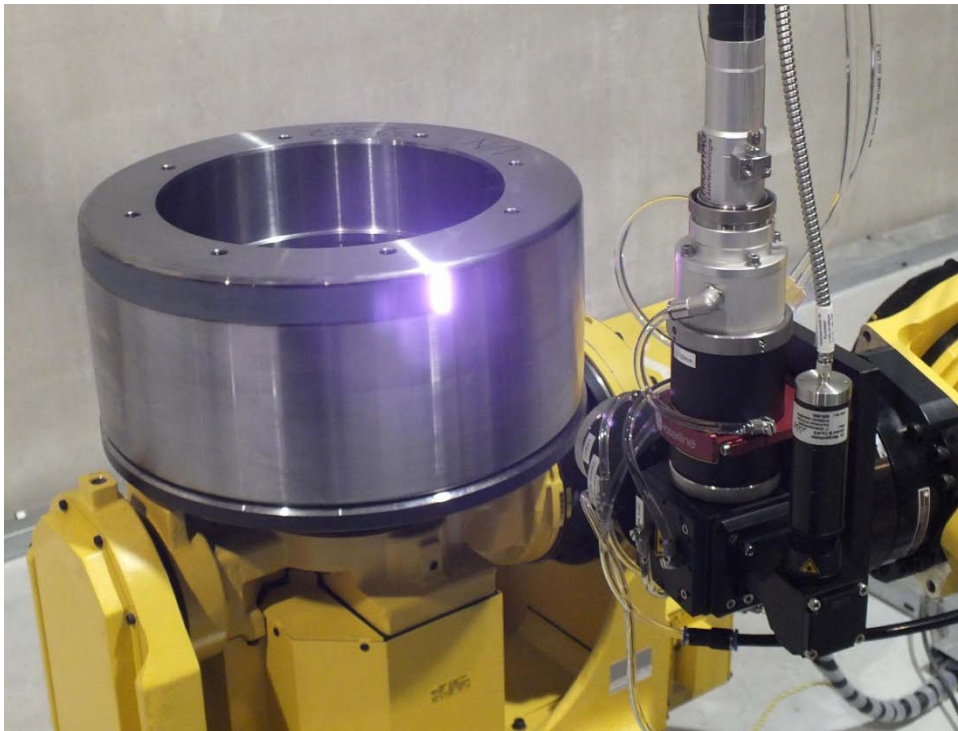
Seznam příloh

ÚVOD [51]

Laserové technologie se poslední dobou dostávají čím dál více do nejrůznějších odvětví průmyslu, zejména díky své velké univerzálnosti a také jednoduché automatizaci. Nejinak tomu je i v oblasti tepelného zpracování materiálu, kde se využívá vysoké energie laserového paprsku pro velice rychlé zahřátí materiálu. Materiál díky rychlému zahřátí a rychlému ochlazení získá vysokou povrchovou tvrdost a tento proces se nazývá laserové povrchové kalení. Tato poměrně nová a progresivní metoda tepelného zpracování materiálu má celou řadu výhod, oproti starším metodám, ať již klasického objemového, či povrchového kalení.

Diplomová práce se zabývá zkoumáním vlastností povrchově zakalených vzorků laserem a jejím cílem je určení nejvhodnějších podmínek a parametrů laserového kalení pro získání požadovaných vlastností materiálu. Několik vzorků z materiálu 12 050 se při různých nastavených podmínkách laserově zakalí na vláknovém Yb:YAG laseru. Tento laser je umístěn na pracovišti Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně. Následné vyhodnocení se bude skládat z několika hledisek. Nejprve se provede důkladná analýza makrostruktury a mikrostruktury ze snímků pořízených na mikroskopu. Poté se vyhodnotí naměřené hodnoty tvrdosti u jednotlivých vzorků.

V závěru diplomové práce se provede výsledné porovnání všech výsledků, ze kterých se následně určí, které parametry jsou vhodné pro laserové kalení a které naopak ne.



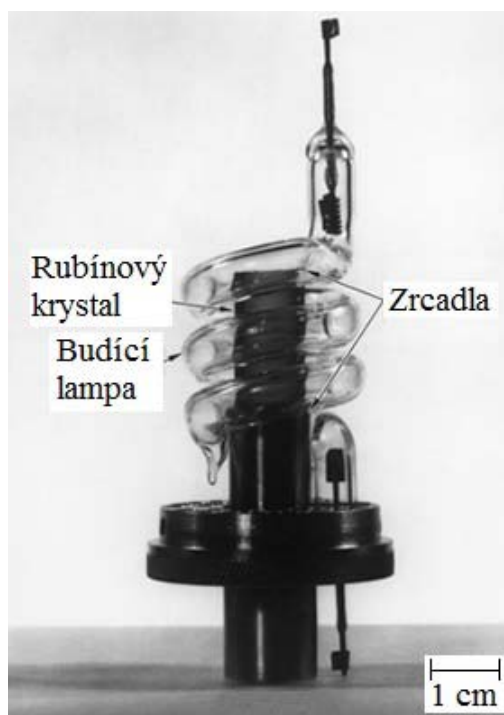
Obr. 1 Povrchové kalení laserem [51]

1 LASERY OBECNĚ [5], [63]

LASER je zkratka slova Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což lze volně přeložit jako zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser se tak obecně označuje jako optický zesilovač, generující záření pomocí procesu stimulované emise fotonů. Laserové záření se odlišuje od jiných zdrojů záření ve třech hlavních vlastnostech. Je monochromatické, což znamená, že paprsek má pouze jednu barvu o jedné vlnové délce. Dále je záření koherentní, neboli mající stejnou frekvenci vlnění, směr kmitání a fázi. Poslední vlastností je, že záření vystupuje z laseru ve formě úzkého paprsku o malém průměru.

1.1 HISTORIE [13], [43], [72]

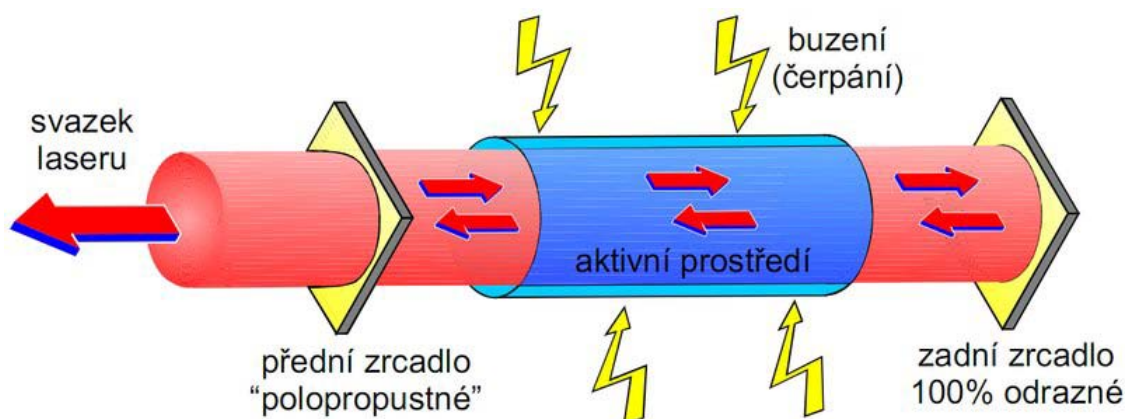
Historie laseru se začíná psát v roce 1917. Albert Einstein ukázal, že kromě jevů jako jsou absorpce a spontánní emise, existuje ještě stimulovaná emise. Další krok směrem k vynalezení laseru udělal ruský fyzik V. A. Fabrikant. Ten v roce 1939 poukázal na možnost použití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím a v roce 1951 spolu s M. M. Vudynským a F. A. Butajevovou přihlásili patent na metodu zesilování elektromagnetického záření. Na konferenci o radiospektroskopii v roce 1952 moskevští fyzikové A. M. Prochorov a N. G. Basov přednášeli o molekulárním svazkovém generátoru – MASERu, který pracoval se svazkem molekulárního čpavku a zanedlouho poté v roce 1954 byl sestrojen první molekulární generátor. V roce 1958 Prochorov, Schawlow a Townes vyslovili nezávisle na sobě myšlenku, že jev stimulované emise, použitý v maseru, lze použít i v infračervené a optické oblasti spektra. Následně v roce 1960 Theodore Maiman vynalezl první laser na světě a jednalo se o rubínový laser (Obr. 2). Od té doby začal prudký vývoj různých typů laserů zároveň s vývojem laserové technologie. První CO₂ a polovodičový laser spatřily světlo světa o dva roky později v roce 1962 a v České republice se laser poprvé objevil v roce 1963. Po vynalezení laseru nebylo zpočátku vůbec zřejmé, kde všude najde laser své uplatnění. Postupným vývojem se však laser proměnil v nástroj, který podstatným způsobem ovlivnil nejenom techniku, ale prakticky všechny vědní obory.



Obr. 2 První laser [72]

1.2 ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU [41], [63]

Každé laserové zařízení se neobejde bez tří základních částí a první nezbytnou částí je aktivní prostředí. Aktivní prostředí mohou představovat například atomy, ionty a molekuly plynů, polovodiče, kapaliny nebo pevné látky. Toto aktivní prostředí musí být nějakým způsobem buzeno, tudíž další část laseru je buzení. Způsob buzení je závislý na použitém druhu aktivního prostředí. Buzení je zajištěno například optickým zářením z výbojky nebo laserové diody, elektrickým výbojem nebo případně chemickou reakcí. Budící zdroje mohou pracovat jak v kontinuálním, tak v pulzním režimu. Buzením se dodává laseru energie, která je poté následně pomocí procesu stimulované emise přeměněna v optickém rezonátoru na laserový paprsek. Optický rezonátor je složen ze dvou rovnoběžných zrcadel, kde jedno je nepropustné a druhé polopropustné. Jednoduché schéma základního principu laseru je zobrazeno na Obr. 3.



Obr. 3 Základní princip laseru [63]

Obecně lze říci, že aktivní prostředí obsahuje vždy jistý element, nejčastěji to bývá atom, který se může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo ve stavu vybuzeném (excitovaném) s vyšší energií. Tento atom při přechodu z vyššího energetického stavu do nižšího vyzáří foton. Tento přechod se děje spontánně sám od sebe, protože aktivní prostředí má snahu být vždy ve stavu s co nejnižší energií, neboli ve stavu termodynamické rovnováhy. Díky buzení tento stav porušíme a převedeme aktivní prostředí do vybuzeného stavu, kde je většina atomů ve stavu s vyšší energií. V tuto chvíli lze dodanou energii aktivnímu prostředí přeměnit na laserový paprsek (proud fotonů) pomocí procesu stimulované emise. Obecně lze říci, že se jedná o lavinový efekt, kdy foton dopadající na vybuzený atom způsobí jeho přechod z vyšší na nižší energetickou hladinu a dojde k vyzáření dalšího fotonu. Fotony se neustále pohybují v rezonátoru od jednoho zrcadla ke druhému a emitují další a další vybuzené atomy. Energie proudu fotonů neustále roste, až dosáhne určité hodnoty a projde polopropustným zrcadlem jako laserový paprsek.

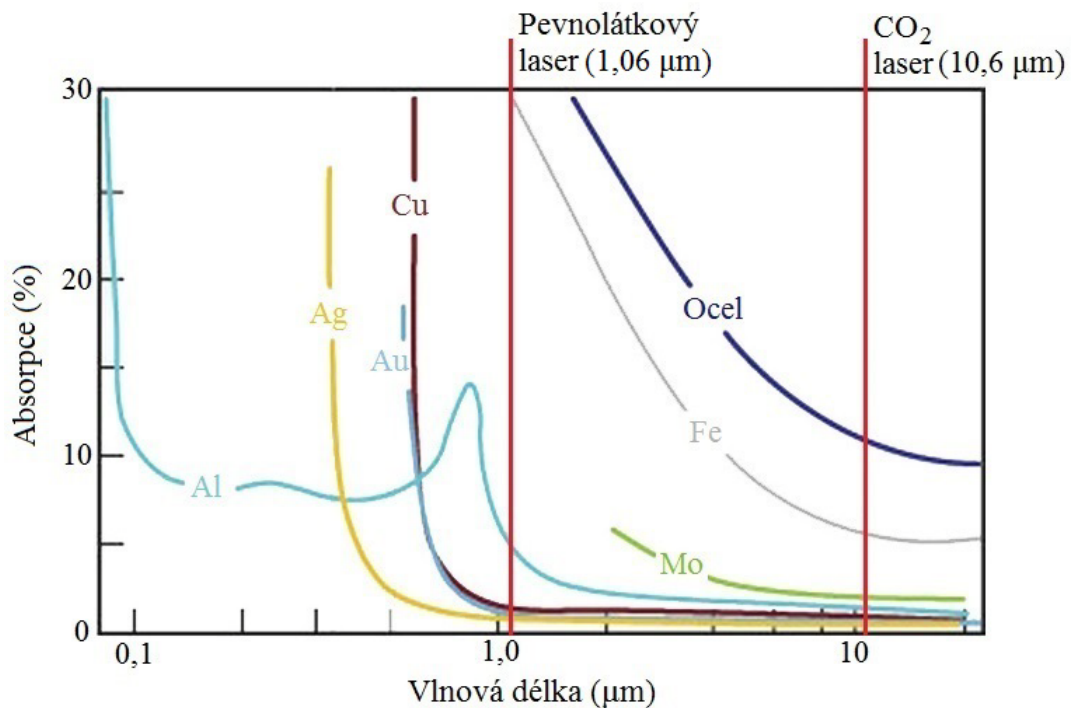
1.3 INTERAKCE LASERU S MATERIÁLEM [2], [3], [6], [73]

Předpokladem pro efektivní využití laseru při jakékoliv pracovní činnosti je absorpce laserového záření materiálem a jeho následná přeměna na teplo. Účinné pohlcení záření a jeho následná přeměna světelné energie na tepelnou je důležitým ukazatelem při laserovém zpracování kovů. Energie dopadajícího paprsku se dělí na odraženou, absorbovanou a prošlou. Jelikož kovy jsou neprůhledné, bývá prošlá energie nulová. Platí, že kovy s dobrou vodivostí mají nízký koeficient absorpce. Dále také platí, že s rostoucí teplotou roste také koeficient absorpce. Hodnotu absorpce však kromě materiálových vlastností a vlnové délky laserového paprsku ovlivňuje i stav povrchu. Obecně lze říci, že se zvyšováním vlnové délky

laserového záření klesá absorpce materiálu. Vliv vlnové délky laserového paprsku na velikost absorpce je znázorněn na Obr. 4. Z tohoto obrázku je patrné, že pro ocel je absorpce záření pevnolátkového laseru mnohem vyšší než u CO₂ laseru. Z toho důvodu lze použít například při řezání stejného materiálu u pevnolátkových laserů nižší výkon laserového paprsku, jak u CO₂ laseru. Vliv drsnosti povrchu na koeficient absorpce je poté uveden v Tab. 1. Z tabulky je zřejmé, že se zvyšující se drsností povrchu se zvyšuje také koeficient absorpce. Hodnotu koeficientu absorpce laserového záření materiálem lze zvýšit několika způsoby. Například zdrsněním povrchu před samotným laserovým zpracováním, povrchovou úpravou (černěním), nanesením látky s vyšším koeficientem absorpce (černá barva) nebo přehřevem povrchu.

Tab. 1 Hodnoty absorpce záření na drsnosti povrchu [3]

Stav povrchu	Průměrná drsnost povrchu Ra [μm]	Absorpce [%]	
		CO ₂ laser λ=10,6 μm	Pevnolátkový laser λ=1,06 μm
Leštěný	0,02	5,15 – 5,25	29,75 – 30,00
Broušený	0,21	7,45 – 7,55	38,90 – 40,10
Válcovaný	2,05	8,10 – 8,25	41,80 – 42,50
Pískovaný	1,65	33,85 – 34,30	68,20 – 68,40



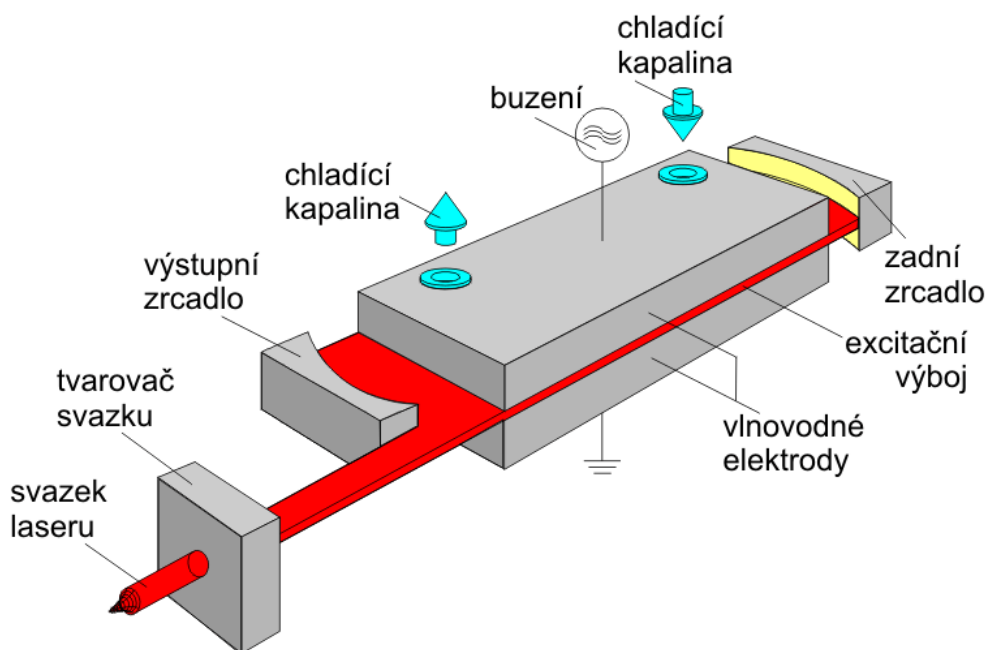
Obr. 4 Závislost vlnové délky na velikosti absorpce u různých materiálů [2]

2 LASERY POUŽÍVANÉ V PRŮMYSLU [5]

V počátcích vzniku laserové technologie se příliš nepočítalo s běžným nasazením laseru v průmyslu, zejména díky nízkému výkonu. Postupem času a neustálým a rychlým vývojem však lasery postupně nacházely uplatnění téměř ve všech oblastech průmyslové výroby. Díky využití jedinečných vlastností laserového paprsku lze zefektivnit výrobní proces a snížit výrobní náklady při zachování špičkové kvality.

2.1 CO₂ LASERY [3], [7], [15], [42], [50], [57], [59]

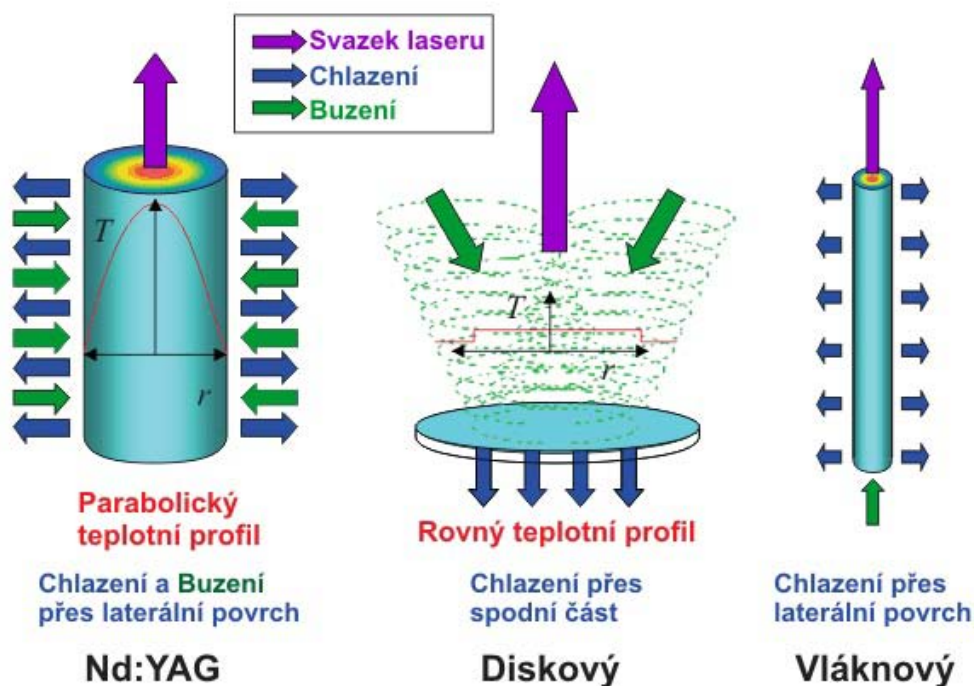
CO₂ lasery se zařazují do skupiny plynových laserů. Aktivní prostředí tvoří plyn nebo směs plynů obsahující CO₂. Vlnová délka vyzařovaného záření je 10,6 μm. CO₂ laser je schopen pracovat jak v pulzním, tak v kontinuálním provozu. Obecně tyto lasery vynikají vysokou spolehlivostí, dlouhou životností a výhodou jsou také nízké provozní náklady. CO₂ laser poskytuje dobrou kvalitu laserového svazku, poměrně slušnou účinnost, která se pohybuje v rozmezí 10 – 25 % a také vysoký výkon paprsku, který může dosahovat až 30 kW. Vzhledem k maximálním dosahovaným výkonům nemá CO₂ laser komerčně dostupnou konkurenci a drží si své místo v oblastech, jako je řezání a svařování. Pro řezání ocelových plechů jsou používány lasery o středním výkonu, pohybujícím se v rozmezí 500 – 6000 W. Díky snadnému programování řezu a flexibilitě jsou tyto lasery vhodné i při malých a středních výrobních sériích. Pro svařování se užívají lasery s výkonem nad 6 kW a objevují se zejména u automatizované velkosériové výroby. CO₂ lasery o výkonu laserového paprsku pod 500 W se používají na popisování a značení nekovových materiálů. Jedna z variant CO₂ laseru zaměřeného na vyšší efektivnost laseru, vyšší hustotu výkonu a vyšší kvalitu laserového svazku, je například slab CO₂ laser, který je znázorněn na Obr. 5. Tento laser dosahuje vysoké kvality paprsku a při řezání má nižší tepelně ovlivněnou oblast. Mezi největší nevýhody CO₂ laserů je nutnost použití zrcadel pro vedení paprsku. Optická dráha složená ze zrcadel je složitější než u mnohem výhodnějšího vedení paprsku optickým vláknem. Zrcadla mají velké nároky na údržbu a čistotu. Proto je nutná jejich častá kontrola a údržba.



Obr. 5 Princip slab CO₂ laseru [15]

2.2 PEVNOLÁTKOVÉ LASERY [15]

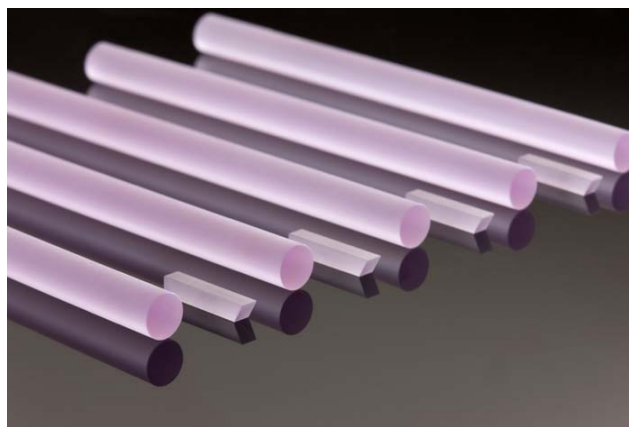
Nejčastější typy pevnolátkových laserů používaných v průmyslu jsou Nd:YAG lasery, vláknové lasery a diskové lasery. Tyto tři typy laserů, jejichž vlnová délka se pohybuje kolem $1,06 \mu\text{m}$, se liší hlavně geometrií aktivního prostředí, které je tvořeno maticí YAG (yttrium aluminium granát) krystalu dopovaného neodymem (Nd) nebo ytterbiem (Yb). Aktivní prostředí u Nd:YAG laseru tvoří 15 – 20 cm dlouhá tyčinka o průměru v jednotkách mm (Obr. 7). U vláknového laseru je to několik metrů dlouhé optické vlákno a u diskového laseru je to tenký disk o průměru 10 mm a tloušťce 0,25 mm. Jednotlivé druhy aktivního prostředí pevnolátkových laserů jsou znázorněny na Obr. 6. Velkou výhodou všech těchto tří typů laserů je možnost vedení laserového paprsku pomocí optického vlákna, což velmi zjednodušuje přenos laserového paprsku do místa procesu.



Obr. 6 Druhy aktivního prostředí u pevnolátkových laserů [15]

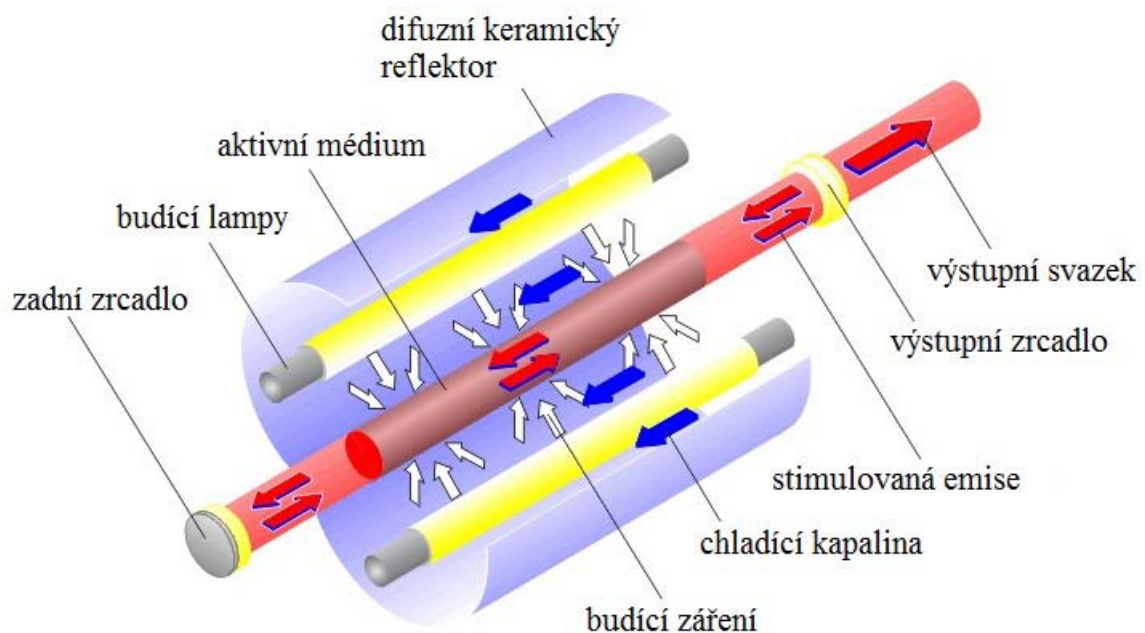
2.2.1 ND:YAG LASERY [15], [27], [42], [50], [57], [59], [67], [69]

Nd:YAG laser lze obecně zařadit do již starší skupiny pevnolátkových laserů. Aktivní prostředí je opticky čerpaný Nd:YAG krystal (Obr. 7) neboli yttrium-aluminium granát, který je dopovaný ionty neodymu. Vlnová délka laserového svazku je $1,064 \mu\text{m}$, a výkon je v rozmezí 50 W – 10 kW. Účinnost tohoto laseru je malá a pohybuje se kolem 3 – 7 %. Laser může pracovat v pulzním i kontinuálním režimu. Nd:YAG lasery lze rozdělit do několika generací. První generace laserů je buzená výbojkami (Obr. 8). Výhody těchto laserů jsou velká energie v pulzu a nízká investiční náročnost. Naopak mezi nevýhody patří nízká účinnost, nutnost chlazení a dražší provoz díky časté výměně výbojek. Tyto lasery se používají na svařování a vrtání. Do



Obr. 7 Ukázka Nd:YAG krystalu [27]

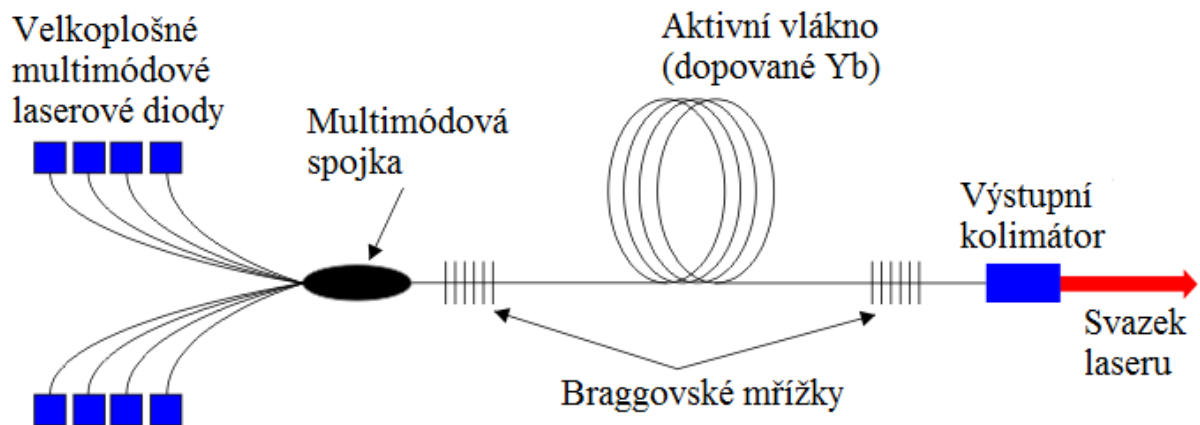
druhé generace patří lasery buzené polovodičovými diodami. Nevýhodou těchto laserů jsou vyšší pořizovací náklady, které jsou ale kompenzovány nižšími provozními náklady, vyšší účinností a také delší životností. Nároky na chlazení jsou také menší. Lasery o nižším výkonu jsou používány při značení a gravírování a výkonnější lasery se využívají na řezání a svařování. Třetí a také nejmodernější generací v této skupině je diskový laser, mající aktivní prostředí ve tvaru tenkého disku. Mezi výhody tohoto laseru patří kompaktnější konstrukce, dobrá kvalita výstupního paprsku a vysoký výkon dosahující až k 16 kW. V porovnání s vláknovými lasery mají diskové lasery menší životnost a účinnost pohybující se kolem 15 – 20 %. Použití diskových laserů je v oblasti náročnějších výkonových operací, jako je svařování a řezání. Velkou výhodou celé skupiny Nd:YAG laserů je možnost použití optického vlákna na vedení paprsku, čehož se s výhodou využívá na robotizovaných a automatizovaných pracovištích.



Obr. 8 Princip první generace Nd:YAG laseru buzeného výbojkami [15]

2.2.2 VLÁKNOVÉ LASERY [14], [15], [57], [58], [63]

Vláknový laser patří do skupiny pevnolátkových laserů a řadí se mezi technologicky nejmodernější v této kategorii. Aktivní prostředí je optické vlákno dopované ytterbiem. Buzení je zprostředkováno prostřednictvím laserových diod, je vedeno přes optickou spojku do aktivního vlákna a místo zrcadel jsou Braggovské mřížky. Záření je poté z optického vlákna vyvážáno pomocí optického kolimátoru a jeho vlnová délka je 1,07 μm . Princip vláknového laseru je znázorněn na Obr. 9. Účinnost tohoto laseru je vysoká a pohybuje se v rozmezí 30 – 35 %. Vláknové lasery mohou pracovat v kontinuálním, pulzním a kvazipulzním pracovním režimu. Výhoda vláknového laseru je jeho jednoduchost, kde je celý laser tvořen optickým vláknem a laserovým modulem. Díky spojování laserových modulů lze navyšovat výkon laseru od stovek wattů až po desítky kW. Laser disponuje výbornou kvalitou laserového paprsku, nízkým příkonem, kompaktními rozměry, nízkými provozními náklady a téměř nulovými nároky na údržbu. Vláknové lasery vynikají obrovskou životností a vysokou spolehlivostí. Na druhou stranu nevýhodou je vyšší pořizovací cena. Jedná se o jednu z nejmodernějších technologií pro řezání, svařování a značení materiálu. Podíl vláknových laserů na trhu má neustále stoupající tendenci a díky dosahovanému výkonu mohou vláknové lasery v budoucnosti nahradit i vysokovýkonné CO₂ lasery.



Obr. 9 Princip vláknového laseru [14]

2.3 POLOVODIČOVÉ LASERY [10], [42], [50], [57], [59], [63], [69]

Aktivním prostředím polovodičových laserů je elektricky čerpaná polovodičová dioda, vyzařující záření o vlnové délce 800 – 980 nm. Výkon laserového paprsku je udáván v rozmezí 50 W až 6 kW. Laser pracuje pouze v kontinuálním pracovním režimu. Výhodou tohoto laseru je vysoká účinnost 50 – 60 % a to díky přeměně elektrického proudu přímo na záření, který je schopen vést pomocí optického vlákna. Výhoda těchto laserů je v jejich nenáročném údržbě, malých rozměrech a nízké hmotnosti v porovnání s ostatními druhy laserů. Proto jsou často montovány na robotická ramena. Nevýhoda polovodičových laserů je v nízké kvalitě výstupního svazku, jehož hranatý profil nelze zaostřit do malého bodu. Paradoxně tato nevýhoda je při kalení naopak výhodou, protože při kalení se používá právě hranatý profil paprsku a odpadá tedy potřeba speciální optiky pro úpravu laserového svazku. Lasery do výkonu 250 W se používají k řezání a svařování plastů a tenkých kovových fólií, případně k pájení. U vyšších výkonů v řádech kW se používají při kalení, navařování, svařování kovů a plastů. Ukázka polovodičového laseru je na Obr. 10.



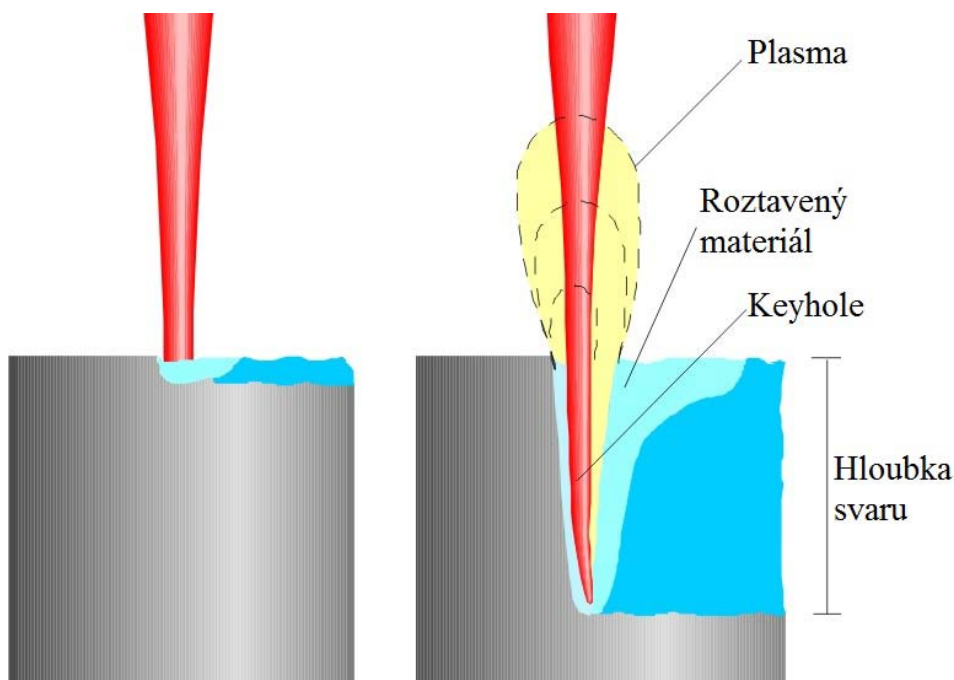
Obr. 10 Polovodičový laser [10]

3 VYUŽITÍ LASERU VE STROJÍRENSKÝCH TECHNOLOGIÍCH

Laserový paprsek se díky svým unikátním vlastnostem využívá v celé řadě strojírenských technologií. Nejvíce se ovšem laser využívá při řezání a to zejména při řezání plechů. Řezání laserem je velice rychlé, kvalitní a má mnoho dalších výhod. Obrovské energie koncentrované do jednoho malého bodu se využívá také při svařování, při kterém vznikají velmi kvalitní svary. Velké využití má laser také při značení a gravírování nejrůznějších materiálů. Laser se také často využívá pro tepelné zpracování značně namáhaných součástí nebo lisovacích forem.

3.1 SVAŘOVÁNÍ [37], [38], [39], [52], [57], [58], [60], [62], [66], [84]

Svařování pomocí laserového paprsku lze rozdělit na dva svařovací režimy. Jsou to kondukční režim a penetrační režim, které jsou znázorněny na Obr. 11. Při kondukčním režimu svařování, označovaném také jako svařování vedením tepla, se materiál taví absorpcí a vedením tepla vyvolaného laserovým paprskem. Tímto postupem svařování se dosahuje vysoké svařovací rychlosti a malých hloubek průvaru. Tento způsob se využívá v případech, kdy je rychlost svařování důležitější, než úzký a hluboký průvar. Pro penetrační režim svařování, taktéž označovaný jako metoda „keyhole“, je zapotřebí vyšší hustota výkonu než u kondukčního režimu. Působením laserového paprsku se materiál začne odpařovat, začne se generovat plazma a dochází k hlubokému provařování. Pomocí laserového paprsku se vytvoří kapilára tzv. „keyhole“, mající průměr roven až dvojnásobku průměru ohniska a plyny vystupující z této kapiláry zabraňují jejímu uzavření. Stěna „keyhole“ je tvořena roztaveným materiálem, který postupně zaplňuje kapiláru za pohybujícím se laserovým paprskem a vzniká úzký a hluboký svar. Samotný svařovací proces a jeho stabilita je závislá na svařovaném materiálu, vlnové délce laserového paprsku, rychlosti posuvu a na mnoha dalších faktorech.

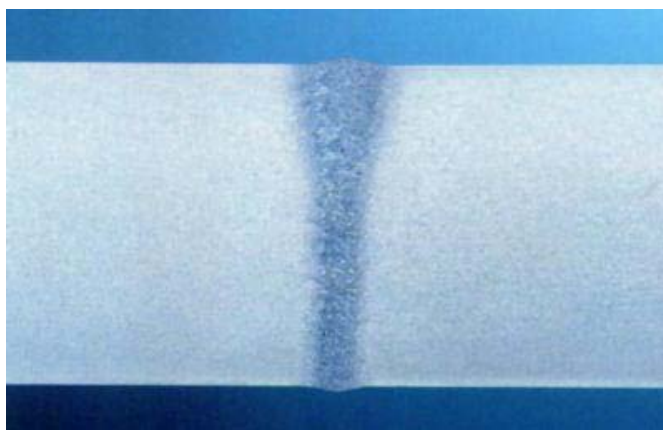


Obr. 11 Kondukční režim svařování vlevo a vpravo penetrační režim svařování [62]

Při laserovém svařování se používá speciální svařovací hlava, ve které jsou čočky pro fokusaci svazku a také trysky pro přívod ochranného plynu, chránící tavnou lázeň proti oxidaci. Jako ochranné plyny se používají dusík, argon, oxid uhličitý a helium. Kolmo na vystupující laserový paprsek je umístěna ještě jedna tryska, tzv. crossjet, která má za úkol

chránit fokusační optiku před odlétávajícími částicemi z tavné lázně. Speciální svařování bez svařovací hlavy se nazývá remote welding, neboli dálkové svařování. Laserový paprsek je fokusován na velkou vzdálenost mezi rozmítací hlavou a svařencem. Pohyb laserového paprsku se děje pomocí pohyblivých zrcadel uložených v rozmítací hlavě. Jedná se o velice dynamický proces, kde rychlost polohování laseru je až 100x rychlejší, než u svařování s laserovou svařovací hlavou. A to má za následek zvýšení produktivity svařování.

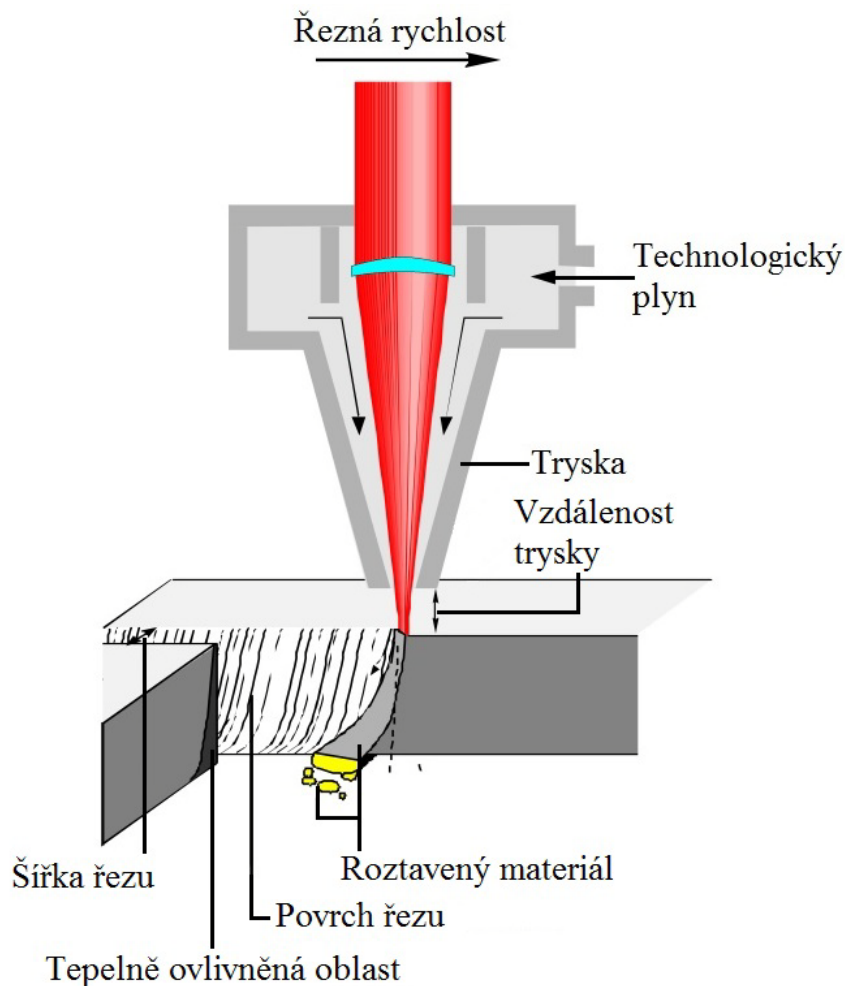
Laserovým svařováním lze svařovat jak konstrukční ocel, nerez, hliník, titan či měď, ale také materiály, které jsou jinými metodami nesvařitelné, jako například kov - plast, nebo kov - keramika. Lze svařovat od tenkých fólií až po několikamilimetrové plechy. U CO₂ laserů však musíme dbát zvýšené pozornosti při svařování mědi nebo hliníku, a to díky vysoké reflexivitě povrchů těchto kovů vůči CO₂ záření, protože by mohlo dojít ke zničení fokusační čočky zpětným odrazem laserového paprsku. Laserové svařování je velice přesné, a proto je velmi důležitá správná příprava sestavení svarového spoje, kde by mezera mezi svařovanými materiály neměla překročit 0,25 mm. V případě nedodržení minimální mezery mohou vzniknout ve svaru vruby. V drtivé většině laserového svařování se svařuje bez přídavného materiálu. V případě, že použijeme přídavný materiál například ve formě drátu přidávaného do svarové lázně, lze tolerovat větší mezery mezi stěnami budoucího svaru. U klasických metod obloukového svařování dochází k velkému ovlivnění materiálu v okolí spoje a tím dochází k jeho degradaci. U svařování laserem se díky užití vysoce intenzivního laserového paprsku fokusovaného do malého bodu a vysoké rychlosti svařování dosáhne mnohem menšího teplotního ovlivnění, což má za následek jemnější strukturu, menší deformace svařence a nižší zbytkové pnutí. Laserovým svařováním vzniká úzký a hluboký svar, znázorněn na Obr. 12. Svar je velice kvalitní, bez trhlin, nečistot, pórů, kvalitní je i vzhled svaru a jeho geometrie je odlišná od svarů, které jsou vytvořeny klasickými metodami svařování. Laser je také vhodný na průvarové svary. Ovládnutím výkonu laseru a regulací svařovací rychlosti lze průběžně kontrolovat průběh svařování i šířku a hloubku svaru. Velkou výhodou laserového svařování je vysoká svařovací rychlost, snadná možnost automatizace, vyšší hloubka průvaru a také skutečnost, že se svařuje bez přídavného materiálu. Obecně se technologie laserového svařování používá tam, kde je potřeba kvalitních svarů a v hromadné a sériové automatizované výrobě, zejména tedy v automobilovém průmyslu.



Obr. 12 Příklad laserového svaru [52]

3.2 ŘEZÁNÍ [28], [61], [70]

Laserové řezání patří mezi nejrozšířenější laserovou technologii. Obecně se při řezání laserem dosahuje velmi malé šířky řezu kolem 0,1 – 1 mm s minimálním teplotně ovlivněným pásmem. Princip laserového řezání je znázorněn na Obr. 13. Laser je schopen dělit materiál s vysokou přesností pohybující se kolem 0,1 mm. Vysoce koncentrovaný laserový svazek umožňuje vysokou produktivitu práce a také vynikající kvalitu řezu. Jednoduchým ovládnutím laseru průmyslovým robotem či manipulátorem lze vyřezat součásti složitěho tvaru jak na ploše, tak i v prostoru. Z ekonomického hlediska je řezání laserem vůči ostatním technologiím dělení materiálu konkurenceschopné, ale velkou nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady.



Obr. 13 Princip řezání laserem [61]

Již od počátku se pro řezání nejvíce používají CO₂ lasery a to zejména v oblasti 2D řezání. Tyto lasery se postupem času neustále zdokonalovaly a spolu s nimi také pohony řezacích strojů, jejich řídicí systémy, a tím se zvyšovala řezná rychlost a konkurenceschopnost vůči jiným metodám řezání. K řezání zejména tenkých plechů se používají pevnolátkové lasery. Jejich výhodou je výrazně kratší vlnová délka výstupního paprsku a tím i vyšší absorpce záření řezaným materiálem. Poslední dobou se však stále více začínají používat vláknové lasery. Srovnání vláknových laserů s CO₂ lasery při řezání tenkých nerezových plechů dosahují vláknové lasery výrazně vyšších řezných rychlostí i při polovičním výkonu laseru, a lze je také s výhodou použít na prostorové 3D řezání připevněním na průmyslového robota.

3.2.1 METODY LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ [24], [28], [61], [65], [68], [70]

Metody laserového řezání lze rozdělit do tří skupin, na řezání sublimační, tavné a oxidační. Jednotlivé metody se od sebe liší jednak různým výkonem laserového paprsku, řeznou rychlostí, kvalitou řezu a použitým řezným plynem. Každá metoda má své výhody, nevýhody a je také vhodná pro jiný druh materiálu.

Při sublimačním řezání je potřeba vysoce intenzivní laserové záření, aby došlo k odpaření materiálu z místa řezu. Zároveň je potřeba kontrolovat tloušťku řezaného materiálu, která by neměla překročit průměr laserového paprsku, jinak by mohlo dojít díky zkondenzovaným plynům k nežádoucímu svaření řezu. Procesním plynem (dusík, argon, helium) se pouze izolují plochy řezu od okolního prostředí, což má za následek, že hrany řezu neoxidují a řez je

kvalitní, hladký a bez otřepů. Tato metoda je vhodná v oblastech, kde jsou požadavky na velmi jemné řezání, jako například řezání stentů v lékařské technice. Příklady materiálů vhodných pro sublimační řezání jsou textilie, tenké fólie vypařující se již při malé energii a netavící se materiály, jako je například dřevo. Pro řezání plechů se tato metoda nepoužívá.

Tavným řezáním lze dělit všechny tavitelné materiály, tato metoda je však vhodná zejména pro řezání nerezi. Vlivem působení laserového paprsku dochází pouze k tavení materiálu, který je následně z řezné spáry vyfukován proudem řezného plynu. Používají se plyny jako argon nebo dusík. Tyto plyny jsou inertní, což znamená, že nereagují s roztaveným kovem v řezu a zároveň také izolují hranu řezu od přístupu vzduchu, což má za následek, že hrany nebudou oxidovat a odpadá tak následné obrábění. Výkonové požadavky u tavného řezání jsou nižší, jak u řezání sublimačního.

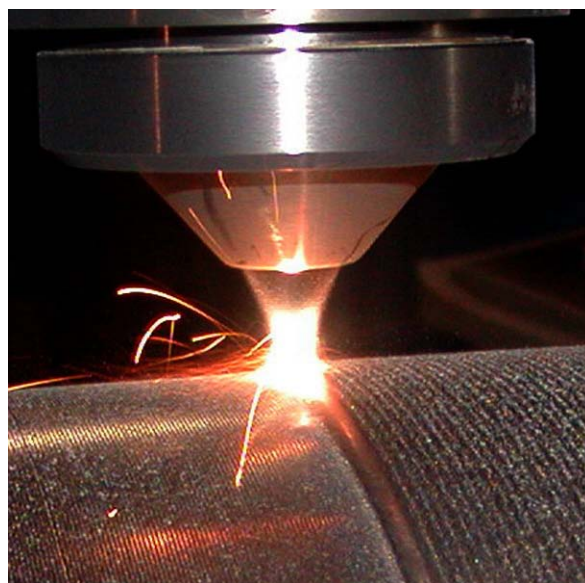


Obr. 14 Kvalita plochy řezu při řezání kyslíkem (spodní díl) a dusíkem (horní díl) [24]

Oxidační laserové řezání se používá nejvíce k řezání běžných a konstrukčních ocelí z důvodu vysoké řezné rychlosti. Jako asistenční plyn se používá kyslík. Vzájemným účinkem roztaveného povrchu s kyslíkem vzniká exotermická reakce, která má za následek další ohřev materiálu. Z toho důvodu lze dosáhnout u konstrukčních ocelí vysokých řezných rychlostí, které jsou až dvakrát vyšší oproti tavnému a sublimačnímu řezání. Na druhou stranu kvalita řezu je horší, řez je širší, drsnější a je více tepelně ovlivněn (Obr. 14). Avšak i přes tyto nevýhody je kvalita řezu pro většinu aplikací bohatě dostačující.

3.3 NAVAŘOVÁNÍ [26], [31], [32], [33], [34]

Princip laserového navařování spočívá v nanášení prášku, který je pomocí podavače dávkován spolu s plynem do osy laserového paprsku (Obr. 15). Laserový paprsek nataví jak prášek, tak i povrch materiálu, kde se prášek nanáší, a tím dojde k difuznímu spojení s minimálním tepelným ovlivněním součásti. Proces navařování lze velice snadno automatizovat, takové robotizované zařízení dokáže na libovolné ploše navařovat jak velké, tak i miniaturní návary. Navařovat lze široké spektrum kovových, keramických a kompozitních materiálů. Navařením prášku z určitého materiálu lze dosáhnout lepších vlastností povrchu, jako je například lepší korozní odolnost, tvrdost, otěruvzdornost a z toho plynoucí delší životnost. Laserové navařování se používá pro opravy a repase



Obr. 15 Princip laserového navařování [31]

strojních součástí, kde došlo k poškození povrchu nebo například na opravy lisovacích a licích forem. Díky opravám poškozených součástí laserovým navařováním se tak ušetří značné náklady, které by se jinak použily na výrobu nových součástí. Navařování lze uplatnit také ve vytváření kovových 3D modelů (Rapid prototyping), kde je možné vystavět daný model postupným skládáním vrstev návarů na sebe.

3.4 ZNAČENÍ [11], [35], [52], [82], [83]

Laserové značení je velice rozšířená technologie nejen v průmyslu, ale také v mnoha dalších oblastech. Tato technologie spočívá v působení laserového paprsku na povrch materiálu s následným odstraněním tenké vrstvy materiálu jeho vypařením nebo změnou barvy povrchu vlivem chemické reakce. Dojde tak k vytvoření nesmazatelného grafického či jiného motivu o vysoké kvalitě, příklady součástí jsou znázorněny na Obr. 16. Výhodami tohoto značení je vysoká rychlost popisu, nízké provozní náklady, bezkontaktní způsob značení, flexibilita, schopnost popisování široké škály materiálů a také odpadající nutnost použití barev, či jinak škodlivých látek. Ke značení se nejčastěji využívají CO₂ lasery, pevnolátkové Nd:YAG lasery a také i vláknové lasery. Výkon těchto laserů se pohybuje v rozmezí 10 – 100 W. Díky větší vlnové délce jsou CO₂ lasery využívány zejména na popis nekovových materiálů jako je dřevo, sklo a plasty. Pro značení kovových materiálů se používá pevnolátkový Nd:YAG laser, jehož záření má kratší vlnovou délku a je lépe absorbováno kovovými materiály. Odpadá tak problém s odrazivostí kovových materiálů, jako u CO₂ laserů. Pohyb laserového paprsku při značení je nejčastěji zprostředkovan pomocí XY plotrového systému nebo galvoskeneru. U plotrového systému je laserová hlava umístěna na kolejnicích, pohybujících se v ose X a Y (létající optika). Tento systém umožňuje popisování materiálu na velké ploše. Systém řízení laserového paprsku pomocí galvoskeneru je založen na pohybu dvou nezávisle řízených zrcadel. Galvoskener na rozdíl od XY plotru dosahuje vyšších rychlostí popisování, ale může popisovat na menší ploše. Další metoda značení laserovým paprskem je popis přes masku. Laserový paprsek osvětí masku, ve které je vyřiznut text popisu, a tím je popis přenesen na součást. Neosvícená místa zakrytá maskou zůstávají nepopsaná. Mezi výhody této metody patří jednoduchost a rychlost popisu. Nevýhody jsou malé popisové pole, horší kvalita a malá flexibilita, kde při změně popisu je nutné vyrobit novou masku. Tato metoda je vhodná na popis velkých sérií.

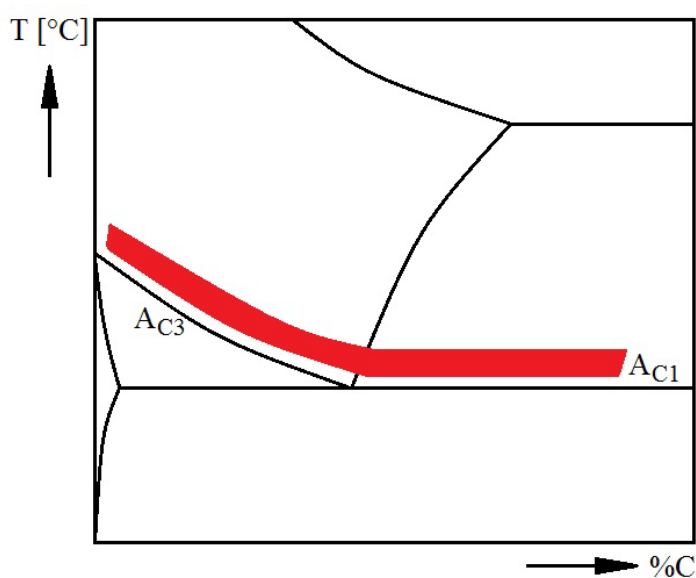


Obr. 16 Příklady laserového značení [82]

Při laserovém popisování se odebírá povrchová vrstva materiálu v tloušťce několika mikrometrů. Změnou parametrů laseru lze přejít na gravírování laserem, což je v podstatě to samé jako popisování, jen se dosahuje větších hloubek až do 1mm. Gravírováním, neboli také laserovým rytím, lze vytvořit do povrchu široké škály materiálů různorodé ornamenty, nápisy a loga, se kterými se lze v největší míře setkat na reklamních předmětech.

4 KALENÍ [20], [22], [71], [76]

Kalení je způsob tepelného zpracování za účelem zvýšení tvrdosti materiálu. Zakalením součásti se zvýší tvrdost, sníží se houževnatost a součást se stává křehčí. Kalí se obvykle namáhané strojní součásti. Princip spočívá v ohřevu materiálu na kalící teplotu, krátké výdrž na této teplotě a následném rychlém ochlazení. Rychlé ochlazení má za následek přeměnu austenitu na martenzit nebo bainit. Kalící teplota se řádově pohybuje 30 – 50°C nad teplotami A_{C1} a A_{C3} , jak je znázorněno na Obr. 17.

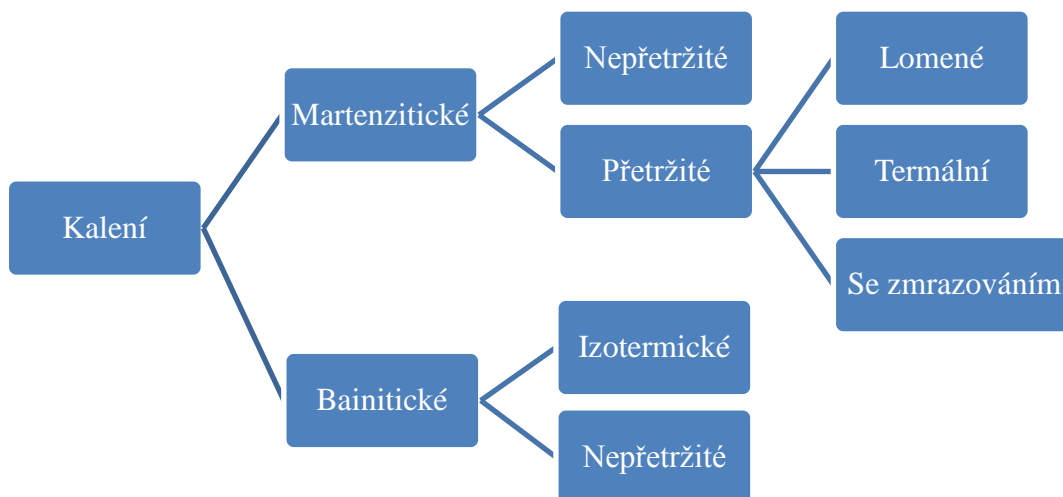


Obr. 17 Oblast kalících teplot [76]

Ochlazování materiálu se děje v kalícím prostředí. Nejčastěji se používá voda, olej, roztavené solné lázně a vzduch. Vhodné kalící prostředí se určuje dle kalitelnosti a prokalitelnosti materiálu. Obecně platí, že čím méně je uhlíku v materiálu, tím větší by měla být ochlazovací rychlost. S rostoucím obsahem uhlíku se rychlost ochlazování zpomaluje. Nejpomalejší rychlost ochlazování je potřeba u vysoce legovaných ocelí, protože legury špatně vedou teplo a při vyšší rychlosti ochlazování by docházelo k praskání oceli. Nejintenzivnější rychlost ochlazování je ve vodě, kde se dosahuje nadkritických rychlostí ochlazování, potřebných pro vznik martenzitu. Při ponoření ohřáté součásti do vody je potřeba s ní neustále pohybovat, aby nedošlo ke vzniku vzduchového polštáře z unikajících par, které by ochlazování zpomalovaly. Ovšem při tak intenzivním ochlazování dochází také k velkému pnutí v materiálu, což může mít za následek praskání kalené součásti. Pomalejší rychlost ochlazování je v oleji. V porovnání s vodou je rychlost ochlazování asi 10x menší. Nejčastěji se používá minerální olej o teplotě 50°C. Ještě menší rychlost ochlazování poskytují roztavené solné lázně. Ty se vyznačují plynulým ochlazováním a také se dosahuje nejmenšího pnutí materiálu. Kalení na vzduchu se využívá u samokalitelných ocelí, jako je například rychlořezná ocel. Vhodnost oceli ke kalení a také dosažitelná tvrdost je dána především obsahem uhlíku. Oceli pod 0,2 % uhlíku se berou jako nekalitelné a oceli s obsahem uhlíku větším jak 0,35 % uhlíku jako dobře kalitelné. Zvýší-li se obsah uhlíku nad 0,4 %, tvrdost kaleného materiálu už moc nestoupá. Prokalitelnost, neboli schopnost materiálu dosáhnout určité tvrdosti v určité hloubce, se zjišťuje Jominyho čelní zkouškou prokalitelnosti. Principem této zkoušky je ochlazování čela válcového zkušební vzorku proudem vody. Vzorek je ohřátý na kalící teplotu. Rychlost ochlazování je tedy největší na čele vzorku a s rostoucí vzdáleností klesá. Po vychladnutí se na vzorku vybrousí po celé délce ploška, na které se změří tvrdost dle Vickerse v různých vzdálenostech od čela. Naměřené hodnoty se posléze vynesou do grafu a vznikne křivka prokalitelnosti. Z důvodu určitých odchylek v chemickém složení daného materiálu se může obsah uhlíku pohybovat v rozmezí 0,1 %. Proto se blízká oblast kolem křivky prokalitelnosti nazývá pás prokalitelnosti. V tomto pásu poté musí ležet každá křivka prokalitelnosti dané oceli.

4.1 DRUHY KALENÍ [9], [20], [22], [76]

Jednotlivé druhy kalení jsou znázorněny na Obr. 18. Základní rozdělení je na kalení martenzitické a kalení bainitické. Cílem martenzitického kalení je vznik martenzitu ve struktuře materiálu. Martenzitická struktura je velice tvrdá, ale na druhou stranu křehká. Tuto nežádoucí křehkost lze částečně omezit různými kalicími postupy martenzitického kalení. Po kalení bainitickém je požadovaná struktura bainit, který není tak tvrdý jako martenzit, ale na rozdíl od něj je velmi houževnatý. Z toho důvodu není potřeba bainiticky kalené oceli, na rozdíl od martenziticky kalených ocelí, následně popouštět za účelem snížení křehkosti.



Obr. 18 Schéma rozdělení kalení [22]

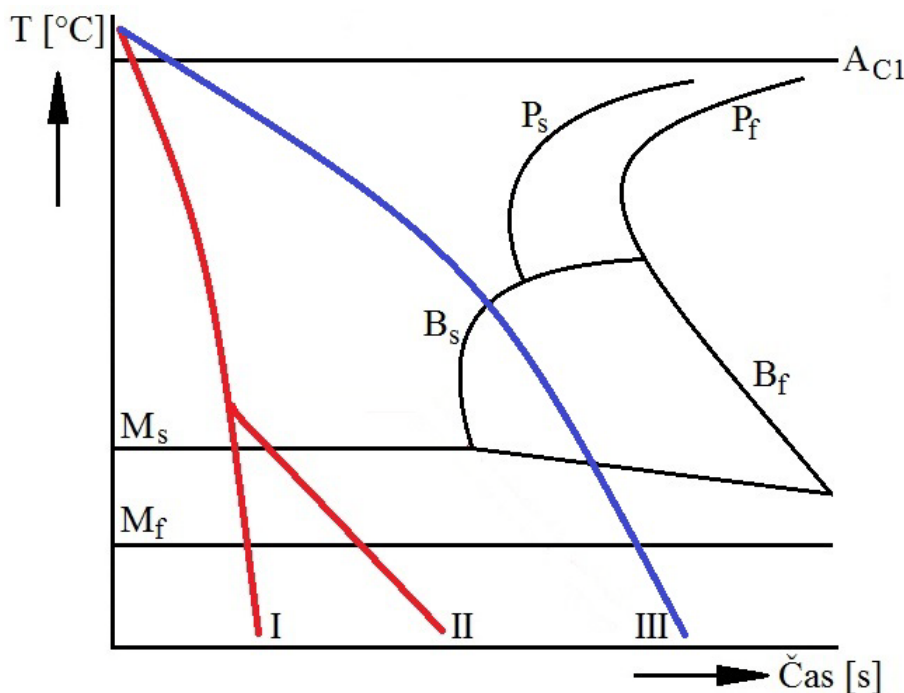
• Martenzitické kalení

Při nepřetržitém, neboli také přímém kalení, se ochlazování z kalicí teploty provádí přímo a nejčastěji do vody. Průběh kalení je znázorněn na Obr. 19 křivka I. Přejít přes teploty martenzit start (M_S) a martenzit finiš (M_F) je velice rychlý a z toho důvodu dochází ve struktuře k velkému vnitřnímu pnutí. Tento nejjednodušší způsob kalení se využívá na jednoduché součásti, na které nejsou kladeny velké požadavky.

Postup při lomeném kalení je zpočátku stejný, jako u kalení přímého. Z kalicí teploty se nejdříve prudce ochlazuje ve vodě, aby nedocházelo ke vzniku perlitu. Při dosažení teploty těsně nad M_S se kalená součást vyjme z vody a vloží se do kalicího prostředí s nižší rychlostí ochlazování, jako je například olej. Průběh kalení je znázorněn na Obr. 19 křivka II. Přejít přes teploty M_S a M_F není tak prudký, což má za následek menší pnutí ve struktuře materiálu. Používá se u předmětů složitějších tvarů, vyžadujících rychlé ochlazení, které ale při přímém způsobu kalení praskají.

Počáteční fáze ochlazování u kalení termálního je opět stejná jako v předchozích případech. Čili po rychlém ochlazení nad teplotu M_S se kalená součást vloží do kalicího prostředí, jehož teplota se udržuje těsně nad touto teplotou počátku tvorby martenzitu. Obvykle to bývá lázeň z roztavených solí. Součást se v lázni ponechá určitou dobu, přičemž dochází k vyrovnání teplot uvnitř a na povrchu součásti. Těsně před okamžikem přeměny austenitu na bainit se součást vyjme ze solné lázně a pomalu se ochladí pod teploty M_F , například na vzduchu. Průběh kalení je znázorněn na Obr. 20 křivka I. Tímto způsobem kalení se ještě více omezí nebezpečí vzniku vnitřních pnutí. Tato metoda je vhodná ke kalení nástrojových ocelí nebo menších a tvarově složitých součástí.

Kalení se zmrazováním se využívá u ocelí, majících teplotu M_f pod 0°C . Při ochlazování kalené součásti v běžném prostředí, jako je voda nebo olej, by nedošlo k ukončení martenzitické přeměny a materiál by nebyl dostatečně zakalen. Z toho důvodu se ochlazování provádí zpočátku ve vodě a poté se zmrazuje v prostředí s velmi nízkou teplotou, například v kapalném dusíku. Tento postup je kalení je poměrně nákladný a používá se u nadutektoidních ocelí, nebo například u nerezavějících ocelí při výrobě kvalitních nožů.

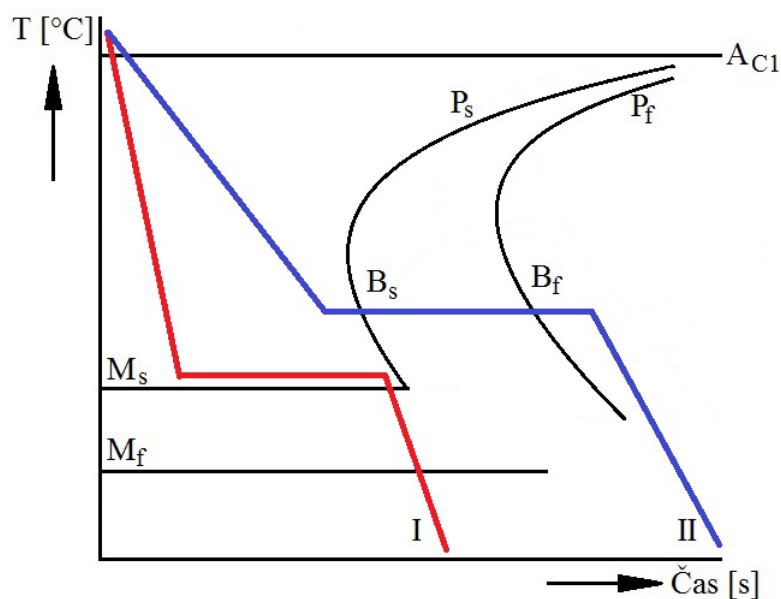


Obr. 19 ARA diagram s vyznačenými průběhy různých druhů kalení [76]

- **Bainitické kalení**

Nepřetržitě bainitické kalení se provádí u ocelí, které mají vlivem legujících prvků předem nastavenou bainitickou oblast (zřetelně oddělenou bainitickou část od části perlitické) v ARA diagramu. Rychlost ochlazování je v porovnání s nepřetržitým martenzitickým kalením menší a na rychlosti ochlazování také záleží výsledná struktura. Lze získat jak čistě bainitickou strukturu, která se poté již nemusí popouštět, nebo směs bainitu a martenzitu, která se následně popouští. Průběh nepřetržitého kalení je znázorněn na Obr. 19 křivka III.

Při izometrickém kalení se materiál dostatečně rychle ochladí v solné lázni na teplotu, při které již nehrozí vznik perlitu ve struktuře materiálu. Na této teplotě se ponechá dostatečně dlouhou dobu, aby se austenit přeměnil na bainit. Předmět se poté vyjme z lázně a pomalu se nechá ochlazovat na vzduchu. Tímto způsobem vznikají v materiálu pouze malá pnutí a součást má velmi dobrou houževnatost. Průběh tohoto kalení je znázorněn na Obr. 20 křivka II. Další možný způsob izometrického kalení je zcela totožný s předchozím, jen s tím rozdílem, že se součást z kalící teploty ochladí až na teplotu těsně pod M_s , což má za následek vznik bainitické struktury s podílem martenzitu. Tato ocel se následně popouští. Obecně jsou pro izometrické kalení vhodné středně prokalitelné oceli, což jsou například oceli nízko a středně legované. Tento způsob kalení se používá na součásti menšího a středního průřezu.



Obr. 20 IRA diagram s vyznačenými průběhy kalení [76]

4.2 POVRCHOVÉ KALENÍ [12], [20], [56], [76]

Povrchové kalení je založeno na velice rychlém zahřátí povrchu součásti na kalící teplotu a následném rychlém ochlazení nejčastěji vodní sprchou. Zakalí se tedy jen povrchová vrstva, kde vznikne tvrdá martenzitická struktura a v jádru zůstane struktura původní. Značné rozdíly ve struktuře mezi povrchem a jádrem však způsobují vnitřní pnutí, které lze snížit okamžitým popuštěním. Oceli vhodné k povrchovému kalení musí být obecně dobře kalitelné a nejčastěji se používají oceli s obsahem uhlíku v rozmezí 0,45 – 0,6 %, které se před kalením ještě obvykle normalizačně žíhají. Povrchově kalit lze také litinu. S povrchovým kalením se lze často setkat u ozubených kol, čepů nebo hřídelí, kde je potřeba tvrdá povrchová vrstva a houževnaté jádro. Existuje několik způsobů povrchového kalení, které se dělí podle typu ohřevu součásti. Nejčastěji se lze setkat s ohřevem pomocí plamene nebo elektroindukce. Moderní, progresivní a zatím ne tak častá metoda ohřevu je pomocí laserového paprsku, která je blíže popsána v následující kapitole 4.3.

Pro ohřev plamenem se nejčastěji využívá kyslíko-acetylenový plamen. Ohřev lze provádět dvěma způsoby. Při prvním způsobu se pohybuje hořák, kalená součást je nehybná a druhý způsob je opačný. Po ohřátí do požadované hloubky se spustí chlazení vodní sprchou, které bývá umístěno ihned za hořákem, nebo je přímo součástí tělesa hořáku. Tím zajistíme okamžité ochlazení a zakalení pouze povrchové vrstvy, jejíž hloubka prokalení dosahuje minimálně 2mm. Indukční ohřev je založen na zahřívání povrchu tělesa pomocí indukovaných proudů o střední a vysoké frekvenci, vytvářených v induktoru. Induktor je vhodně tvarovaná indukční cívka, obvykle pouze s jedním závitem a vyrobená z mědi. Energie indukovaných proudů se mění v teplo, které zahřívá povrch kalené součásti.



Obr. 21 Indukční povrchové kalení [12]

Změnou frekvence lze měnit hloubku prohřáté vrstvy materiálu. Hloubka zakalené vrstvy zde dosahuje minimálně 1mm. Ukázka povrchového kalení pomocí indukce je na Obr. 25.

4.3 POVRCHOVÉ KALENÍ LASEREM [1], [10], [16], [21], [29], [30], [53], [85]

Povrchové kalení laserem (Obr. 22) je jedním z moderních způsobů tepelného zpracování materiálu, vedoucího k zvýšení životnosti zatěžovaného povrchu. Základní princip laserového kalení spočívá v působení laserového paprsku na povrchovou vrstvu kaleného materiálu, ta se rychle ohřeje na určitou teplotu, většinou těsně pod bod tání (900 – 1400°C). Při této zvýšené teplotě dochází ve struktuře materiálu k austenitizaci. Paprsek se plynule pohybuje, zahřívá povrch ve směru posuvu a zahřátá místa se velmi rychle ochladí okolním materiálem. Jedná se tedy o tzv. samokalení, kde není potřeba chladit povrch přiváděnou ochlazovací kapalinou, protože materiál uvnitř zůstal studený a odvod tepla vedením je dostatečný. Z toho lze předpokládat, že přeměna nejprve začíná probíhat uvnitř materiálu a postupuje směrem ven, povrch tedy chladne naposled. Díky vysoké rychlosti ohřevu a rychlému ochlazení vzniknou velmi jemné struktury s drobnými karbidy, krátkými martenzitickými jehlicemi a malou velikostí zrn, přičemž dochází ke zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy, při zachování houževnatosti jádra a nedochází ke tvorbě trhlin. Při klasickém kalení je povrch součásti s nejvyšší teplotou prudce ochlazován chladicí kapalinou a vzniká vysoký teplotní gradient, který má za následek velká tahová pnutí, což je velmi vhodné pro tvorbu povrchových trhlin. Při povrchovém kalení laserem má nejvyšší teplotu také povrch součásti, ale jak již bylo řečeno, odvod tepla začíná odvodem do studené matrice, takže dochází k postupnému vyrovnávání teplot zevnitř, tím pádem jsou pnutí minimalizována a k praskání tedy nedochází. Tepelně ovlivněná oblast je velice úzká a ovlivnění okolního nekaleného materiálu je minimální.



Obr. 22 Ukázka laserového kalení [16]

Velkou roli v transformačním zpevnování ocelí, neboli obecně kalení, hraje uhlík. Lze říci, že existuje prakticky lineární závislost mezi výslednou tvrdostí a množstvím uhlíku, z čehož vyplývá, že čím je více uhlíku v materiálu, tím vyšší bude výsledná tvrdost. To ovšem platí pouze do 0,4 % obsahu uhlíku, poté již tvrdost neroste tak intenzivně. Materiály vhodné k laserovému kalení jsou stejně jako u klasických metod kalení oceli s obsahem uhlíku větším než 0,2 % a také litiny. Nejčastěji se ke kalení ovšem používají oceli s obsahem uhlíku v rozmezí 0,4 – 0,5 %. Dalšími prvky jako je Mn, Cr nebo Mo lze případně podpořit vliv uhlíku. Platí, že tloušťka stěny kalené součásti by měla být alespoň 10x silnější, než kalená

hloubka, aby se zajistilo rychlé odvedení tepla. Ale u drobných dílů, které nespĺňují tyto parametry je možné přichladit součásti proudem vzduchu nebo ochlazením do nádrže s chladícím médiem. Hloubka zakalené vrstvy, pohybující se nejčastěji v rozmezí 0,1 – 1,5 mm, obecně záleží na kaleném materiálu, výkonu a vlnové délce použitého laseru. Ovšem limitujícím faktorem při laserovém kalení je maximální hloubka prokalení, jejíž hodnota se pohybuje kolem 2 mm v závislosti na vodivosti materiálu. Tuto hodnotu prokalení nelze obejít ani výkonnějším laserem a také ani pomalejším pohybem paprsku, ale lze použít hybridní kalení. Hybridní kalení je kombinací laserového paprsku s induktorem. Tato metoda je poslední novinkou v oblasti povrchového kalení a zatím jen velmi málo firem na světě využívá tuto metodu.

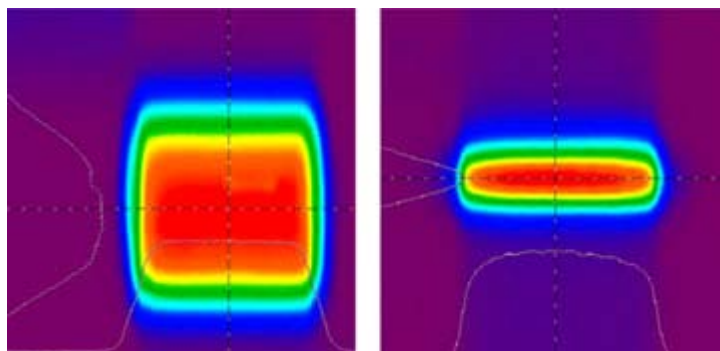
Rychlý ohřev materiálu pomocí laserového paprsku má však příznivé a nepříznivé důsledky. Vyšší rychlosti ohřevu posouvají transformační teploty k vyšším hodnotám, a proto také pro laserové kalení neplatí běžné diagramy tepelného zpracování ocelí a kalící teploty jsou důsledně střeženým know-how jednotlivých firem. U prokalitelnosti platí, že čím větší zrna, tím lze dosáhnout lepší vytvrditelnosti. Zvětšením zrna z 0,02 mm na 0,12 mm dojde



Obr. 23 Příklad zakalené hrany střižného nástroje [21]

ke zlepšení prokalitelnosti asi o 50 %. Struktura však není při rychlém ohřevu dostatečně homogenizována a důsledkem jsou rozkolísané hodnoty tvrdosti. To může způsobit problémy například u masivních odlitků forem či strojních součástí. Rychlost ochlazování je naopak pozitivní pro zachování jemnozrné struktury, obzvláště u vysokouhlíkových a vysoce legovaných materiálů. Z jemných austenitických zrn vznikne jemnozrný martenzit, který je méně náchylný ke vzniku a šíření trhlin. Dalším faktorem, který má dopad na prokalitelnost oceli je výchozí struktura. Pokud má materiál hrubozrnou strukturu, znamená to, že větší karbidy budou potřebovat delší dobu pro rozpuštění. Pokud se nerozpustí, matrice nebude mít dostatek uhlíku a bude se kalit vlastně nízkouhlíková matrice. Například u nástrojových ocelí s primárními karbidy je potřeba volit jiné kalící parametry, než u konstrukčních ocelí s jemně precipitujícími karbidy. Z toho vyplývá, že při kalení musí být rozlišováno, zda se jedná o součást litou, mající pravděpodobně hrubozrnou strukturu, nebo součást tvářenou, mající strukturu jemnozrnou. Dále se musí zohlednit, jaké tepelné zpracování součást prodělala.

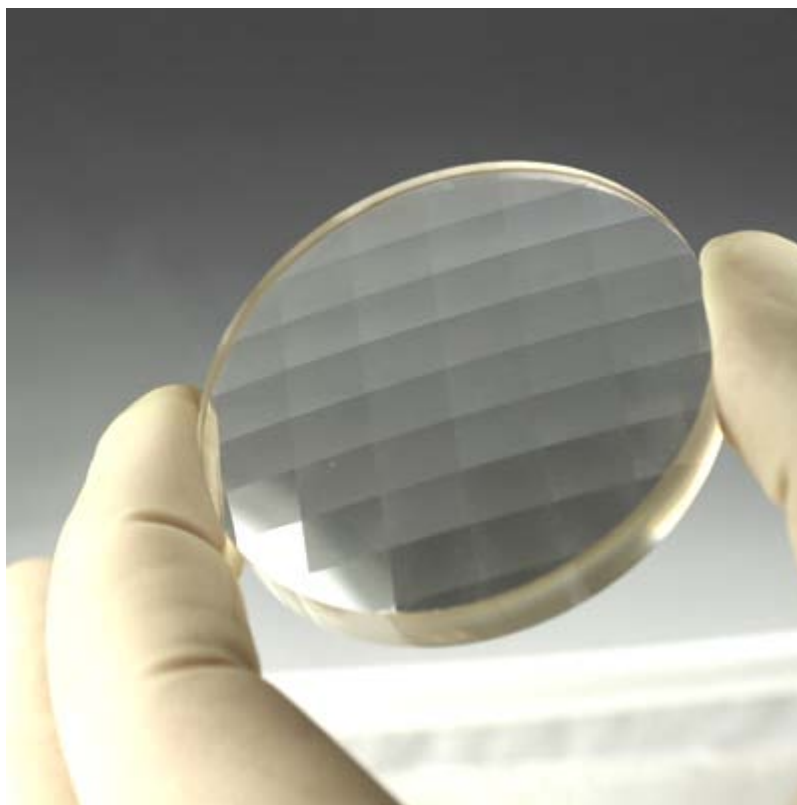
Průběh kalení je průběžně monitorován a řízen pyrometrem, který dokáže měnit výkon paprsku tak, aby byla zachována konstantní teplota kaleného materiálu. Pohyb laserového paprsku po zvolené trajektorii je zajištěn robotem. Tím pádem lze kalit jednoduché i tvarově složité součásti (Obr. 23), jako například formy pro vstřikování plastů nebo lisování plechů. Obecně se lze nejčastěji



Obr. 24 Profil laserového paprsku vhodný ke kalení [10]

s laserovým kalením setkat v automobilovém a strojním průmyslu, nebo v nástrojárnách. Jeho použití je vhodné jak pro velkosériovou, tak pro malosériovou produkci. Velké využití má laserové kalení také v oblasti značně namáhaných strojních součástí. Kalí se ozubení ozubených kol, náběžné hrany turbínových lopatek, lože obráběcích strojů, hřídele, vodící lišty a další celá řada součástí. Součásti povrchově kalené laserem mají ve srovnání se součástmi kalenými objemově delší životnost a také dosahují lepších výsledků při opotřebení.

Výhodou laserového kalení je možnost zakalení pouze těch míst, kde je potřebná zvýšená odolnost, při zachování původních vlastností materiálu ve zbylé části výrobku. Laserové kalení je velice ekologický a čistý proces, protože odpadá nutnost použití kalících lázní a kalících médií, které se používají při kalení v pecích. Další velkou výhodou laserového kalení je snížení nebo úplné odstranění nákladů na dodatečné opracování díky malým deformacím. Při kalení vzniká nepatrná oxidační vrstva, která lze ale velice snadno odstranit, případně se jí lze zcela vyhnout použitím ochranné atmosféry při kalení. Pro laserové kalení lze využít jak CO_2 , tak pevnolátkové lasery, ovšem nejvýhodnější je použití polovodičových laserů. U CO_2 a pevnolátkových laserů je vhodné použít speciální optiku k vytvoření hranatého profilu paprsku, vhodného ke kalení (Obr. 24). Pořízení této speciální optiky (Obr. 25) je však finančně nákladné. Kalit lze i rozostřeným laserovým paprskem, ovšem kalení tímto profilem paprsku je ve srovnání s hranatým profilem paprsku značně neefektivní. Problém s profilem paprsku ovšem odpadá u polovodičového laseru, který se používá nejčastěji pro kalení laserovým paprskem.



Obr. 25 Speciální optika k vytvoření obdélníkového profilu laserového paprsku [1]

5 MĚŘENÍ TVRDOSTI [46], [47], [75]

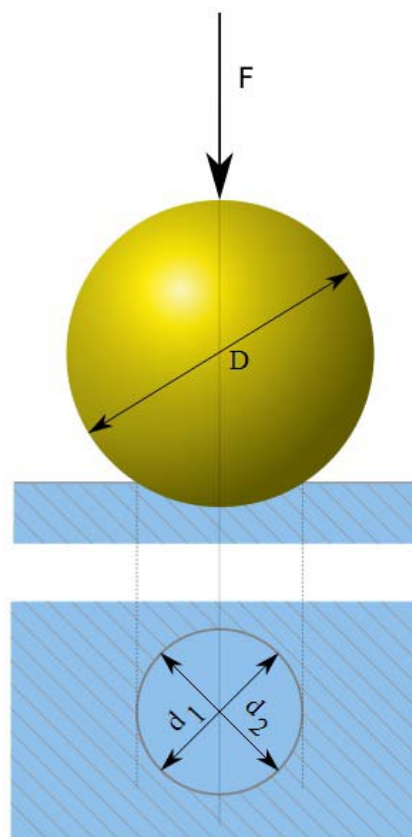
Tvrdość materiálu je obecně definována jako odolnosť materiálu vůči vniknutí cizího tělesa. Na této definici je také založena většina přístrojů určených k měření tvrdosti. Tvrdość u kovových materiálu patří mezi velice důležité hodnoty, lze z ní usoudit i další důležité mechanické hodnoty, jako například pevnost v tahu, či mez kluzu. Tvrdość obecně není základní vlastností materiálu a její hodnotu ovlivňuje celá řada faktorů, jako například pružnosť materiálu, rozměry zkoušeného tělesa, tvar a rychlost vnikání indentoru a nebo teplota. Při měření tvrdosti se lze setkat s pojmy jako mikrotvrdość a makrotvrdość. Tyto druhy tvrdostí se od sebe liší pouze velikostí zatížení při zatlačování indentoru do zkoumaného materiálu. O mikrotvrdości lze hovořit, když je velikost zatížení nižší jak 1 kg. Naopak pokud je zatížení vyšší jak 1 kg, tak se jedná o měření makrotvrdości, obecně též nazývané jako měření tvrdosti. Velikost zatížení se oficiálně uvádí v Newtonech, ale lze se setkat i s jednotkami jako jsou kilogramy, gramy nebo pundy. Tvrdość lze měřit jak na vzorcích, tak přímo na hotových součástích. Při posuzování výsledků musíme ovšem brát v úvahu kvalitu povrchu na měřené součásti, protože kvalita měření je přímo závislá na kvalitě přípravy povrchu. Povrch vzorku pro měření makrotvrdości by měl být vybroušen a pro měření mikrotvrdości vyleštěn.

5.1 METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI [46], [47], [75]

Jednotlivé metody, které se nejčastěji používají na měření tvrdosti, jsou založeny na měření hloubky průniku indentoru do materiálu (Rockwell), nebo na měření velikosti vtisku zanechaném v materiálu (Brinell, Vickers, Knoop). Aby naměřené hodnoty tvrdosti co nejvíce odpovídaly realitě, je třeba důsledně dodržovat správný postup měření, který je uveden v odpovídajících normách pro každou metodu měření tvrdosti.

5.1.1 TVRDOST DLE BRINELLA [64], [75], [77], [79], [81]

Princip zkoušky tvrdosti podle Brinella spočívá ve vtlačování indentoru ve tvaru kuličky o daném průměru do zkušebního materiálu určitou silou a po určitou dobu (Obr. 27). Po odlehčení následuje změření průměru vtisku. Průměr vtlačované kuličky může být 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Průměr kuličky také závisí na tloušťce měřeného materiálu, protože platí, že minimální tloušťka materiálu je osminásobek hloubky vtisku. Pokud by byla tloušťka materiálu menší, projevila by se tvrdost podložky, která by ovlivnila výslednou hodnotu tvrdosti. Standardně je kulička vyrobena z kalené oceli, ovšem pro tvrdší materiály se používá kulička ze slinutého karbidu. Velikost zatěžující síly se určuje dle průměru vtlačované kuličky, také podle druhu měřeného materiálu a pohybuje se v rozmezí 25 N – 30 kN. Doba působení síly je závislá na struktuře materiálu. U slitin železa se tato hodnota pohybuje v rozmezí 10 – 15 s a u nezelezných slitin železa je tato hodnota v rozmezí 10 – 180 s. Přesnosť měření je závislá na správném proměření vtisku. Hodnota průměru vtisku se proto měří dvakrát, kolmo na sebe, a poté se vypočítá aritmetický průměr z těchto hodnot. Nevýhodou tohoto měření je, že pokud není povrch vzorku dostatečně hladce opracován, vtisk není dostatečně zřetelný



Obr. 26 Tvrdość dle Brinella [79]

a souměrný a měření průměru vtisku je tak značně složitě. Správný způsob provedení této zkoušky je uveden v normě ČSN EN ISO 6506-1. Měření se provádí na Brinellově tvrdoměru a použití této metody je vhodné zejména pro měření tvrdosti u měkkých ocelí, šedé litiny, neželezných kovů a jejich slitin. Hodnoty tvrdosti lze vypočítat z rovnice (1) nebo je možné jejich vyhledání v již sestavené praktické tabulce podle průměru vtisku a velikosti zatěžující síly.

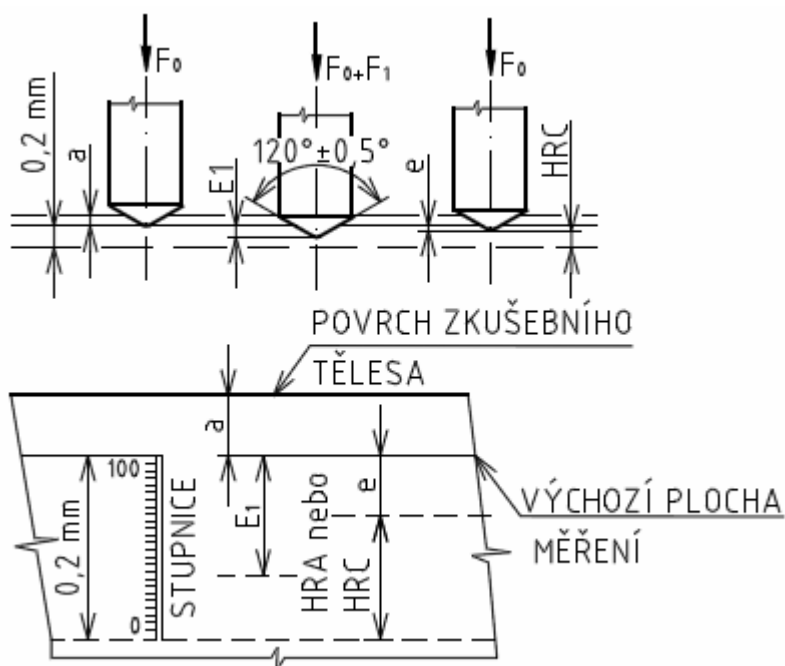
$$HB = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

kde:	F	...	zatěžující síla	[N]
	D	...	průměr vlačovací kuličky	[mm]
	d	...	průměr vtisku	[mm]

Tvrdost dle Brinella se označuje značkou HB. K ní jsou poté připojeny další údaje popisující podmínky při měření v následujícím pořadí. Průměr vlačované kuličky, velikost zatěžující síly a doba zatížení. Tyto jednotlivé údaje jsou od sebe odděleny lomítkem. Například označení 300 HB 5/7500/30 znamená tvrdost 300 HB, průměr vlačované kuličky 5 mm, zatěžující síla 7500 kp (7355 N) a 30 s doba zatížení. Při nejběžnějších podmínkách měření tvrdosti, například 300 HB 10/30000/10, se používá pouze označení 300 HB.

5.1.2 TVRDOST DLE ROCKWELLA [44], [64], [75], [81]

Měření tvrdosti podle Rockwella spočívá v měření rozdílu hloubky vtisku indentoru mezi dvěma stupni zatížení (předběžné a celkové). Indentor může být ve tvaru diamantového kužele s vrcholovým úhlem 120° a poloměrem kulové části 0,2 mm nebo ve tvaru kalené ocelové kuličky o průměru 1/16", což odpovídá zhruba 1,59 mm. Indentor se nejprve předběžně zatíží silou 98 N. Účelem předběžného zatížení je vyrovnání nerovností povrchové plochy. Poté se stupnice indikátoru nastaví do původní polohy. Následuje plynulé zvýšení síly



Obr. 27 Princip měření tvrdosti dle Rockwella [44]

o přídavné zatížení, aby se za 2 až 8 s dosáhlo hodnoty zatížení dané normou (hodnoty jednotlivých zatížení jsou uvedeny v Tab. 2). Poté se zatěžující síla zmenšuje na hodnotu předběžného zatížení 98 N. V tomto stavu lze na číselníku odečíst výslednou hodnotu tvrdosti. Stupnice A, B, C mají rozsah měření 0,2 mm. Dělení stupnice A a C je na 100 dílků a stupnice B je rozdělena na 130 dílků. Postavení stupnice vůči vtisku je orientováno tak, že při maximální hloubce vtisku (0,2 mm) ukazuje stupnice 0 a při minimálním vtisku ukazuje hodnotu tvrdosti 100 (u měření s diamantovým kuželem). Princip měření tvrdosti dle Rockwella je znázorněn na Obr. 28. Správný způsob provedení této zkoušky je uveden v normě ČSN EN ISO 6508-1. Tato zkouška tvrdosti se provádí na Rockwellově tvrdoměru,

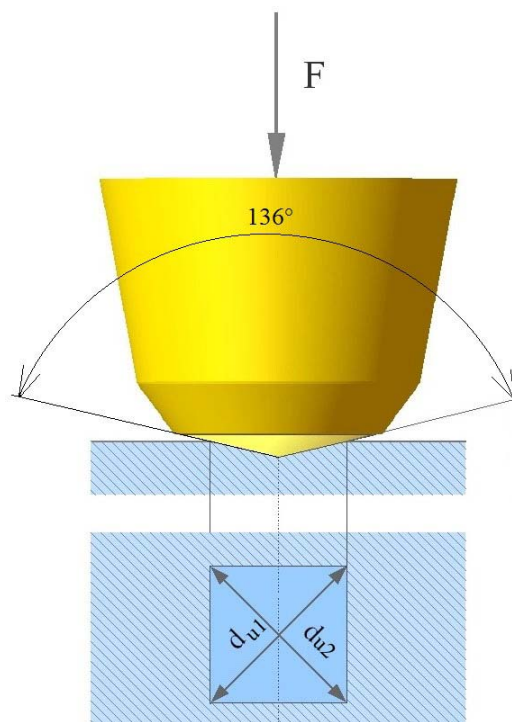
je rychlá, snadná, vpichy jsou malé a metoda je vhodná pro běžnou kontrolu tvrdosti velkých sérií výrobků. Označování tvrdosti dle Rockwella se skládá z naměřené číselné hodnoty, písmen HR a písmenem použité stupnice tvrdosti. Nejčastěji se používá označení tvrdosti dle stupnic HRA, HRB, HRC, kde například 60 HRC znamená tvrdost 60 dle Rockwella, stanovená na stupnici C. Existují však i další stupnice, které se označují například 45 HRN 15, což znamená tvrdost 45 dle Rockwella, celkové zatížení 147,1 N, stupnice N. Volba Rockwellovy stupnice je závislá na předpokládané tvrdosti zkoušeného materiálu. Tvrdost určená dle stupnice HRA je vhodná pro měření tvrdosti křehkých materiálů a tenkých povrchových vrstev. HRB je vhodné použít na měření tvrdosti u měkčích kovů a HRC je vhodná pro tvrdší materiály.

Tab. 2 Hodnoty zatížení pro měření tvrdosti dle Rockwella [64]

Označení	Tvar indentoru	Zatížení [N]		
		Předběžné F_0	Přídavné F_1	Celkové F_0+F_1
HRA	kužel	98	490	588
HRB	kulička	98	883	981
HRC	kužel	98	1373	1471

5.1.3 TVRDOST DLE VICKERSE [44], [64], [80], [81]

Princip měření tvrdosti dle Vickerse je založen na vtlačování indentoru do povrchu měřeného materiálu. Princip měření je znázorněn na Obr. 29. Indentor je ve tvaru čtyřbokého diamantového jehlanu, s vrcholovým úhlem 136° . Tento úhel byl zvolen, aby byl výsledek co nejméně ovlivněn třením a aby se naměřené hodnoty tvrdosti příliš nelišily od hodnot tvrdosti dle Brinella. Po provedení vtisku se změří délky úhlopříček vtisku a jejich aritmetický průměr se poté spolu s velikostí zatěžovací síly dosadí do rovnice (2) a vypočítá se hodnota tvrdosti HV. Správný způsob provedení této zkoušky je uveden v normě ČSN EN ISO 6507-1. Přesnost měření je závislá na drsnosti povrchu měřeného povrchu (nejlépe broušený, či vyleštěný povrch) a na homogenitě materiálu. U hrubé a heterogenní struktury, jako je například šedá litina, může vtisk obsáhnout pouze zrno jedné fáze, v tom případě by se neměřila tvrdost slitiny, ale tvrdost pouze jednotlivé fáze. Proto tato metoda není vhodná pro měření tvrdosti materiálu s hrubou a heterogenní strukturou.



Obr. 28 Měření tvrdosti dle Vickerse [80]

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d_u^2} \quad (2)$$

kde: d_u ... délka úhlopříčky [mm]

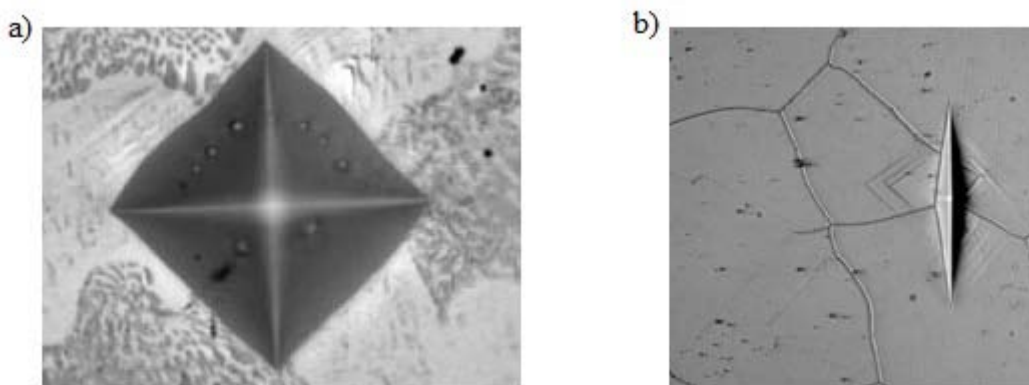
Velikost zatížení indentoru je dána normou a rozmezí hodnot je napsáno v Tab. 3. Měření se provádí na Vickersově tvrdoměru. Výhodou této metody měření je její vysoká přesnost a také velký rozsah měření, kdy lze měřit tvrdost od nejměkčích kovů, až po ty nejtvrďší. Hodnota tvrdosti je na velikosti zatížení takřka nezávislá. Nevýhodou je však nutnost kvalitně opracovaného povrchu. Označování tvrdosti dle Vickerse se značí písmeny HV. Například označení 420 HV znamená tvrdost 420 dle Vickerse, při normálních podmínkách. Jako normální podmínky jsou označovány hodnoty velikosti zatížení 294 N (30 kp) a doba působení zatížení od 10 – 15 s, které se nezapisují. Při odlišných podmínkách zkoušky se za písmeny HV uvádí velikost zatížení v kp a doba zatížení. Například 283 HV 10/30 značí tvrdost 283 dle Vickerse, velikost zatížení 98 N (10 kp) a doba zatížení je 30 s.

Tab. 3 Rozdělení zkoušek dle Vickerse [44]

Oblast zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Označení dle ČSN EN ISO 6507-1
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,098 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

5.1.4 MIKROTVRDOT DLE VICKERSE A KNOOPA [23], [44], [46], [48], [49], [64], [78], [81]

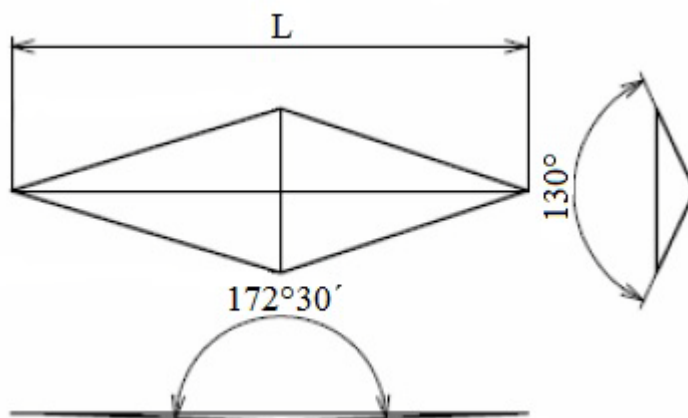
Měření mikrotvrdosti se nijak principiálně neliší od měření makrotvrdosti, pouze se používají malá zatížení, způsobující pouze nepatrné vtisky. Odečítání velikosti vtisků se provádí pod mikroskopem při 200 až 400 násobném zvětšení. Nejčastěji používanými metodami na měření mikrotvrdosti jsou dle Vickerse a dle Knoop (Obr. 29). Správný způsob provedení těchto zkoušek je uveden v normě ČSN EN ISO 4516. Pro měření je potřeba, aby byl povrch zkoušeného vzorku zpracován co možná nejkvalitněji. Mikrotvrdost se používá při měření tvrdosti jednotlivých strukturních složek a fází, pro měření tvrdosti na hranici nebo uvnitř zrna, při hodnocení svarů nebo pro měření tvrdosti u kalených, nitridovaných, křehkých materiálů a tenkých povlaků. Metoda je také vhodná pro malé a tenké součásti.



Obr. 29 Příklady měření mikrotvrdosti a) dle Vickerse b) dle Knoop [48, 49]

Princip měření mikrotvrlosti dle Vickerse je naprosto stejný, jako v případě měření makrotvrlosti, která je popsána v kapitole 5.1.3. Při měření se používají zatížení v závislosti na tloušťce zkoušeného materiálu v rozmezí od 0,098 N (0,001 kp) do 4,905 N (0,5 kp). Dále je také nutné dodržet vzdálenost mezi sousedními vtisky, která musí být větší než dvojnásobek úhlopříčky většího vtisku a vzdálenost od okraje zkoušeného tělesa musí být větší než 1,5 násobek úhlopříčky vtisku. Označování mikrotvrlosti dle Vickerse se obecně značí písmeny HV, dále pak čísla charakterizujícími velikost zatížení v kp a dobou zatížení, pokud je jiná než 10 až 15 s. Například označení 296,7 HV 0,1/30 značí mikrotvrlost dle Vickerse 296,7, zatížení 0,98 N (0,1 kp) a doba zatížení 30 s.

Měření mikrotvrlosti dle Knoopa je založeno na principu vtlačování indentoru do povrchu měřeného materiálu. Indentor je ve tvaru diamantového jehlanu, jehož základnu tvoří protáhlý kosočtverec, jak je znázorněno na Obr. 31. Vtisk je ve tvaru kosočtverce s poměrem úhlopříček 1:7 a měří se delší úhlopříčka. Výhodou tvaru u Knoopova indentoru je, že relativně největší deformace jsou u krátké úhlopříčky a v tomto směru je také největší odpružení po odlehčení. Kdežto ve směru dlouhé úhlopříčky je odpružení zanedbatelné. Hloubka vtisku je v porovnání s Vickersovou metodou asi poloviční, což je výhodné pro měření mikrotvrlosti tenkých povrchových vrstev a křehkých materiálů. Velikost měřené úhlopříčky u Knoopa je třikrát delší než velikost měřené úhlopříčky u Vickerse, čímž se minimalizuje chyba při měření u velmi malých vtisků. Kvalita vtisku je závislá také na kvalitě opracovaného povrchu. Mikrotvrlost se následně stanoví dle rovnice (3). Velikost zatížení indentoru se volí dle normy a je v rozmezí od 0,098 N až po 9,8 N. Doba zatížení je standardně 10 – 15 s. Správné provedení zkoušky dle Knoopa je popsáno v normě ČSN EN ISO 4545. Další výhodou této zkoušky je možnost měření tvrdosti u velmi úzkých součástí, jako jsou například dráty.



Obr. 30 Tvar vtisku u měření mikrotvrlosti dle Knoopa [44]

Měření mikrotvrlosti dle Knoopa je založeno na principu vtlačování indentoru do povrchu měřeného materiálu. Indentor je ve tvaru diamantového jehlanu, jehož základnu tvoří protáhlý kosočtverec, jak je znázorněno na Obr. 31. Vtisk je ve tvaru kosočtverce s poměrem úhlopříček 1:7 a měří se delší úhlopříčka. Výhodou tvaru u Knoopova indentoru je, že relativně největší deformace jsou u krátké úhlopříčky a v tomto směru je také největší odpružení po odlehčení. Kdežto ve směru dlouhé úhlopříčky je odpružení zanedbatelné. Hloubka vtisku je v porovnání s Vickersovou metodou asi poloviční, což je výhodné pro měření mikrotvrlosti tenkých povrchových vrstev a křehkých materiálů. Velikost měřené úhlopříčky u Knoopa je třikrát delší než velikost měřené úhlopříčky u Vickerse, čímž se minimalizuje chyba při měření u velmi malých vtisků. Kvalita vtisku je závislá také na kvalitě opracovaného povrchu. Mikrotvrlost se následně stanoví dle rovnice (3). Velikost zatížení indentoru se volí dle normy a je v rozmezí od 0,098 N až po 9,8 N. Doba zatížení je standardně 10 – 15 s. Správné provedení zkoušky dle Knoopa je popsáno v normě ČSN EN ISO 4545. Další výhodou této zkoušky je možnost měření tvrdosti u velmi úzkých součástí, jako jsou například dráty.

$$HK = \frac{1,451 \cdot F}{L^2} \quad (3)$$

kde: L ... velikost delší úhlopříčky [mm]

Označování mikrotvrlosti dle Knoopa se provádí stejným principem jako u Vickerse. Před písmeny HK se píše naměřená hodnota tvrdosti, za ně se píše velikost zatížení v kp a doba zatížení pokud je jiná než 10 – 15 s. Například 620 HK 0,1/20 značí 620 mikrotvrlost dle Knoopa, velikost zatížení 0,1 kp (0,98 N) a 20 s doba zatížení.

6 PRAKTICKÁ ČÁST

V této části jsou nejprve popsána jednotlivá zařízení, bez kterých by nebylo možné uskutečnění tohoto experimentu. Poté se od počátečních návrhů jednotlivých parametrů kalení a obecném popisu postupu práce při experimentu dostaneme až k samotnému vyhodnocení tohoto experimentu. Hodnoceny budou tři hlediska a to makrostruktura, mikrostruktura a výsledná tvrdost.

6.1 STROJE POUŽITÉ PŘI EXPERIMENTU [8], [17], [18], [19], [25], [40], [54], [74]

K samotnému provedení experimentu bylo zapotřebí použití několika přístrojů. Základní prvek celého experimentu je tvořen vláknovým laserem, kterým se provádělo samotné kalení. Pohyb vláknového laseru byl zprostředkován pomocí průmyslového robota. K následnému vyhodnocení experimentu bylo zapotřebí hned několika přístrojů. Na laboratorní pile se jednotlivé vzorky nadělily. Dále se na mikroskopu nasnímalý snímky makrostruktury, mikrostruktury a na tvrdoměru se změřila tvrdost.

• Vlákňový laser

Jedná se o vláknový Yb-YAG laser od firmy IPG Photonics model YLS 2000 (Obr. 31). Technické parametry laseru jsou uvedeny v Tab. 4. Laser má k dispozici jak svařovací, tak i řezací hlavu. Tyto laserové hlavy jsou spolu s průmyslovým robotem umístěny za ochrannými dveřmi v pracovním prostoru a s laserem jsou spojeny pomocí optického vlákna dopovaného ytterbiem. Toto laserové pracoviště je umístěno na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně.

Tab. 4 Technické parametry [17]

Výkon	2 kW
Vlnová délka	1070 – 1080 nm
Účinnost	>30 %
Režim	Kontinuální, pulzní a kvazipulzní
Rozměry (délka-výška-šířka)	1106-856-806 mm



Obr. 31 Vlákňový Yb-YAG laser [74]

- **Průmyslový robot**

Jedná se o průmyslový robot firmy ABB model IRB 2400 – 10, znázorněný na Obr. 32. Bližší technické parametry jsou uvedeny v Tab. 5. Tento robot patří celosvětově mezi nejoblíbenější průmyslové roboty díky své přesnosti, rychlosti a spolehlivosti. Velmi často se používá při obloukovém svařování, řezání, lepení a manipulaci s materiálem. Technické parametry průmyslového robota jsou uvedeny v Tab. 5. Robot je umístěn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně.

Tab. 5 Technické parametry [18]

Dosah	1,55 m
Nosnost	12 kg
Stupňů volnosti	6
Hmotnost	380 kg
Rozměry (výška-šířka-délka)	1564 – 723 – 600 mm
Přesnost polohy	0,03 mm
Přesnost dráhy	0,11 – 0,15 mm
Napájecí napětí	200 – 600 V, 50/60 Hz



Obr. 32 Průmyslový robot

- **Laboratorní přesná pila**

Jedná se o přístroj firmy MTH model MIKRON 110 (Obr. 33), umožňující precizní oddělení vzorků bez tepelného ovlivnění materiálu díky intenzivnímu chlazení brusného kotouče. Podrobnější údaje jsou uvedeny v Tab. 6. Přístroj je umístěn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně.

Tab. 6 Technické parametry [25]

Rozměry	550-630-500 mm (šířka-délka-výška)
Hmotnost	42 kg bez chladicí kapaliny
Průměr kotouče	150 mm, max. 160 mm
Otáčky	500 – 4000 min ⁻¹ , plynule regulovatelné
Napájení	32/24 V, 435 W
Hlučnost	45dB



Obr. 33 Laboratorní přesná pila [25]

- **Mikroskop**

Jedná se o konfokální laserový řádkovací mikroskop Olympus LEXT 3100 (Obr. 34), jehož technické parametry jsou uvedeny v Tab. 7. Tento moderní mikroskop dokáže zobrazit jak 2D, tak i 3D povrch zkoumaného objektu a vyniká velmi vysokou přesností zobrazování. Využívá se například při kontrole rozměrů u velmi přesných součástí, dokáže změřit drsnost nebo profil povrchu a dále se například využívá pro analýzu struktury povrchu. Mikroskop je umístěn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně.

Tab. 7 Technické parametry [8]

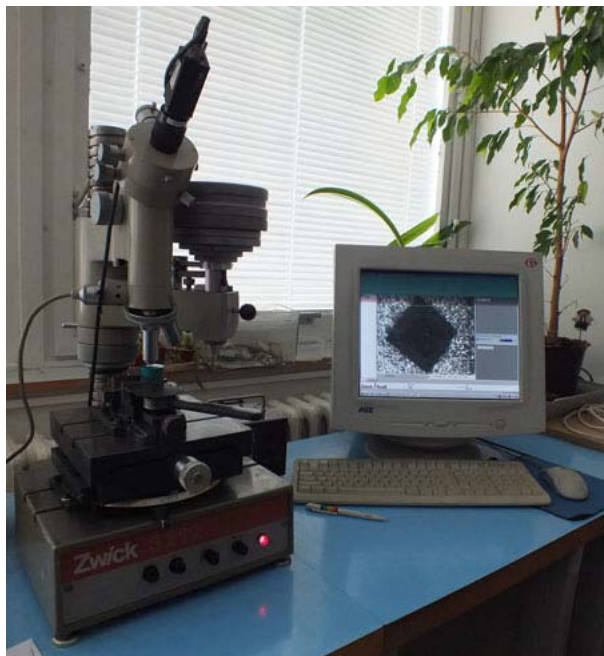
Max. výška vzorku	100 mm
Max. hmotnost vzorku	10 kg
Zvětšení	120x – 14400x
Zorné pole	2560x2560 – 21x21 μm
Rozměry motorizovaného x-y stolku	150x100 mm
Rozměry mikroskopu (délka-šířka-výška)	559 – 464 – 620 mm
Váha	57 kg



Obr. 34 Mikroskop Olympus LEXT 3100 [54]

- **Tvrdoměr**

Jedná se o Vickersův tvrdoměr značky Zwick 3212 (Obr. 35). Tento přístroj je schopen měřit v rozsahu tvrdostí HV0,2 až HV30. Objektiv je opatřen CCD kamerou snímající povrch vzorku a vtisk lze poté zobrazit na monitoru, kde se následně vyhodnocuje v softwaru testXpert. Přístroj je umístěn na Ústavu strojírenské technologie na VUT v Brně.



Obr. 35 Vickersův tvrdoměr Zwick 3212

Další přístroj pro měření tvrdosti je tvrdoměr Rockwell – Rapid – RR – IV. Na tvrdoměru lze měřit tvrdost dle HRB a HRC, čili do materiálu se vtlačuje kulička silou 100 kg nebo diamantový kužel silou 150 kg. Hodnota tvrdosti se odečítá přímo na stupnici umístěné na přístroji. Tvrdoměr je umístěn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně.



Obr. 36 Rockwellův tvrdoměr

6.2 VOLBA MATERIÁLU [45], [55]

Pro experiment byl zvolen materiál 12 050. Jedná se o nelegovanou konstrukční uhlíkovou ocel, která je vhodná na zušlechťování, povrchové kalení a pro velké výkovky. Dále je vhodná pro použití na hřídele těžních strojů, turbokompresorů, na ozubená kola, šneky, ozubené věnce, ojnice, pístnice, plunžry lisů, čepy, šrouby a mnoho dalších součástí. Tato ocel je obtížně svařitelná.

Materiál byl dodán firmou Dendera, kde byl z plechu nadělen pomocí laseru na 5 vzorků o rozměrech 100-15-10 mm (délka-šířka-tloušťka). Dle dodaného atestu (viz Příloha č. 1) byl materiál dodán ve stavu označeném C45+N, což značí, že byl v normalizačně vyžáhaném stavu. Procentuální zastoupení jednotlivých chemických prvků je uvedeno v Tab. 9 a základní mechanické vlastnosti jsou poté uvedeny v Tab. 10.

Tab. 8 Značení oceli [55]

Dle ČSN	Dle EN	Číslo materiálu (W.Nr.)
12 050	C45	1.0503

Tab. 9 Chemické složení

Chemické složení [%]											
C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al
0,482	0,730	0,320	0,012	0,005	0,050	0,020	0,050	0,004	0,004	0,002	0,029

Tab. 10 Mechanické vlastnosti

R_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
396	649	20

6.3 NÁVRH EXPERIMENTU

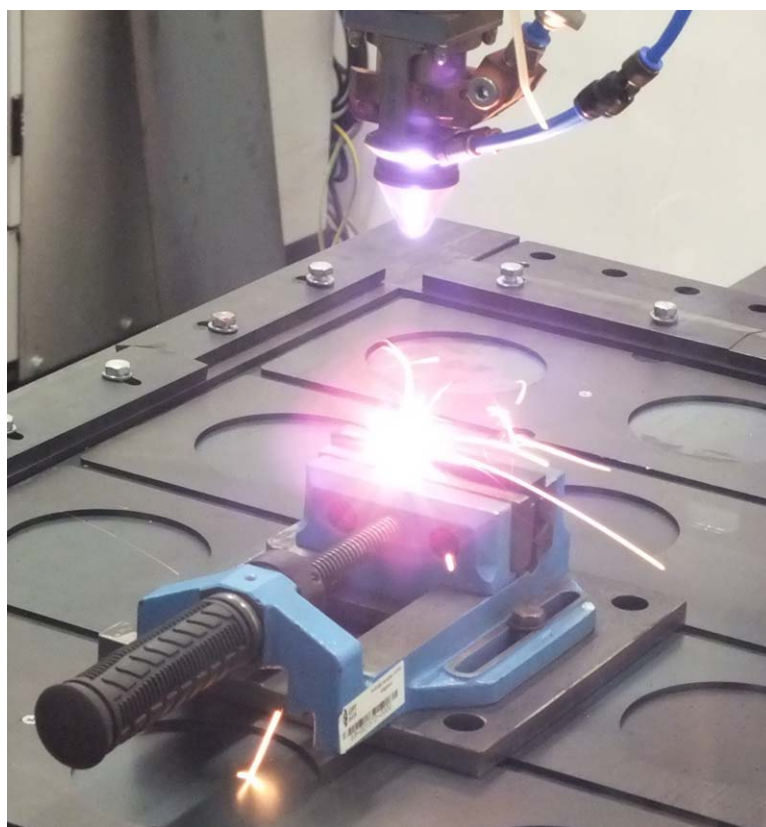
Tento experiment se prováděl zejména proto, aby se zjistilo, jakých výsledků zakalení se dosáhne při použití vláknového Yb:YAG laseru, jehož optika není přímo přizpůsobena právě pro účel kalení. Při experimentu byl laser osazen svařovací optikou, která však fokusuje paprsek do jednoho bodu, což je vhodné právě pro svařování, ale ne pro kalení, kde je potřeba obdélníkový profil svazku zabírající větší plochu. Při svařování se laserová hlava pohybuje přibližně 20 mm nad materiálem, ale v případě oddálení laserové hlavy od materiálu se bude laserový paprsek vlivem rozbíhavosti paprsku nepatrně rozšiřovat a bude působit na materiál větší plochou, čehož se právě využívá při tomto experimentu. Jednotlivé vzdálenosti laserové hlavy od povrchu kaleného materiálu byly proto zvoleny v rozmezí od počáteční vzdálenosti 100 mm, po kroku 20 mm, až do konečné vzdálenosti 260 mm. Rychlost pohybu laserového paprsku byla zvolena pro jednu polovinu vzorků na 10 mm/s a pro druhou polovinu vzorků na 20 mm/s. Výkon laserového paprsku byl zvolen 2 kW, což je maximální hodnota výkonu, kterou daný vláknový Yb:YAG laser dosáhne. Pro následné vyhodnocení zakalených vzorků bylo zvoleno nafocení makrostruktury a mikrostruktury jednotlivých zakalených vzorků na mikroskopu. Pro naměření povrchové tvrdosti byl zvolen Rockwellův tvrdoměr, protože umožňuje měření tvrdosti i u vzorků s nerovným povrchem. Pro měření tvrdosti zakalené vrstvy byl použit Vickersův tvrdoměr, zejména proto, že se jedná o přesnou metodu měření tvrdosti a dále lze na něm měřit široká škála tvrdostí.

Tab. 11 Navrhnuté parametry pro kalení

Číslo vzorku	P - Výkon laseru [kW]	v - Rychlost pohybu laserové hlavy v [mm·s ⁻¹]	h - Vzdálenost laserové hlavy od materiálu [mm]
1	2	10	180
2	2	20	100
3	2	10	200
4	2	20	120
5	2	10	220
6	2	20	140
7	2	10	240
8	2	20	180
9	2	10	260
10	2	20	200

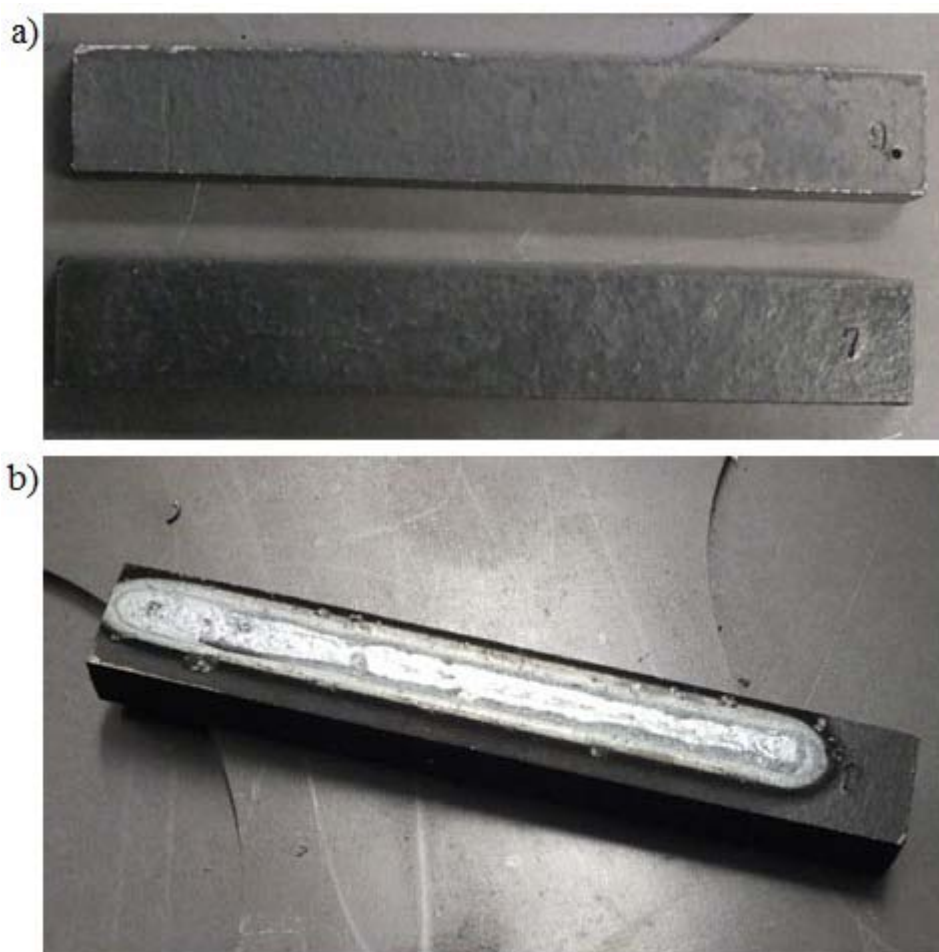
6.4 POSTUP PROVEDENÍ EXPERIMENTU

Před samotným kalením byly nejprve jednotlivé vzorky (Obr. 38) nastříkány černou barvou ve spreji Motip black matt pro lepší absorpci laserového záření. Poté se vzorek upnul do strojního svěráku, nastavily se potřebné parametry laserového kalení, jako je výkon paprsku, rychlost pohybu laserového paprsku, vzdálenost laserové hlavy od kaleného materiálu a provedlo se kalení (Obr. 37). Nejprve se zakalilo všech pět vzorků z jedné strany a po dostatečném vychladnutí i ze strany druhé. Výkon laserového paprsku byl neustále na hodnotě 2 kW a jediné parametry, které se měnily, byly rychlost pohybu laserové hlavy a vzdálenost laserové hlavy od povrchu materiálu.



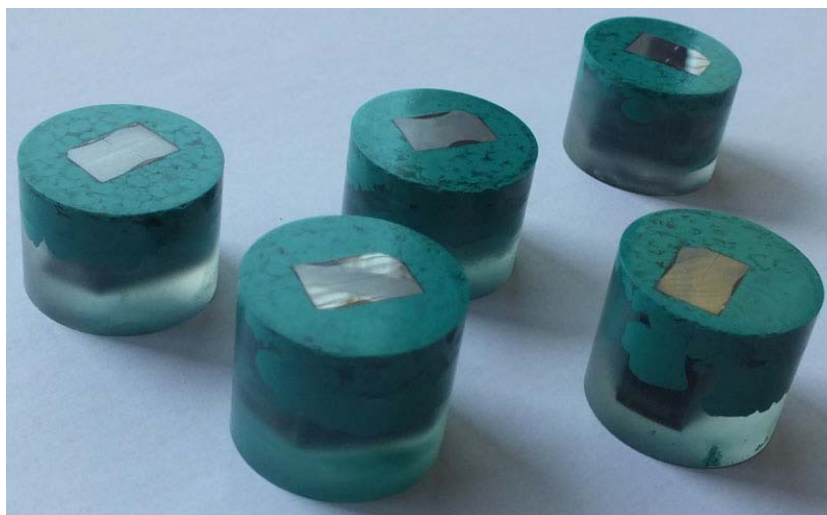
Obr. 37 Průběh laserového kalení

Po zakalení všech vzorků se na Rockwellově tvrdoměru naměřila povrchová tvrdost. Následně byly vzorky nařezány na laboratorní pile. Ta umožňuje dělit vzorky bez tepelného ovlivnění materiálu, díky intenzivnímu chlazení řezného kotouče. Každý nařezaný vzorek (Obr. 39) byl poté zalit do kruhové zalévací formy, pro jejich lepší manipulaci a ustavení na mikroskopu a tvrdoměru. Před samotným vyhodnocením makrostruktury a mikrostruktury na mikroskopu bylo potřeba ještě každý vzorek řádně vybrousit, vyleštit a naleptat. K naleptání jednotlivých vzorků byl použit 5% Nital. Na mikroskopu se nafotily snímky makrostruktur daných vzorků, kde je při 120 násobném zvětšení názorně vidět velikost a tvar zakalené oblasti, hloubka prokalení nebo také u některých vzorků i přetavená oblast. Snímky z mikrostruktury se pořizovaly při 1200 a 2400 násobném zvětšení. Na těchto snímcích bylo možno detailně pozorovat jehlice martenzitu v zakalené oblasti, dále pak zrna feritu a perlitu v základním materiálu, nebo například rychlý přechod martenzitu do základního materiálu.



Obr. 38 Vzorky před (a) a po zakalení (b)

Měření tvrdosti probíhalo na Vickersově tvrdoměru. Jako nejoptimálnější hodnota zatížení indentoru byla zvolena hodnota 98 N, což odpovídá 10 kp (HV10), doba zatížení indentoru při každém vpichu byla 12 s. Přes CCD kameru nainstalovanou v objektivu Vickersova tvrdoměru se obraz promítal na monitor, kde se pomocí softwaru testXpert měřily délky úhlopříček jednotlivých vpichů a z nich se následně automaticky vypočítala hodnota tvrdosti. U všech vzorků se vyhodnocovalo celkem 7 vpichů.

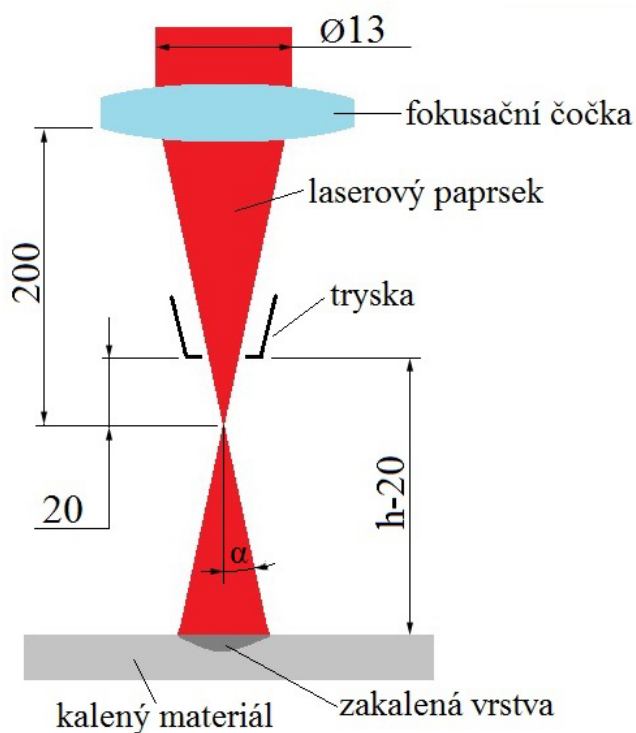


Obr. 39 Zalité vzorky připravené na vyhodnocení na mikroskopu

6.5 VYHODNOCENÍ

Prvním krokem při vyhodnocení bylo nejprve vypočítat teoretické hodnoty vneseného tepla Q a hustotu výkonu laserového paprsku P_H . Pro výpočet těchto hodnot bylo ale nejdříve zapotřebí vypočítat hodnotu úhlu rozbíhavosti paprsku a z něj následně vypočítat průměr laserového paprsku dopadajícího na materiál. Výpočet vycházel z toho, že průměr laserového paprsku vycházejícího z optického vlákna je 13 mm. Po dopadu na fokusační čočku se začne paprsek zužovat. Ohnisko laserového paprsku se nachází v 200 mm vzdálenosti od čočky. Z těchto hodnot se poté dle rovnice (4) vypočítala poloviční hodnota rozbíhavosti laserového paprsku α .

$$\cot \alpha = \frac{13}{200} = 1,861^\circ \rightarrow \alpha = 1^\circ 51' \quad (4)$$



Obr. 40 Rozměry pro výpočty

Pro výpočet průměru laserového paprsku působícího na materiál bylo nutné určit hodnotu vzdálenosti materiálu od ohniska. Jelikož se do řídicího programu průmyslového robota zadávala hodnota vzdálenosti h (od trysky po povrch materiálu) a vzdálenost trysky od ohniska je 20 mm, bylo nutné do výpočtu tuto hodnotu odečíst, jak je znázorněno na Obr. 40. Průměr paprsku d_p se vypočítal dle rovnice (5) a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 12.

$$d_p = 2 \cdot tg\alpha \cdot (h - 20) \quad (5)$$

kde: α ... poloviční úhel rozbíhavosti laserového paprsku [°]
 h ... vzdálenost laserové hlavy od materiálu [mm]

Hustota výkonu laserového paprsku P_H se následně vypočítala dle rovnice (6) a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 12.

$$P_H = \frac{\pi d_p^2}{4 \cdot P} \quad (6)$$

kde: d_p ... průměr laserového paprsku [mm]
 P ... výkon laserového paprsku [kW]

Hodnoty vneseného tepla Q se vypočítaly dle vzorce (7) a jsou uvedeny v Tab. 12.

$$Q = \frac{P_H}{v} \quad (7)$$

kde: P_H ... hustota výkonu laserového paprsku [kW·cm⁻²]
 v ... rychlost pohybu laserové hlavy [mm·s⁻¹]

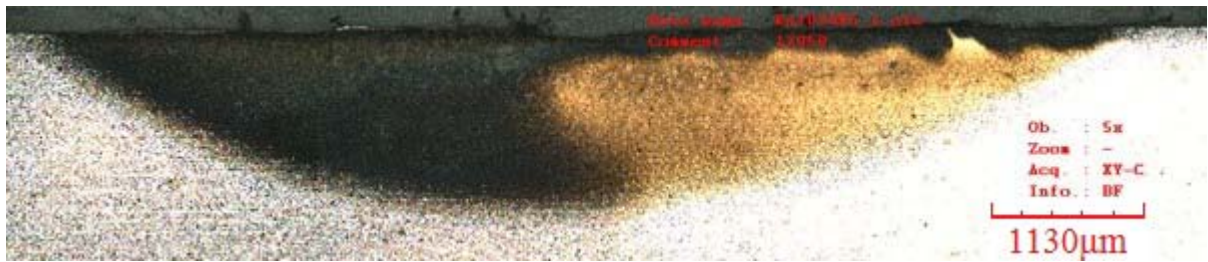
Tab. 12 Vypočítané hodnoty

Číslo vzorku	d_p - Průměr paprsku na povrchu materiálu [mm]	P_H - Hustota výkonu laserového paprsku [kW·cm ⁻²]	Q - Vnesené teplo [kJ·m ⁻¹]
9	15,6	0,956	95,567
7	14,3	0,803	80,303
5	13,0	0,664	66,366
3	11,7	0,538	53,757
10	11,7	0,538	26,878
1	10,4	0,425	42,474
8	10,4	0,425	21,237
6	7,8	0,239	11,946
4	6,5	0,166	8,296
2	5,2	0,106	5,309

Vypočítané hodnoty v Tab. 12 jsou seřazeny podle velikosti průměru paprsku na kaleném materiálu. Z těchto teoretických hodnot vychází, že plocha dopadajícího laserového paprsku je největší u vzorku číslo 9, který byl při kalení nejvíce vzdálen od laserové hlavy. V ideálním případě, kde by laserový paprsek měl pořád stejný výkon, by se z hlediska velikosti zakalené plochy jednalo o nejlepší variantu. Jelikož ale s rostoucí vzdáleností klesá výkon laserového paprsku, lze očekávat, že při vzdálenosti laserové hlavy 260 mm bude výkon laserového paprsku již poměrně nízký a nedojde k potřebnému zakalení. Což se potvrdilo také z naměřených hodnot tvrdosti a hloubky zakalené vrstvy.

6.5.1 MAKROSTRUKTURA

Při vyhodnocení makrostruktury se nejprve zaměříme na snímky z mikroskopu, které jsou znázorněny na Obr. 41 až Obr. 50. Na snímcích, pořízených při 120 násobném zvětšení je názorně viditelná zakalená oblast a u vzorků číslo 2 a 4 je také výrazně vidět oblast, kde došlo k přetavení materiálu. Tvar zakalené oblasti také odpovídá gaussovskému rozložení intenzity energie v laserovém paprsku. Největší intenzita je ve středu paprsku, a proto je i největší hloubka prokalení ve středu zakalené oblasti a směrem do stran se s klesající intenzitou snižuje také hloubka prokalení.



Obr. 41 Vzorek č. 1



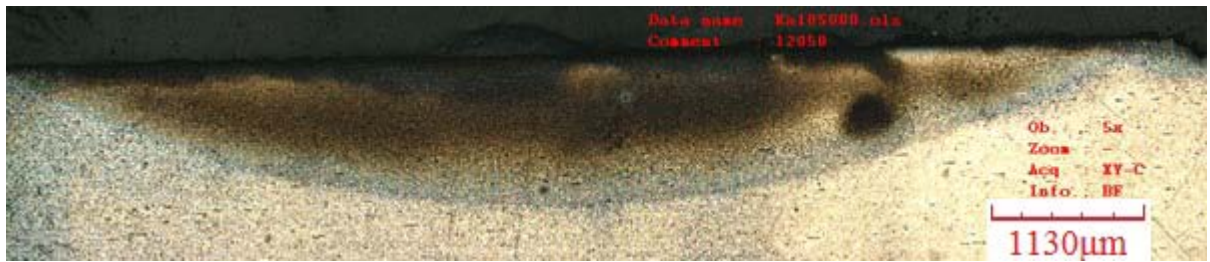
Obr. 42 Vzorek č. 2



Obr. 43 Vzorek č. 3



Obr. 44 Vzorek č. 4



Obr. 45 Vzorek č. 5



Obr. 46 Vzorek č. 6



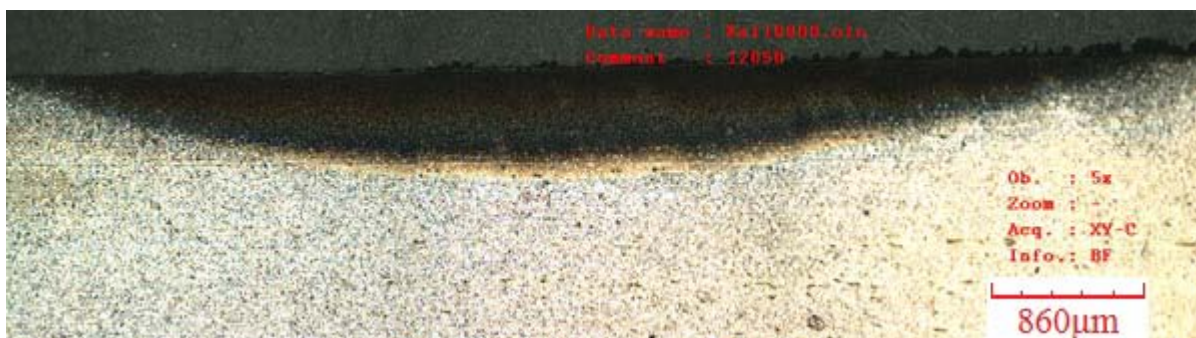
Obr. 47 Vzorek č. 7



Obr. 48 Vzorek č. 8



Obr. 49 Vzorek č. 9



Obr. 50 Vzorek č. 10

Z jednotlivých snímků byly poté určeny hodnoty šířky a hloubky zakalené oblasti, které jsou uvedeny v Tab. 13. Hodnoty jsou seřazeny podle velikosti, od největších hodnot šířky a hloubky, k těm nejmenším. Jelikož z některých snímků bylo obtížné jednoznačně určit hranici zakalené oblasti, tak je nutno tyto hodnoty brát s mírnou rezervou, ale příliš by se tyto hodnoty neměly lišit od skutečných.

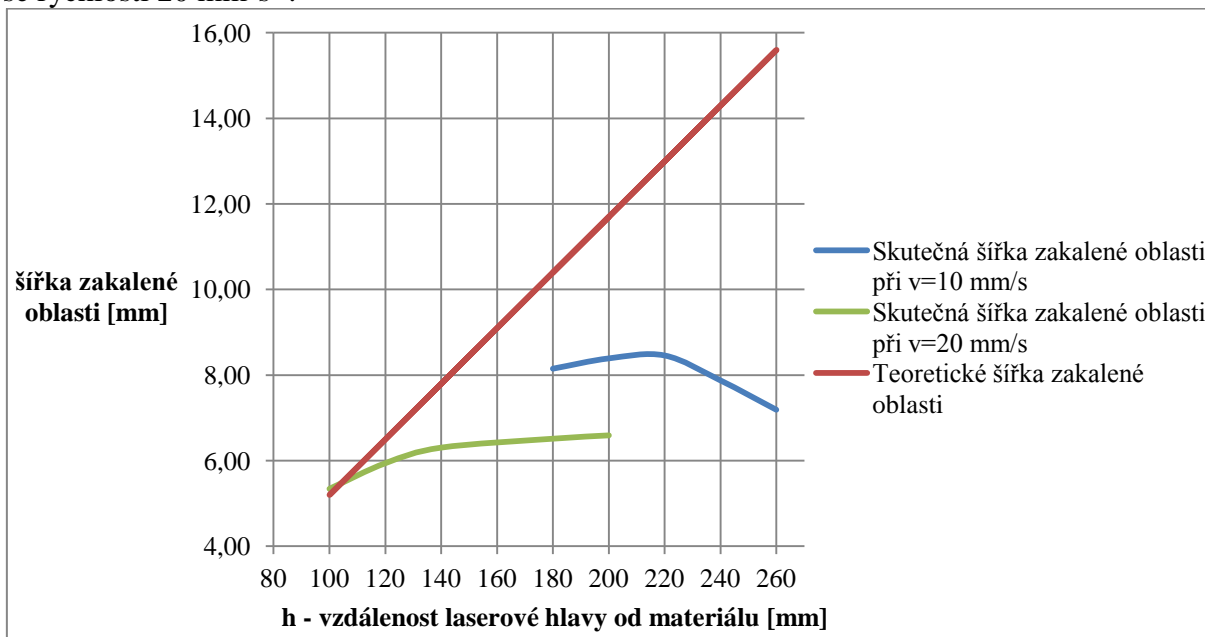
Tab. 13 Hodnoty šířky a hloubky zakalené oblasti

Číslo vzorku [mm]	Šířka zakalené oblasti [mm]	Číslo vzorku [mm]	Hloubka zakalené oblasti [mm]
5	8,46	1	1,27
3	8,39	3	1,2
1	8,15	2	1,17
7	7,88	4	1,12
9	7,19	5	1,1
10	6,59	6	1,04
8	6,52	7	0,75
6	6,31	8	0,7
4	5,94	10	0,55
2	5,34	9	0,38

Pokud porovnáme hodnoty šířky zakalené oblasti s vypočítanými hodnotami průměrů laserových paprsků z Tab. 12 zjistíme, že s rostoucí vzdáleností laserové hlavy se tyto hodnoty čím dál více odlišují, jak je znázorněno v grafu na Obr. 51. Při vzdálenostech laserové hlavy 100 a 120 mm se hodnoty téměř shodují. Ovšem s rostoucí vzdáleností se rozdíl znatelně zvyšuje a při vzdálenosti laserové hlavy 260 mm činí rozdíl již 8,5 mm. Důvodem, proč k tomuto jevu dochází je, že s rostoucí vzdáleností klesá energie laserového paprsku. Při vzdálenosti laserové hlavy 260 mm a gaussovském profilu laserového paprsku má jen malá střední část laserového paprsku ještě dostatečnou energii pro dostatečné zahřátí materiálu.

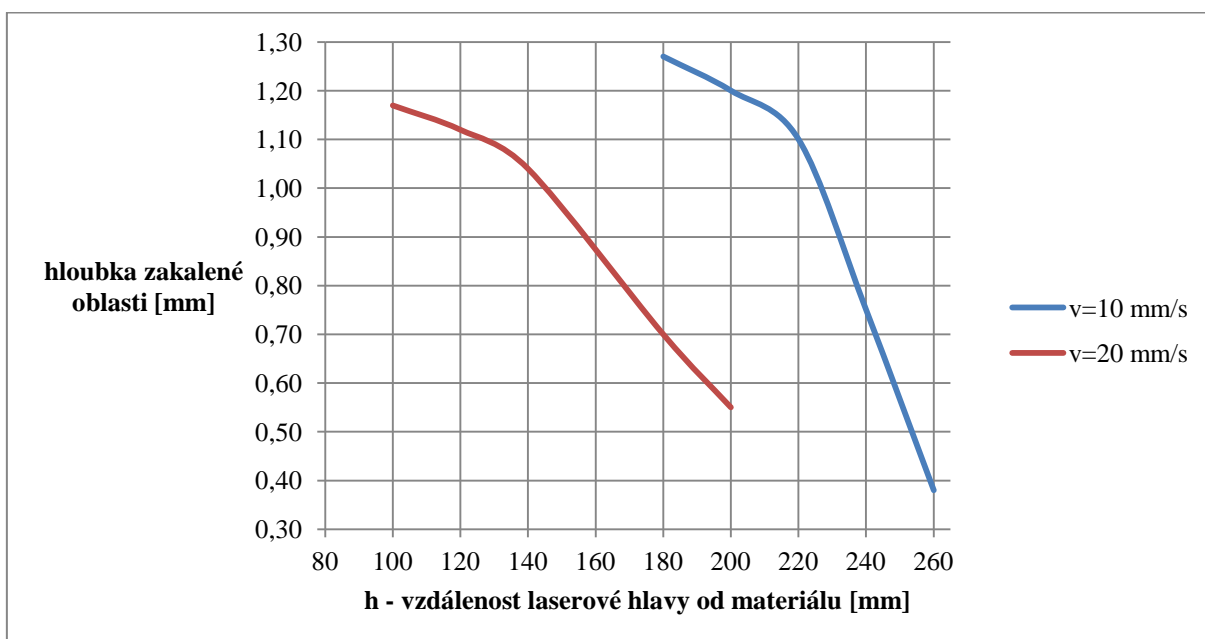
Šířka zakalené oblasti vycházela značně lépe u vzorků, které byly kaleny laserovou hlavou pohybující se rychlostí $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ jak je znázorněno na Obr. 51. Protože při nižší rychlosti pohybu laserové hlavy stihl materiál absorbovat více energie z laserového paprsku. Konkrétně největší šířka zakalené oblasti byla u vzorku 5, kdy dosahovala téměř 8,5 mm, při vzdálenosti laserové hlavy 220 mm. Hodnota 220 mm je dle výsledků hraniční hodnota, kdy se bude dosahovat největší šířky zakalené oblasti při rychlosti laserové hlavy $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro rychlost $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ nelze z naměřených výsledků určit při jaké hodnotě vzdálenosti laserové hlavy bude docházet k největší šířce zakalené oblasti, ale lze předpokládat, že ta hodnota může být

také někde poblíž hodnoty 220 mm. Nejmenší šířka zakalené oblasti byla u vzorku 2. V tomto případě byla laserová hlava v nejbližší vzdálenosti ze všech vzorků a to 100 mm a pohybovala se rychlostí $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 51 Graf závislosti vzdálenosti laserové hlavy na šířce zakalené oblasti

Na Obr. 52 je znázorněn graf závislosti vzdálenosti laserové hlavy na hloubce zakalené oblasti. Jedna křivka znázorňuje průběh hloubky prokalení pro rychlost pohybu laserové hlavy 10 mm/s a druhá pro 20 mm/s . U obou křivek je názorně vidět, že s rostoucí vzdáleností laserové hlavy se dle předpokladů hloubka zakalené oblasti snižuje. Největší hloubky zakalení se dosáhlo u vzorku číslo 1 při vzdálenosti laserové hlavy 180 mm a rychlosti pohybu laserové hlavy 10 mm/s . Pokud však porovnáme vzorky 1 a 8 nebo 3 a 10, které byly kaleny ze stejné vzdálenosti laserové hlavy 180 mm , respektive 200 mm a lišila se pouze rychlost pohybu laserové hlavy, tak u rychlosti pohybu 10 mm/s bylo dosaženo u vzorku 1 o $0,57 \text{ mm}$ větší hloubky prokalení a u vzorku 3 o $0,65 \text{ mm}$ větší hloubky prokalení. Čili z tohoto pohledu lze jednoznačně říci, že při shodné vzdálenosti laserové hlavy bude při rychlosti 10 mm/s dosažena větší hloubka prokalení.



Obr. 52 Graf závislosti vzdálenosti laserové hlavy na hloubce zakalené oblasti

Na Obr. 53 a Obr. 54 lze u jednotlivých vzorků pozorovat povrchovou vrstvu po zakalení laserovým paprskem. Z obrázků je patrné, že u některých vzorků došlo v povrchové vrstvě díky vysoké energii laserového paprsku k přetavení materiálu. Nejvíce viditelná přetavená oblast byla u vzorků 1, 2, 4, 6 a částečně viditelná oblast přetavení je i u vzorku 3. Podle výsledků naměřených hodnot tvrdosti (tvrdost je blíže rozebrána v kapitole 6.5.3), nelze s jistotou určit, zda má přetavená oblast na výslednou tvrdost nějaký zásadní vliv. Na druhou stranu má zásadní vliv na drsnost povrchu. U těchto vzorků, kde došlo k přetavení, by musela následovat úprava povrchu broušením. Odebraná vrstva by musela být také co nejmenší, aby se ještě zachovala tvrdost zakalené vrstvy, která je nejvyšší právě na povrchu a poté rychle klesá. U vzorků 5, 7, 8, 9 a 10, u kterých nedošlo k přetavení, což je ta vhodnější varianta, již nebude třeba žádných úprav povrchu jako u vzorků s přetavenou oblastí. Pokud se ale podíváme blíže na další naměřené výsledky u těchto vzorků, tak dojdeme k závěru, že tyto vzorky kromě vzorku 5 dosahují nízkých hodnot hloubky prokalení a u vzorků 9 a 7 také poměrně nízkých hodnot tvrdosti zakalené vrstvy.



Obr. 53 Zakalené vzorky

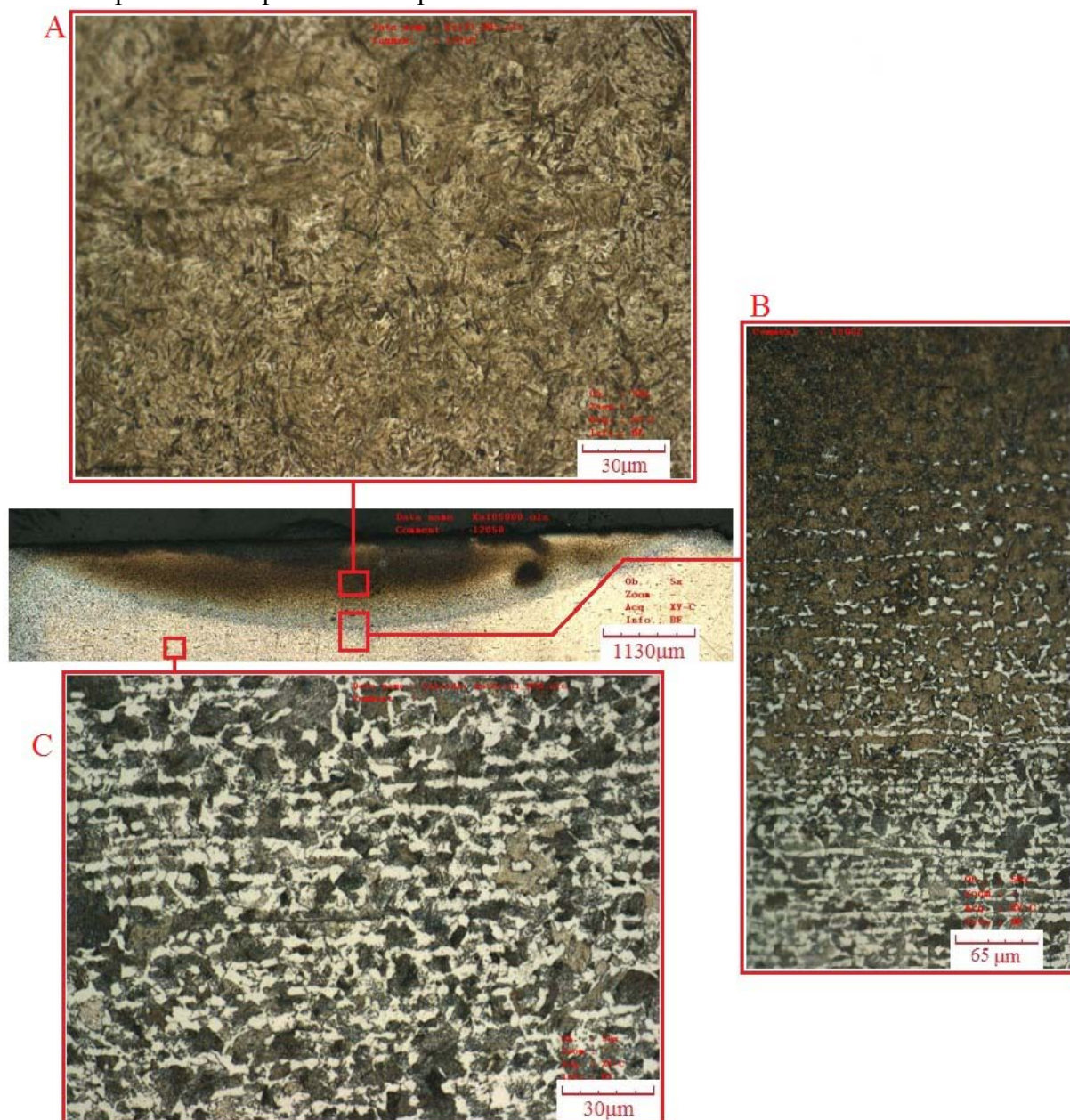


Obr. 54 Zakalené vzorky

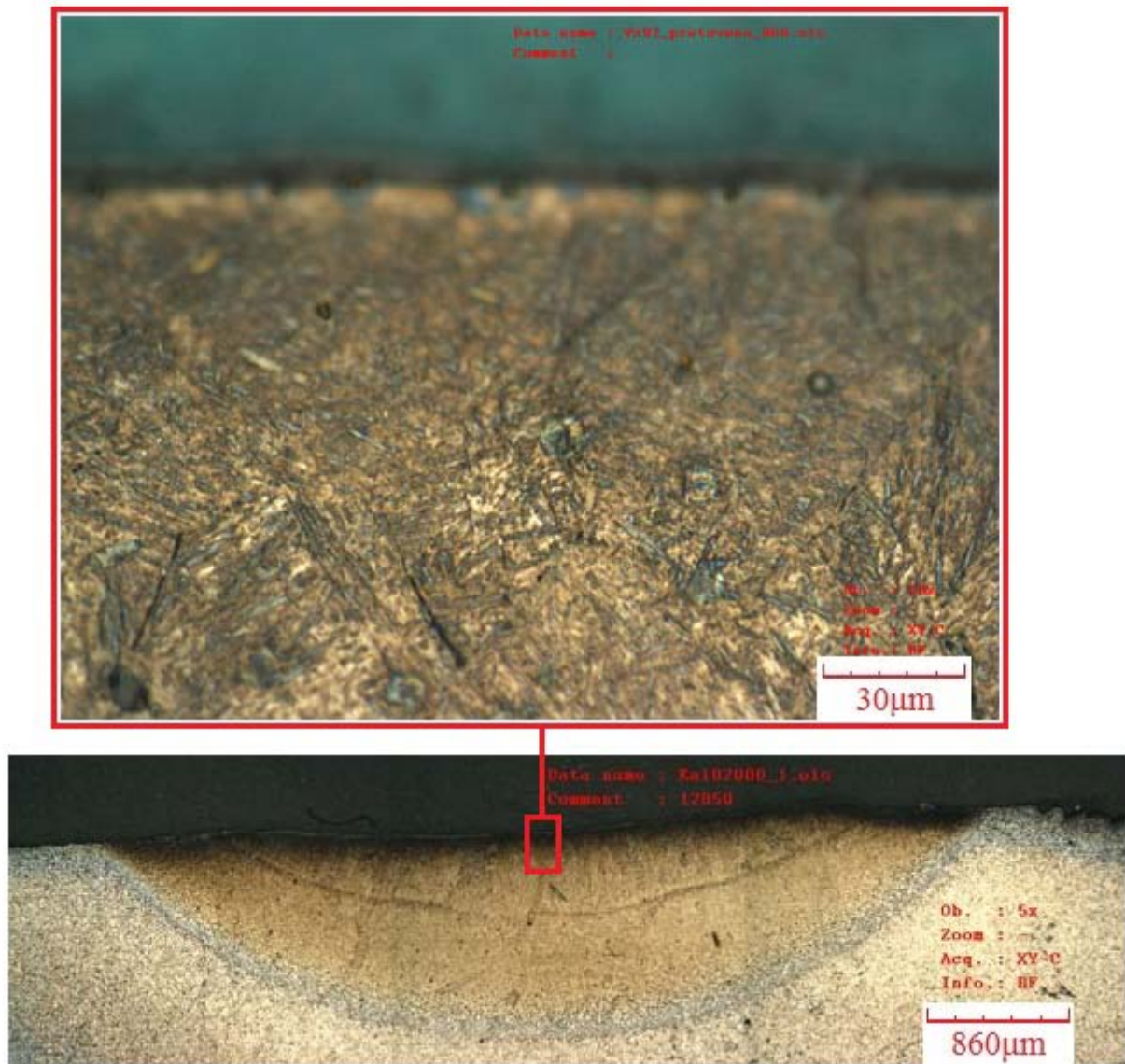
6.5.2 MIKROSTRUKTURA

Snímky mikrostruktury byly pořízeny na mikroskopu při mnohonásobném zvětšení (1200x nebo 2400x). U jednotlivých vzorků byla zkoumána hlavně struktura materiálu v zakalené a přechodové oblasti a také v přetavené oblasti, která se však vyskytovala pouze na některých vzorcích.

Na Obr. 55 jsou znázorněny jednotlivé struktury základního materiálu, přechodové oblasti a zakalené oblasti u vzorku 5, tedy vzorku bez přetavené oblasti. Na snímku C je znázorněna feriticko perlitická struktura základního materiálu. Jednotlivá zrna jsou od sebe snadno rozeznatelná. Světlá zrna jsou zrna feritická a tmavá zrna jsou zrna perlitická. Na snímku A lze poté vidět zakalenou strukturu, která je na první pohled již velmi odlišná od základního materiálu. Jedná se o martenzitickou strukturu, která je charakteristická jemnými jehlicemi martenzitu. Na snímku B je poté znázorněn rychlý přechod mezi zakalenou oblastí obsahující martenzitickou strukturu a základním materiálem. V horní polovině snímku lze také pozorovat ještě zrna feritu, která se nestihla při rychlém ohřevu dostatečně rozpustit na austenit a posléze také při ochlazení přeměnit na martenzit.



Obr. 55 Mikrosnímky jednotlivých struktur u vzorku 5



Obr. 56 Mikrostruktura přetavené oblasti u vzorku 2

Na Obr. 56 je znázorněna struktura přetavené oblasti u vzorku 2. Právě u tohoto vzorku byla přetavená oblast nejvíce viditelná. Dle snímku se vzniklá struktura v přetavené oblasti nijak zásadně neliší od martenzitické struktury v zakalené oblasti, pouze má hrubší strukturu a tím pádem by se dalo předpokládat, že by mohla mít nižší hodnotu tvrdosti. Ovšem při měření tvrdosti se u žádného ze vzorků nepodařilo trefit vtláčovací indentorem do přetavené oblasti, z důvodu velmi malých rozměrů přetavené oblasti, která nedosahovala hodnot ani 0,5 mm, což byla hodnota vzdálenosti prvního vpichu. Pouze u vzorků 2 a 4 se podařilo umístit první vpich jen na rozhraní přetavené a zakalené oblasti. U vzorku 2 se naměřila hodnota tvrdosti 680 HV a u vzorku 4 poté hodnota tvrdosti 752 HV. Čili vytvořit jednoznačný závěr, zdali přetavená oblast ovlivňuje hodnotu tvrdosti z těchto hodnot není možné.

U ostatních vzorků, ať s přetavenou oblastí, či bez přetavené oblasti, byla struktura vždy velmi obdobná, a proto jsou zde uvedeny pouze příklady struktur u vzorků s přetavenou oblastí a bez přetavené oblasti.

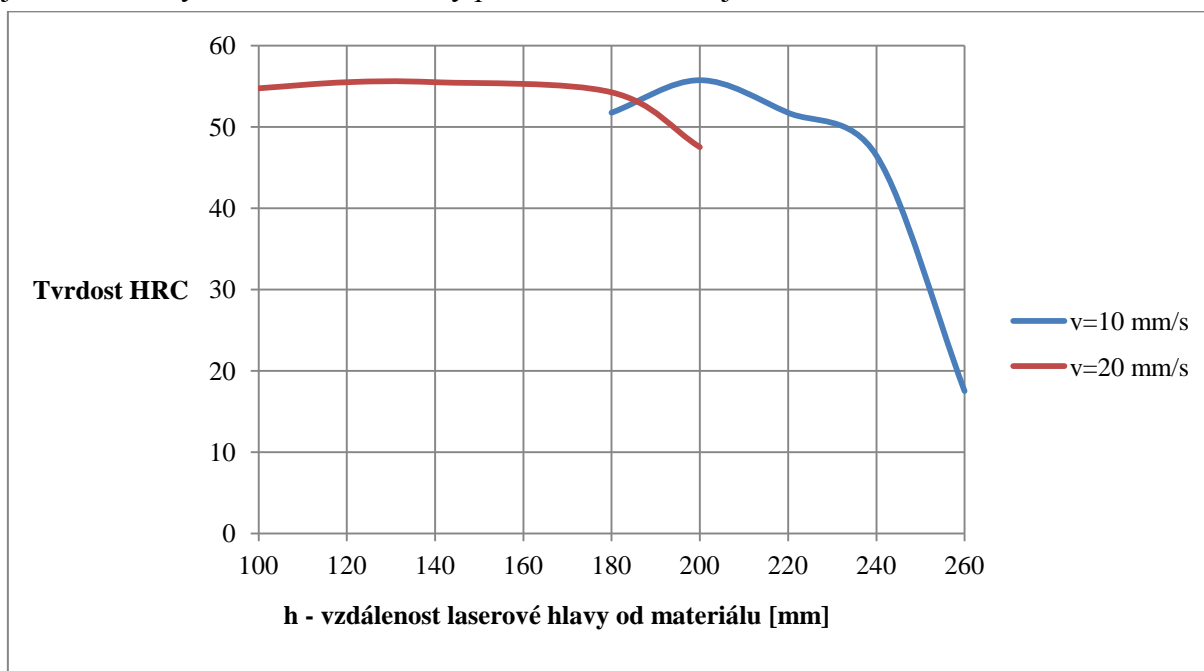
6.5.3 TVRDOST

Po zakalení všech vzorků následovalo naměření tvrdosti povrchové vrstvy na Rockwellově tvrdoměru. Prováděly se 2 vtisky orientované přibližně v 1/3 (HRC_1) a 2/3 (HRC_2) délky zakalené oblasti. Do materiálu byl vtlačován diamantový kužel silou 150 kg a hodnota tvrdosti se měřila na stupnici C. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 14. Z naměřených hodnot u každého vzorku se vypočítala průměrná hodnota, ze které byl následně vytvořen graf (Obr. 57).

Tab. 14 Naměřené hodnoty povrchové tvrdosti

Vzorek číslo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HRC_1	50,5	56,5	56,5	55	55,5	57	43	56	17	44
HRC_2	53	53	55	56	48	54	50	52,5	18	51
Průměr	51,75	54,75	55,75	55,5	51,75	55,5	46,5	54,25	17,5	47,5

Při posuzování hodnot povrchové tvrdosti u jednotlivých vzorků je nutné brát ohled na to, že povrch vzorků po zakalení nebyl nijak očištěn a u některých vzorků se měřilo v značně nerovné natavené oblasti. Při měření se tak někdy dosahovalo hodnot velmi odlišných. Proto je nutné brát tyto naměřené hodnoty povrchové tvrdosti jako orientační.



Obr. 57 Závislost povrchové tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy

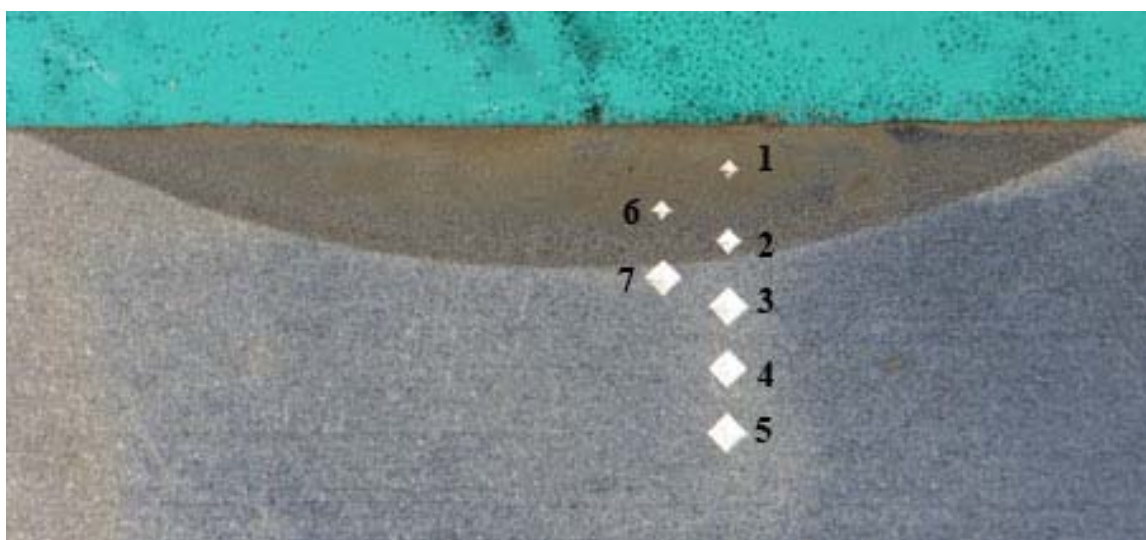
Z grafu na Obr. 57 je patrné, že hodnota tvrdosti zakalené povrchové vrstvy se pohybuje kolem 55 HRC. Snížené hodnoty tvrdosti se objevily u vzorku 10, 7 a 9. U vzorku 10, kde se laserová hlava pohybovala rychlostí 20 mm/s ve vzdálenosti 200 mm, se naměřilo 47,5 HRC a u vzorků 7 a 9, kde se laserová hlava pohybovala rychlostí 10 mm/s ve vzdálenosti 240 mm a 260 mm, se naměřilo 46,5 HRC respektive 17,5 HRC. U těchto vzorků se dá očekávat již snížená hodnota tvrdosti, kvůli poměrně značné vzdálenosti laserové hlavy. Ovšem hodnota tvrdosti u vzorku 9 je velmi nízká, což při absenci natavené vrstvy je zřejmě způsobeno nepřesným měřením. Dále lze z grafu vyčíst, že při rychlosti laserové hlavy 20 mm/s se hodnoty tvrdosti pohybují kolem 55 HRC a až při hodnotě vzdálenosti laserové hlavy 200 mm začíná tvrdost klesat. Na rozdíl od hodnot tvrdosti při rychlosti laserové hlavy 20 mm/s jsou hodnoty naměřené při poloviční rychlosti značně rozkolísané a nejsou tak konstantní. Nejvyšší tvrdosti při této rychlosti se dosáhlo u vzorku 3 (200 mm), čemuž by odpovídaly i další naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse.

Před samotným vyhodnocováním hodnot tvrdosti dle Vickerse u zakalených vzorků by bylo vhodné nejprve zdůraznit, že u naměřených hodnot tvrdosti se musí počítat s poměrně velkou odchylkou v přesnosti měření pohybující se v rozmezí ± 10 až 20 HV. Přesnost měření tvrdosti je závislá na mnoha faktorech. Jedním z nich je například správné zaostření mikroskopu. Dále pak musí být vzorky důkladně vyleštěny, abychom byli schopni co nejpřesněji určit velikost vpichu na monitoru. I minimální změna velikosti vpichu znamenala změnu tvrdosti o 10 HV. Proto se mohou zdát některé naměřené hodnoty trochu přehnané, ale to může být také zapříčiněno i tím, že vtačovací indentor mohl narazit na nějakou tvrdší částici ve struktuře materiálu.

Tab. 15 Naměřené hodnoty tvrdosti

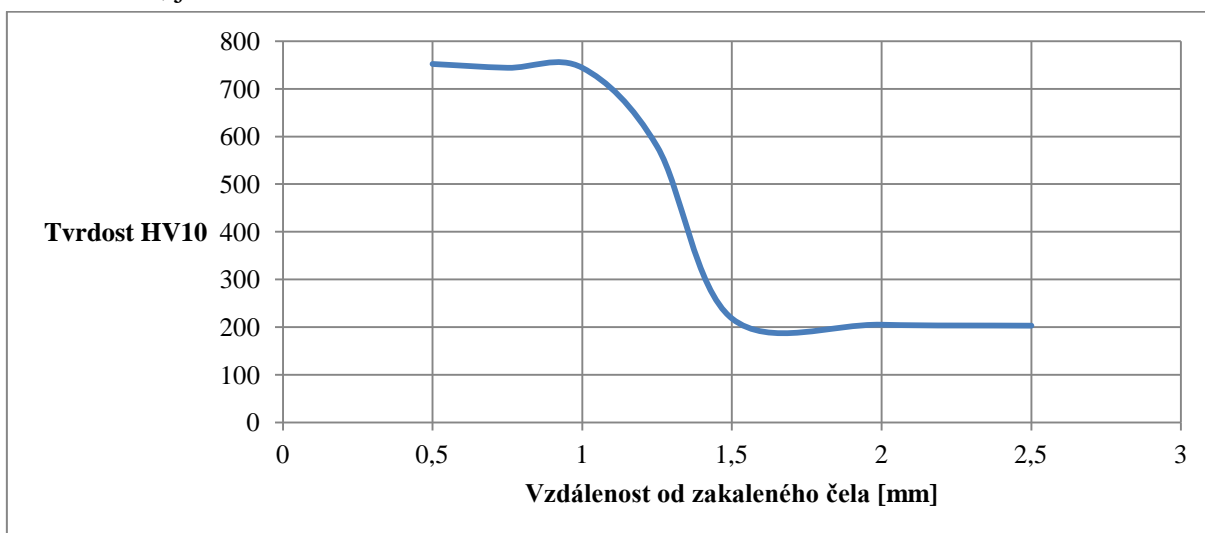
Číslo vzorku	Hodnota tvrdosti HV10						
	Vpich č. 1	Vpich č. 6	Vpich č. 2	Vpich č. 7	Vpich č. 3	Vpich č. 4	Vpich č. 5
1	702	722	611	390	211	203	203
2	680	730	645	709	209	203	203
3	698	726	664	450	259	209	203
4	752	744	744	579	218	205	203
5	715	659	430	227	204	211	202
6	695	720	686	469	211	208	202
7	604	508	220	208	203	202	202
8	724	620	215	215	207	203	201
9	554	378	206	209	202	202	200
10	671	512	206	208	203	203	203

Při samotném měření se nejprve naměřily hodnoty tvrdosti u vpichů 1 až 5. Vpich číslo 1 u každého vzorku byla snaha umístit vždy asi 0,5 mm od zakaleného čela a doprostřed zakalené oblasti. To se díky poměrně malým rozměrům ne vždy úplně povedlo. Následující vpichy se poté umísťovaly ve vzdálenosti 0,5 mm od sebe. Kvůli malému počtu naměřených hodnot tvrdosti v zakalené a přechodové oblasti se dodatečně vyhodnocovaly vpichy 6 a 7. Ty se umísťovaly ve vzdálenosti 0,5 mm vedle od již vyhotovených vtisků. Vtisk 6 se umístil mezi vtisky 1, 2 a vtisk 7 se umístil mezi vpichy 2, 3. Orientace vpichů u jednotlivých vzorků byla vždy stejná a je znázorněna na Obr. 58.



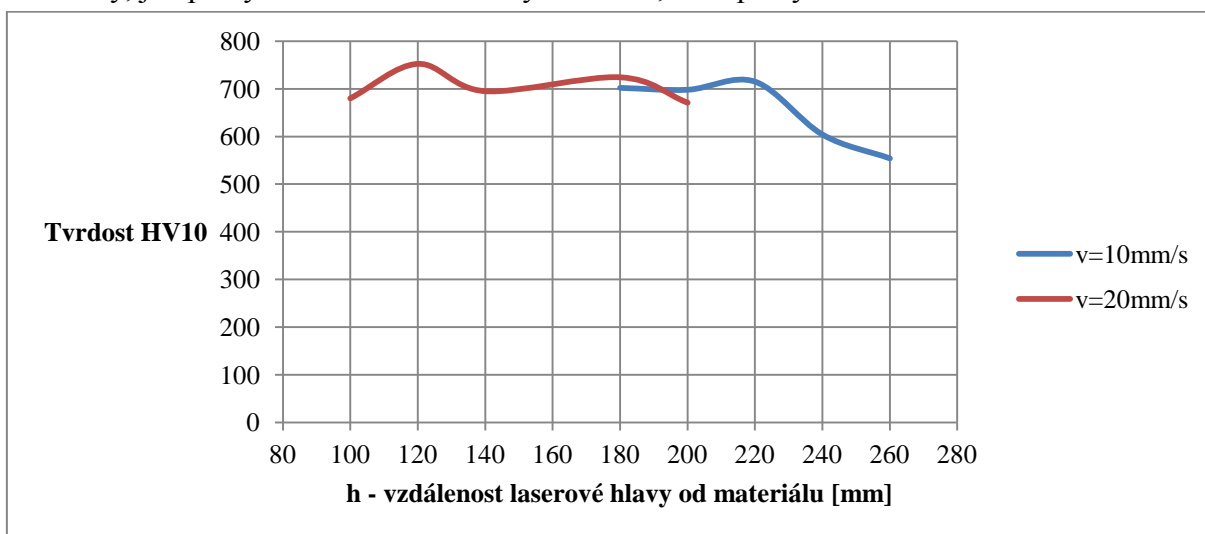
Obr. 58 Orientace a očíslování vpichů při měření tvrdosti u vzorku 5

Naměřené hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v Tab. 15. Pokud se provede obecné zhodnocení, tak z naměřených hodnot je zřejmé, že tvrdost základního materiálu je zhruba 200 HV a tvrdost zakalené oblasti se pohybuje okolo 700 HV, což znamená, že povrch materiálu má asi 3,5x větší tvrdost jak jádro. Můžeme proto říci, že u většiny vzorků došlo k požadovanému zvýšení tvrdosti. Nejvyšší tvrdosti zakalené oblasti se dosáhlo u vzorku 4. Na druhou stranu u tohoto vzorku se na povrchu vytvořila při kalení natavená oblast, šířka zakalené oblasti je pouhých 6 mm, což je jedna z nejnižších hodnot a hloubka zakalení je více než 1 mm, což je optimální. Průběh tvrdosti u vzorku 4 je znázorněn v grafu na Obr. 59. Průběhy tvrdostí u ostatních vzorků jsou téměř identické, kde v zakalené oblasti se hodnoty tvrdosti pohybují okolo 700 HV a poté tvrdost prudce klesá v rámci 0,5 mm na tvrdost základního materiálu 200 HV. Nejnižší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u vzorků 9 a 7, kde se hodnoty tvrdosti zakalené oblasti pohybovaly kolem 554 HV, respektive 604 HV, ale i tak se jedná o téměř 3x větší tvrdost, jak u základního materiálu.

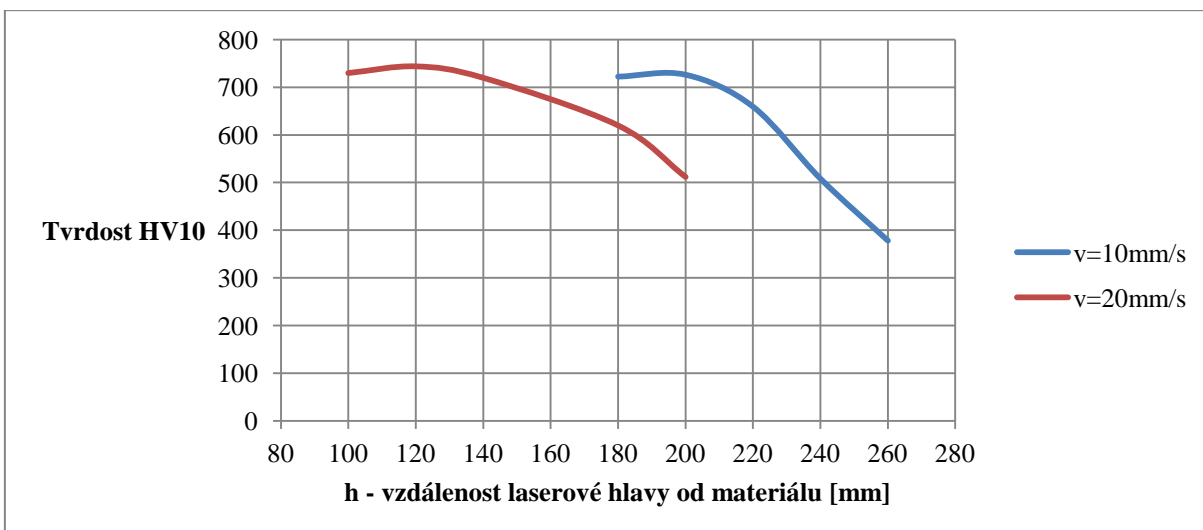


Obr. 59 Závislost tvrdosti na vzdálenosti od zakaleného čela u vzorku 4

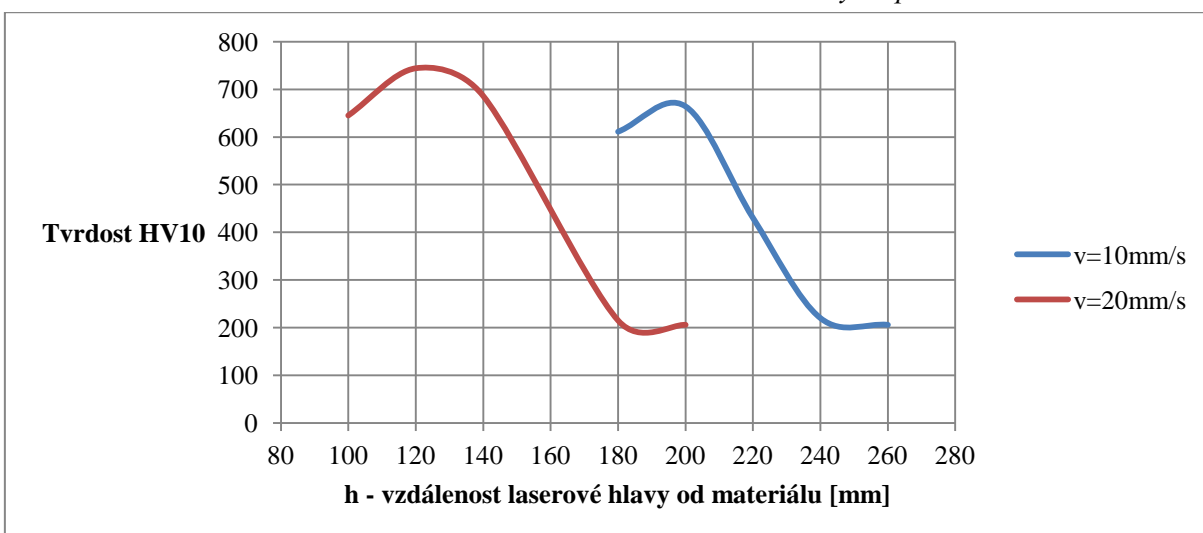
Na Obr. 60 až Obr. 63 jsou znázorněny jednotlivé průběhy závislosti tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy u vpichů, provedených v zakalené a přechodové oblasti. Z těchto grafů je zřejmé, že pro rychlost laserové hlavy 20 mm/s se dosáhlo nejvyšších tvrdostí při vzdálenosti laserové hlavy 120 mm (vzorek 4) a pro rychlost 10 mm/s to byla vzdálenost 220 mm (vzorek 5). S rostoucími hodnotami vzdálenosti laserové hlavy se již hodnoty tvrdosti snižovaly, jak při rychlosti laserové hlavy 10 mm/s, tak i při rychlosti 20 mm/s.



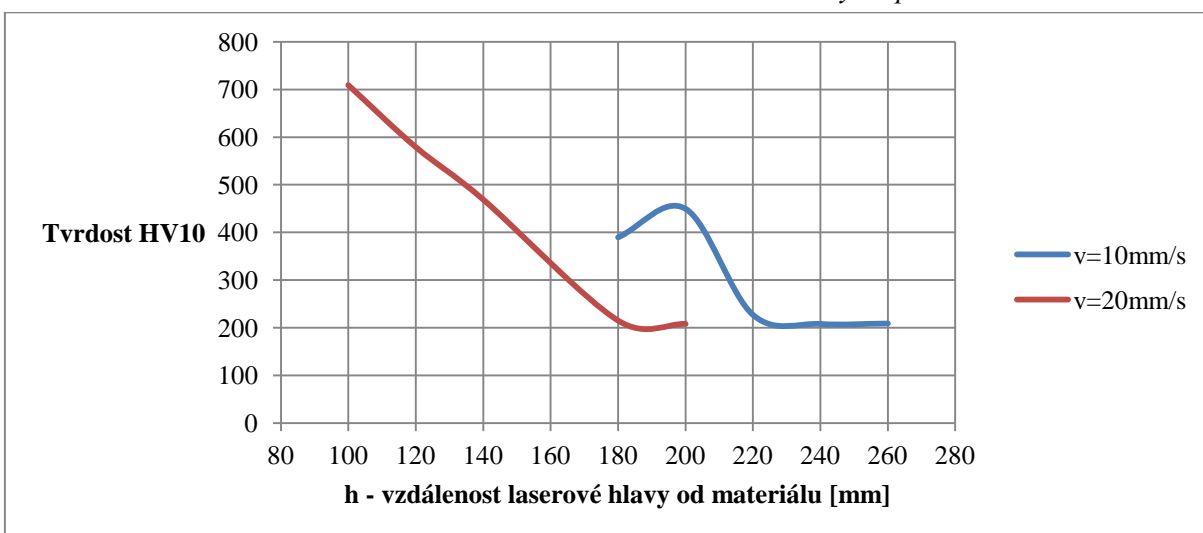
Obr. 60 Závislost tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy u vpichů č. 1



Obr. 61 Závislost tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy u vpichů č. 6



Obr. 62 Závislost tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy u vpichů č. 2



Obr. 63 Závislost tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy u vpichů č. 7

Z hlediska tvrdosti zakalené vrstvy vycházejí nejlépe vzorky 3 a 4, u kterých byla naměřena nejvyšší hodnota tvrdosti jak v povrchové vrstvě, tak i uvnitř materiálu. Poté vzorky 1, 5 a 2, 6. Nižších tvrdostí se dosáhlo u vzorků 7, 8 10 a nejnižší tvrdost byla naměřena u vzorku 9.

7 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Povrchové kalení vláknovým laserem porovnáme s často používanou metodou indukčního povrchového kalení. Protože neznáme zcela přesné údaje o cenách za jednotlivé technologie nebo přesnou dobu kalení u obou druhů povrchového kalení, je nutno brát tyto údaje jako orientační. Cena indukčního kalení byla zjištěna poptávkou ve firmě Galvamet zabývající se indukčním kalením a doba indukčního kalení byla odhadnuta z doby dodání zakalených součástí. Dále je potřeba brát v úvahu, že vláknový laser nebyl vybaven speciální optikou pro vytvoření vhodnějšího profilu laserového paprsku. S touto optikou by se doba kalení ještě zkrátila a celková cena by šla dolů.

V samotném technicko ekonomickém hodnocení se porovnávala doba a cena kalení na Smyšlené válcové součásti o průměru 40 mm, která se povrchově kalila v délce 100 mm. Celkový počet kalených součástí je 100 ks. Pro laserové kalení byly vybrány nejvhodnější varianty bez nataveného povrchu pro rychlost laserové hlavy 10 mm/s (odpovídá parametrům pro vzorek 5) a 20 mm/s (odpovídá parametrům pro vzorek 8). U vzorků, kde došlo k natavení v povrchové vrstvě, se hodnoty ceny a doby kalení pro jednotlivé rychlosti laserové hlavy nebudou velice lišit, ale k těmto hodnotám je potřeba ještě přičíst cenu a čas za dodatečné přebroušení povrchu.

Při indukčním kalení vznikají v povrchové vrstvě mnohem větší pnutí a riziko tvorby trhlin je tak mnohonásobně vyšší, než u laserového kalení, kde k tvorbě trhlin nedochází. Právě tyto pnutí způsobují deformace kalené součásti. Proto se po indukčním kalení zařazují ještě doplňkové práce, jako je například rovnání na lisu. Po laserovém kalení se tyto doplňkové práce nezařazují z důvodu vzniku pouze minimálních pnutí. Z hodnot v Tab. 16 je zřejmé, že pouze samotné povrchové zakalení celkové dávky 100 ks vychází nejlevněji metodou indukčního kalení, které je více než 2x levnější, jak laserové kalení rychlostí 20 mm/s a více než 3x levnější než laserové kalení rychlostí 10 mm/s. Ovšem při přičtení ceny za doplňkové práce, již rozdíl činí pouhých 800 Kč. Po přičtení doby doplňkových prací k celkové době indukčního kalení by se laserovým kalením, při rychlosti laserové hlavy 20 mm/s, zakalila celková dávka 6x rychleji a při rychlosti 10 mm/s téměř 3,5x rychleji.

Pro povrchové zakalení tvarově jednoduché součásti, z jaké se vycházelo v tomto technicko ekonomickém zhodnocení, je indukční kalení levnější, i když mnohem pomalejší metoda. S rostoucí složitostí tvarů, by cena indukčního kalení silně narůstala, z důvodu výroby vhodně tvarovaného induktoru, ale cena laserového kalení by zůstala pořád stejná. V tomto případě by se kalení laserem stalo levnější metodou. Například povrchové zakalení složitě tvarované hrany u lisovací formy, by bylo téměř nemožné provést pomocí indukčního kalení. Zde je právě výhodné použití laserového kalení. Laserovou hlavou, připevněnou na průmyslovém robotu, lze zakalit velice složité tvary pouze v přesně daných místech, což patří spolu s vyloučením vzniku trhlin na zakaleném povrchu mezi největší výhody laserového kalení.

Tab. 16 Srovnání laserového a indukčního kalení

	Laserové kalení		Indukční kalení
	v=10 mm/s	v=20 mm/s	
Doba kalení 1 ks [min]	2,4	1,5	8
Celková doba kalení [min]	240	150	800
Doba doplňkových prací [min]	-	-	100
Celková doba [min]	240	150	900
Cena kalení 1 ks [Kč]	78	50	22
Celková cena kalení [Kč]	7 800	5 000	2 200
Cena doplňkových prací [Kč]	-	-	2 000
Celková cena [Kč]	7 800	5 000	4 200

8 ZÁVĚR

Cíl této práce byl zaměřen na seznámení se s technologií povrchového kalení laserem a metodikou vyhodnocení laserově zakalené oblasti s následným výběrem vhodných kalících parametrů. Povrchové kalení laserem je moderní metoda tepelného zpracování materiálu. Mezi hlavní výhody tohoto kalení patří vznik jemné martenzitické struktury, vznik minimálních pnutí bez přítomnosti trhlin v zakalené oblasti, rychlost kalení a možnost zakalení pouze přesně určených míst. Postup práce při experimentu byl následující. Na vláknovém Yb:YAG laseru se zakalilo 10 vzorků z materiálu 12 050 při různé vzdálenosti a rychlosti pohybu laserové hlavy. U takto zakalených vzorků byla nejprve naměřena povrchová tvrdost. Poté se na mikroskopu pořídily snímky makrostruktury a mikrostruktury. Na tvrdoměru se naměřily hodnoty vnitřní tvrdosti. Při celkovém hodnocení se posuzovaly hlavně kritéria jako šířka, hloubka, tvrdost zakalené oblasti, rychlost pohybu laserové hlavy a přítomnost natavené povrchové vrstvy.

Nejméně vhodné parametry pro laserové kalení byly nastaveny u vzorků 7, 9 a 10. U těchto vzorků se dosáhlo nízkých hodnot tvrdosti a také malé hloubky prokalení. Pro tyto vzorky platí, že pro danou rychlost pohybu laserové hlavy byla vzdálenost materiálu od laserové hlavy příliš velká. Při takto velké vzdálenosti laserové hlavy neměl laserový paprsek již dostatečnou energii k prohřátí materiálu, a proto se dosáhlo nízkých hodnot hloubky zakalení i tvrdosti. S těmito vzorky se již nebude v dalším hodnocení počítat.

Optimální podmínky pro laserové kalení by se daly označit podmínky u vzorků 1, 2, 3, 4, 5, 6 a 8. U těchto vzorků se dosáhlo dobrých výsledků u většiny z hodnocených kritérií. Hodnota povrchové tvrdosti se u těchto vzorků pohybovala kolem 55 HRC. Pokud rozdělíme jednotlivé vzorky podle vzniku natavené vrstvy, tak ta nevznikla pouze u vzorků 5 a 8. Zakalení bez nataveného povrchu je výhodné zejména z toho důvodu, že se ušetří náklady a čas za dodatečné přebroušení nerovného nataveného povrchu. Pokud u těchto vzorků porovnáme hodnoty šířky, hloubky a tvrdosti zakalené oblasti, lépe vychází vzorek 5. U vzorku 8 se dosáhlo malé hloubky zakalení (0,7 mm), což je asi o 0,4 mm méně, jako u vzorku 5. Ale hodnoty tvrdosti i šířky zakalené oblasti jsou poměrně vysoké. Ovšem vzorek 8 se kalil při dvojnásobné rychlosti pohybu laserové hlavy (20 mm/s), jak vzorek 5. To znamená, že touto rychlostí pohybu laserové hlavy, by bylo zakalení výrazně rychlejší a tím pádem i výrazně levnější. Pokud zhodnotíme jednotlivé vzorky s natavenou vrstvou, tak se hodnota hloubky zakalení pohybuje v rozmezí 1 – 1,3 mm. Pro rychlost laserové hlavy 10 mm/s bylo dosaženo větší šířky zakalené oblasti, pohybující se kolem 8,3 mm a pro 20 mm/s byla šířka okolo 6 mm. Hodnoty tvrdosti v zakalené oblasti potom vycházely lépe u vzorků s rychlejším pohybem laserové hlavy. Také z ekonomického hlediska vycházejí lépe vzorky kalené vyšší rychlostí pohybu laserové hlavy. Ovšem hloubka zakalené vrstvy vycházela lépe u vzorků s menší rychlostí pohybu laserové hlavy, ale jedná se pouze o desetiny mm. Celkově tedy u vzorků s natavenou oblastí vychází jako nejvhodnější varianty vzorky 3 (vzdálenost laserové hlavy 200 mm a rychlost pohybu laserové hlavy 10 mm/s) a 6 (vzdálenost laserové hlavy 140 mm a rychlost pohybu laserové hlavy 20 mm/s).

Z konečného hodnocení tedy plyne, že nejvhodnější parametry pro laserové kalení jsou u vzorků 3, 5, 6 a 8. Nejlevnější a také nejrychlejší zakalení bez nataveného povrchu je u vzorku 8, ale zde se dosáhne pouze malé hloubky zakalení. Pro získání větší hloubky zakalení je nutné použít parametry kalení vzorku 5. Ovšem tento způsob bude dražší a také pomalejší v porovnání se vzorkem 8. Pokud budeme ignorovat případné náklady a čas na přebroušení nataveného povrchu, tak největší hloubky zakalení dosáhneme u vzorku 3. Rychlejší a také levnější varianta, ale s ne tak velkou hloubkou zakalení, je vzorek 6. Ve výsledku tak bude výběr vhodných kalících parametrů záležet na požadavcích zákazníka, jestli bude vyžadovat nižší cenu nebo větší hloubku zakalení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [4]

1. 1 Micron High-Power Direct-Diode Laser (HPDDL) Beam Integrators. *II-VI Infrared : World Best CO2 Laser Optics* [online]. [© 2013] [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: <http://www.iiviiinfrared.com/1-Micron-Optics-Materials/1micron-hpddl-beam-integrators.html>
2. Absorption_by_wavelength. *Fabricating and Metalworking* [online]. [2012] [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: http://www.fabricatingandmetalworking.com/wp-content/uploads/2012/09/Absorption_by_wavelength-1.jpg
3. BENKO, Bernard, Peter FODREK a Miroslav KOSEČEK. *Laserové technologie*. 1.vydání. Bratislava: STU, 2000. 4859. ISBN 80-227-1425-9.
4. CITACE PRO. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. c 2012 Citace.com [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz>
5. Co je laserová technologie?. *Lintech* [online]. [© 2009-2011] [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie>
6. Co rozhoduje při volbě typu laseru. RÜTERING, Marus. *MM spektrum* [online]. 07.07.2011 [2011] [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
7. CO2 laser. *Lintech* [online]. [© 2009-2011] [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co2-laser>
8. CONFOCAL LASER SCANNING MICROSCOPE LEXT OLS3100. *Welcome to QUALITY REPORT* [online]. [2013] [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.qualityreport.co.th/olympus/LEXTDetail.pdf>
9. Další druhy kalení. *Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů* [online]. 9.10.2010 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/dalsi-druhy-kaleni/>
10. Direct Diode Lasers – Direct Power. *Laserline* [online]. [2011] [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: http://www.laserline.de/diode_laser/high_power_diode_lasers_direct_diode_lasers.html
11. Gravírování. *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. [10. 3. 2013] [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Grav%C3%ADrov%C3%A1n%C3%AD>
12. Hardening large rings and gears. *Induction heating equipment, systems and services for industrial applications - EFD Induction* [online]. [2010] [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.efd-induction.com/~media/PDF/Applications/LargeRings.ashx>
13. Historie laseru. *LaserArt* [online]. [11.5.2010] [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://www.laserart.wbs.cz/Historie-laseru.html>
14. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. DUŠEK, Jiří. *Megablog* [online]. 28.2.2013 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
15. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. NOVÁK, Miroslav. *LAO - lasery a optika* [online]. 15.3.2011 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
16. IMGP4309. *Leipziger Messe - Leipziger Messe GmbH* [online]. [2013] [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: [http://lemmon.leipziger-messe.de/LeMMon/AUSSTPR.NSF/messewebger_itc/46FC095C553E7DD0C12577F8004D5250/\\$FILE/IMGP4309.jpg](http://lemmon.leipziger-messe.de/LeMMon/AUSSTPR.NSF/messewebger_itc/46FC095C553E7DD0C12577F8004D5250/$FILE/IMGP4309.jpg)
17. Industrial fiber lasers. *IPG Photonics High Power Fiber Lasers* [online]. [2012] [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/HP_Brochure.pdf

18. IRB 2400 Industrial Robot. *The ABB Group - Automation and Power Technologies* [online]. Červen 2012 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/898b798f7e4ed57bc1257a1d0050dc5f/\\$file/PR10034%20EN%20R7_HR.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/898b798f7e4ed57bc1257a1d0050dc5f/$file/PR10034%20EN%20R7_HR.pdf)
19. IRB 2400. *The ABB Group - Automation and Power Technologies* [online]. [2013] [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.abb.com/product/seitp327/c1f9874233fec095c125726f0043f260.aspx?productLanguage=cz&country=00>
20. KALENÍ A POPOUŠTĚNÍ. DRIML, Bohuslav. *Elitalycea.wz.cz* [online]. [2013] [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
21. Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů. SCHUBERT, Steffan. *MM spektrum* [online]. 28.06.2011 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
22. Kalení. *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. [10. 3. 2013] [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kalen%C3%AD>
23. Knoop Test Methods. *Struers - Ensuring Certainty* [online]. [© 2013] [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?doc_id=946
24. Kvalita a cena. *CHPS* [online]. [1999] [cit. 2013-03-03]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/rezani-laserem/kvalita-a-cena.html>
25. Laboratorní přesná pila MIKRON 110. *ISOTEK* [online]. [2013] [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: http://www.isotek.sk/laboratorna_pila.pdf
26. Laser cladding - nová metoda úpravy povrchů. *MATEX PM* [online]. 6/2011 [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.matexpm.com/cz/uvod/ke-stazeni/category/6-strojarstvo>
27. Laser Materials Nd:YAG » Yttrium Aluminum Garnet. *Scientific Materials Corporation* [online]. [© 2005 - 2013] [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: http://www.scientificmaterials.com/products/nd-yag_yttrium_aluminum_garnet.php
28. Laserové dělení materiálu. ZATLOUKAL, Petr. *Welding.cz* [online]. 10/05/2007 [cit. 2013-03-01]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>
29. Laserové kalení proces s velkým potenciálem. BULLING, Dieter. *TRIBOLÓGIA* [online]. 2/2012 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22012/laserove-kaleni-proces-s-velkym-potencialem.html>
30. Laserové kalení. *TRUMPF Česká Republika* [online]. [© 2013] [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu/laserove-kaleni.html>
31. Laserové navařování. *Lasery pro průmyslové technologie, laserové systémy - LaserTherm* [online]. [© 2013] [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/nabizene-sluzby/laserove-navarovani/>
32. Laserové navařování. *Lintech* [online]. [© 2009-2011] [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-navarovani>
33. Laserové navařování. *MATEX PM* [online]. [© 2011] [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.matexpm.com/cz/laserove-navarovani>
34. Laserové navařování. *Robotizace a automatizace - Robotizace od ARC-robotics* [online]. [2013] [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.arc-robotics.cz/laserove-navarovani.html>
35. Laserové popisování. *Lintech* [online]. [© 2009-2011] [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-popisovani>

36. Laserové řezání (laser cutting). ING. PAVEL KOŘÁN. *LAO - Lasery a optika* [online]. 20.5.2011 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aktualne/clanky-a-zpravy/serial-o-laserech/serial-laserove-rezani.htm> BLBě
37. Laserové svařování - základní informace o technologii laserového svařování/řezání. HADYNA, Daniel. *Hadyna - International* [online]. [2011] [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2011-3_Laser.pdf
38. Laserové svařování. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. [© 2005 – 2013] [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani>
39. Laserové svařování. ZATLOUKAL, Petr. *Welding.cz* [online]. [10/05/2007] [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/svarovani.htm>
40. Laserový konfokální řádkovací mikroskop. JIŘIKOVSKÝ, Karel. *MM spektrum* [online]. 25.04.2007 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserovy-konfokalni-radkovaci-mikroskop.html>
41. Lasery a jejich aplikace. ŠULC, Jan. *PLS Laser systems* [online]. 8.9.2002 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
42. Lasery pro průmysl. ŠMÍD, Jiří. *MM spektrum* [online]. 09.07.2008 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
43. Lasery-historie. ČVUT. *Ústav Fyziky* [online]. [26-11-2012] [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_9.pdf
44. MACHÁČ, Miroslav. *MĚŘENÍ TVRDOSTI MATERIÁLŮ A ZPRACOVÁVÁNÍ ZJIŠTĚNÝCH HODNOT*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
45. Materiálové normy. *Ferona, a.s. - Velkoobchod hutním materiálem* Ferona, a.s. - *Velkoobchod hutním materiálem* [online]. [© 2004–2013] [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php
46. Mechanické zkoušení kovů - teoretická část. *VŠCHT – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. [2013] [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm
47. Měření tvrdosti. *Struers - Ensuring Certainty* [online]. [© 2013] [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?doc_id=912&top_id=5&main_id=156&admin_language=19
48. Micro Hardness Testing. *Westmoreland Mechanical Testing and Research, Inc. Materials Testing Lab* [online]. [© 2007/2009] [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.wmtr.com/Content/micro_hardness_testing.htm
49. Microhardness of Ni-Cr alloys under different casting conditions. BAUER, José Roberto de Oliveira, Alessandro Dourado LOGUERCIO a Alessandra REIS. *SciELO - Scientific Electronic Library Online* [online]. [2006] [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-83242006000100008&script=sci_arttext
50. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky*. Brno, [2012]. Výukový materiál. VUT FSI.
51. Návrh zařízení. *Lasery pro průmyslové technologie, laserové systémy - LaserTherm* [online]. [© 2013] [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/nabizene-sluzby/navrh-zarizeni/>
52. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *MM spektrum* [online]. 12.05.2008 [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-5-dil.html>
53. NĚMEČEK, Stanislav. *Využití laserů v průmyslu*. Praha: Tribun EU, 2013. ISBN 978-80-263-0359-6.

54. Olympus LEXT 3100. *Welcome to QUALITY REPORT* [online]. [2013] [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: http://www.qualityreport.co.th/Image/olympus/ols/acc_pic2.jpg
55. Porovnání značení ocelí. *SVARINFO - váš zdroj informací o svařování, server ze skupiny SVARBAZAR* [online]. [2005] [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=oceli>
56. Povrchové kalení. *Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů* [online]. 8.10.2010 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/povrchove-kaleni/>
57. Průmyslové aplikace laserových systémů. ŠULC, Jan. *PLS Laser systems* [online]. 11.7.2004 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
58. Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery. KOŘÁN, Pavel. *MM spektrum* [online]. 11.04.2012 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
59. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. NOVÁK, Miroslav. *MM spektrum* [online]. 04.09.2012 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
60. Remote welding. NOVÁK, Miroslav. *IStrojirenství* [online]. [2009] [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?navez=remote-welding&id=22>
61. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING). KOŘÁN, Pavel. *LAO - lasery a optika* [online]. 20.5.2011 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
62. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING). KOŘÁN, Pavel. *LAO - lasery a optika* [online]. 15.7.2011 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
63. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. NOVÁK, Miroslav. *LAO - lasery a optika* [online]. 15.3.2011 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
64. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: TYPOS - Digital print, 2005. ISBN 80-7043-417-1.
65. Sublimační řezání. *TRUMPF Česká Republika* [online]. [© 2013] [cit. 2013-03-01]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/sublimacni-rezani.html>
66. SVAŘOVÁNÍ LASEREM – poslední trendy. KOŘÁN, Pavel. *IStrojirenství* [online]. [2009] [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?navez=svarovani-laserem-posledni-trendy&id=20>
67. Sympozium v Dráždanech posoudí vhodné typy laserů pro průmyslové technologie. *Technický týdeník* [online]. 14.01.2013 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/symposium-v-drazdanech-posoudi-vhodne-typy-laseru-pro-prumyslove-technologie_19556.html
68. Tavné řezání. *TRUMPF Česká Republika* [online]. [© 2013] [cit. 2013-03-03]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/tavne-rezani.html>
69. Technické aspekty svařování laserem. KUBÍČEK, Jaroslav a Libor MRŇA. *Svařák.cz* [online]. [1999] [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.svarak.cz/images/stories/pdf/Svarov%C3%A1ni%20laserem.pdf>

70. Technologie - Jak pracuje laserový řezací stroj?. *CHPS* [online]. [1999] [cit. 2013-03-01]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/rezani-laserem/technologie.html>
71. Tepelné zpracování. *Spojovací materiál Killich* [online]. [© 2007] [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.killich.cz/stranky/technicke-info/ocelovy-spojovaci-material/tepelne-zpracovani.htm>
72. The Race to Build a Laser. *The American Institute of Physics* [online]. [© 2013] [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://www.aip.org/history/exhibits/laser/sections/therace.html>
73. Válcovaná ocel legovaná pro zušlechtnění. *Ac steel a.s.* [online]. [© 2008] [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: <http://www.acsteel.cz/ocel-valcovana-legovana-pro-zuslechtneni.php>
74. YLS - 2000. *Laserfair.com Laser Manufacture News* [online]. [2013] [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: http://www.laserfair.com/uploads/allimg/120330/1_120330104352_1.jpg
75. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ. DRIML, Bohuslav. *Chemikalie.upol.cz* [online]. [2013] [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
76. Základy tepelného zpracování kovů. HAMERNÍK, Jan. *Mgr. Jan Hamerník* [online]. [2006] [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
77. Zkouška tvrdosti dle Brinella. BUREŠ, Jiří. *ConVERTER - převody jednotek* [online]. [© 2002] [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-brinell.htm>
78. Zkouška tvrdosti dle Knoop. BUREŠ, Jiří. *ConVERTER - převody jednotek* [online]. [© 2002] [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-knoop.htm>
79. Zkouška tvrdosti podle Brinella. *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. [11. 3. 2013] [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrdosti_podle_Brinella
80. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. [10. 4. 2013] [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrdosti_podle_Vickerse
81. Zkoušky tvrdosti. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. [2013] [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
82. ZNAČENÍ A GRAVÍROVÁNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ. *LAO - lasery a optika* [online]. [2013] [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89/znaceni-a-gravirovani-kovovych-materialu-91>
83. Značení a gravírování laserem. *MM spektrum* [online]. 21.05.2003 [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/znaceni-a-gravirovani-laserem.html>
84. Zpracování materiálů laserem 1. díl - svařování. *MATEX PM* [online]. [2011] [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: <http://www.matexpm.com/cz/uvod/ke-stazeni/category/7-mm-prumyslove-spektrum>
85. Zvyšování životnosti povrchů laserovým kalením. NĚMEČEK, Stanislav. *TRIBOLÓGIA* [online]. 2/2011 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22011/zvysovani-zivotnosti-povrchu-laserovym-kalenim.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ARA	Anizotermický rozpad austenitu
CCD	Charge-coupled device (zařízení s vázanými náboji)
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
HB	Tvrдость dle Brinella
HRA, HRB, HRC	Tvrдость dle Rockwella
HV	Tvrдость dle Vickerse
IRA	Izotermický rozpad austenitu
ISO	International Organization for Standardization
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření)
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování mikrovln stimulovanou emisí záření)
Obr.	Obrázek
Tab.	Tabulka
VUT	Vysoké učení technické
YAG	Yttrium aluminium granát

A_{C1}	[°C]	Překrystalizační teplota
A_{C3}	[°C]	Překrystalizační teplota
B_f	[°C]	Teplota konce tvorby bainitu
B_s	[°C]	Teplota počátku tvorby bainitu
D	[mm]	Průměr vtláčovací kuličky
F	[N]	Zatěžující síla
F_0	[N]	Předběžné zatížení
F_1	[N]	Přídavné zatížení
L	[mm]	Velikost úhlopříčky
M_f	[°C]	Teplota konce tvorby martenzitu
M_s	[°C]	Teplota počátku tvorby martenzitu
P_f	[°C]	Teplota konce tvorby perlitu
P_s	[°C]	Teplota počátku tvorby perlitu

P_H	$[\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}]$	Hustota výkonu laserového paprsku
Q	$[\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}]$	Vnesené teplo
R_a	$[\mu\text{m}]$	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R_e	$[\text{MPa}]$	Mez kluzu
R_m	$[\text{MPa}]$	Mez pevnosti
T	$[\text{°C}]$	Teplota
d	$[\text{mm}]$	Průměr vtisku
d_p	$[\text{mm}]$	Průměr laserového paprsku na povrchu materiálu
d_u	$[\text{mm}]$	Délka úhlopříčky
h	$[\text{mm}]$	Vzdálenost laserové hlavy od materiálu
v	$[\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost pohybu laserové hlavy
α	$[\text{°}]$	Poloviční úhel rozbíhavosti laserového paprsku
λ	$[\mu\text{m}]$	Vlnová délka záření

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Č.o.	Popis obr.	Strana
Obr. 1	Povrchové kalení laserem [51]	10
Obr. 2	První laser [72]	11
Obr. 3	Základní princip laseru [63]	12
Obr. 4	Závislost vlnové délky na velikosti absorpce u různých materiálů [2]	13
Obr. 5	Princip slab CO ₂ laseru [15]	14
Obr. 6	Druhy aktivního prostředí u pevnolátkových laserů [15]	15
Obr. 7	Ukázka Nd:YAG krystalu [27]	15
Obr. 8	Princip první generace Nd:YAG laseru buzeného výbojkami [15]	16
Obr. 9	Princip vláknového laseru [14]	17
Obr. 10	Polovodičový laser [10]	17
Obr. 11	Kondukční režim svařování vlevo a vpravo penetrační režim svařování [62]	18
Obr. 12	Příklad laserového svaru [52]	19
Obr. 13	Princip řezání laserem [61]	20
Obr. 14	Kvalita plochy řezu při řezání kyslíkem (spodní díl) a dusíkem (horní díl) [24]	21
Obr. 15	Princip laserového navařování [31]	21
Obr. 16	Příklady laserového značení [82]	22
Obr. 17	Oblast kalících teplot [76]	23
Obr. 18	Schéma rozdělení kalení [22]	24
Obr. 19	ARA diagram s vyznačenými průběhy různých druhů kalení [76]	25
Obr. 20	IRA diagram s vyznačenými průběhy kalení [76]	26
Obr. 21	Indukční povrchové kalení [12]	26
Obr. 22	Ukázka laserového kalení [16]	27
Obr. 23	Příklad zakalené hrany střížného nástroje [21]	28
Obr. 24	Profil laserového paprsku vhodný ke kalení [10]	28
Obr. 25	Speciální optika k utvoření obdélníkového profilu laserového paprsku [1]	29
Obr. 26	Tvrdość dle Brinella [79]	30
Obr. 27	Princip měření tvrdosti dle Rockwella [44]	31
Obr. 28	Měření tvrdosti dle Vickerse [80]	32
Obr. 29	Příklady měření mikrotvrdości a) dle Vickerse b) dle Knoopu [48, 49]	33
Obr. 30	Tvar vtisku u měření mikrotvrdości dle Knoopu [44]	34
Obr. 31	Vláknový Yb-YAG laser [74]	35
Obr. 32	Průmyslový robot	36
Obr. 33	Laboratorní přesná pila [25]	37
Obr. 34	Mikroskop Olympus LEXT 3100 [54]	37
Obr. 35	Vickersův tvrdoměr Zwick 3212	38
Obr. 36	Rockwellův tvrdoměr	38
Obr. 37	Průběh laserového kalení	40
Obr. 38	Vzorky před (a) a po zakalení (b)	41
Obr. 39	Zalitě vzorky připravené na vyhodnocení na mikroskopu	42
Obr. 40	Rozměry pro výpočty	42
Obr. 41	Vzorek č. 1	44
Obr. 42	Vzorek č. 2	44
Obr. 43	Vzorek č. 3	44
Obr. 44	Vzorek č. 4	44
Obr. 45	Vzorek č. 5	45
Obr. 46	Vzorek č. 6	45
Obr. 47	Vzorek č. 7	45

Obr. 48 Vzorek č. 8	45
Obr. 49 Vzorek č. 9	45
Obr. 50 Vzorek č. 10	46
Obr. 51 Graf závislosti vzdálenosti laserové hlavy na šířce zakalené oblasti	47
Obr. 52 Graf závislosti vzdálenosti laserové hlavy na hloubce zakalené oblasti	47
Obr. 53 Zakalené vzorky	48
Obr. 54 Zakalené vzorky	48
Obr. 55 Mikrosnímky jednotlivých struktur u vzorku 5.....	49
Obr. 56 Mikrostruktura přetavené oblasti u vzorku 2	50
Obr. 57 Závislost povrchové tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy	51
Obr. 58 Orientace a očíslování vpichů při měření tvrdosti u vzorku 5	52
Obr. 59 Závislost tvrdosti na vzdálenosti od zakaleného čela u vzorku 4.....	53
Obr. 60 Závislost tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy u vpichů č. 1	53
Obr. 61 Závislost tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy u vpichů č. 6	54
Obr. 62 Závislost tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy u vpichů č. 2	54
Obr. 63 Závislost tvrdosti na vzdálenosti laserové hlavy u vpichů č. 7	54

Č.t.	Popis tab.	strana
Tab. 1	Hodnoty absorpce záření na drsnosti povrchu [3].....	13
Tab. 2	Hodnoty zatížení pro měření tvrdosti dle Rockwella [64]	32
Tab. 3	Rozdělení zkoušek dle Vickerse [44].....	33
Tab. 4	Technické parametry [17]	35
Tab. 5	Technické parametry [18]	36
Tab. 6	Technické parametry [25]	37
Tab. 7	Technické parametry [8]	37
Tab. 8	Značení oceli [55].....	39
Tab. 9	Chemické složení	39
Tab. 10	Mechanické vlastnosti	39
Tab. 11	Navrhnuté parametry pro kalení.....	40
Tab. 12	Vypočítané hodnoty	43
Tab. 13	Hodnoty šířky a hloubky zakalené oblasti	46
Tab. 14	Naměřené hodnoty povrchové tvrdosti	51
Tab. 15	Naměřené hodnoty tvrdosti	52
Tab. 16	Srovnání laserového a indukčního kalení.....	55

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Materiálový list oceli 12 050

Příloha č. 2 – Fotodokumentace makrosnímků zakalené oblasti

Příloha č. 1 – Materiálový list oceli 12 050

položka: 400297H, dodavatel: 2521, nákupní objednávka: 486390

INSPEKČNÍ CERTIFIKÁT 3.1 EN 10204:2004
 INSPECTION CERTIFICATE, ABNAHMEPRÜFZEUGNIS, CERTIFICAT DE RÉCEPTION A02



EVRAZ VÍTKOVICE STEEL
 A01_A05/ EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, s.r.o.,
 Ostrava-Muhlebař Štramberkš 2871/47, PSČ 709 00
 ČESKÁ REPUBLIKA

A02/ Číslo dokumentu, No. Nr. 202/ Datum, Date Strana, Page, Seite
 60894/2011 18.11.2011 1/ 1

A06/ Odběratel/Client, Customer/consignee, Bestelle/Empfänger, Acheteur/destinataire

Ferona, a.s.
 útvar centrální likvidace
 faktur VO
 10833
 Praha 10
 CZ

A08/ Číslo záložku výrobce, Manufacturer's work order No., Wertschafftragsnr., Num. de la commande de l'usine productrice 176846/2011
 A07/ Číslo objednávkový obdrátání, Purchaser's order No., Kundenbestellnr., Numéro de la commande du client 120209/001
 486390//

A10/ Arvo E., Advice Note No., Arvo Nr., Arvo No. 100034 B14/ Vagon č., Wagon No., Wagon Nr. 215455560437 B13/ Sk.hm. Act.mass, Ist-Masse, Masse eff. 1 884 kg

EN ISO 9001 : TÜV NORD: 04100930144
 EN ISO 14001: TÜV NORD: 04104030144

hejclova@hrkralove.ferona.cz

B01/ Výrobek, Product, Erzeugnis, Produkt, B06/ Počet ks, No. of pieces, Stückzahl, B08-B3/ Rozměry, Dimensions, Maße, B12/ Tř. rozm. Th. Masse, Masse th.		B02/ Omezení oceli, Steel designation, Stahlbezeichnung, Designation de l'acier		B03/ Dodací podmínky, Terms of Delivery, Lieferbedingunses, Conditions de livraison	
10-2000-6000 mm		C45+N		EN 10083-2/2007	
1 884 kg		C45+N		EN 10029 A/N	
2 plechy				EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1	
B04/ Stav výrobku při dodání, Product deliver condition, Lieferzustand des Erzeugnisses, Etat de livraison		B05/ Referenční zprac., Reference treatment of samples, Referenzbehandlung, Traitement de référence des échantillons		B07/ Dodací podmínky, Terms of Delivery, Lieferbedingunses, Conditions de livraison	
C01		C02		C03	

24892 Y 2 288024 A T 20 P ReH A5 395 649 20.0

C71-C52/ Chemické složky [%]

taavba	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al	N	Nb
24892	0.482	0.730	0.320	0.012	0.005	0.050	0.020	0.050	0.004	0.004	0.002	0.029	0.007	0.001

B07/ Identifikace výrobků

taavba	čís.zk	plechy
24892	288024	697506 101 202

Radioizotopická aktivita materiálu nepřekročila 100 Bq/kg.

B06/ Značení výrobku, Marking of the produkt Kennzeichnung des Erzeugnisses, Marquage du produit: Vývalček, Plech, Taavba, Jakost, Zkouška / Rolled product No., Plate No., Quality, Test No. / Walsztük, Blech, Schmelzen, Qualität, Probe

201/ Tímto prohlášením na svou výlučnou odpovědnost, se uvědomuji (toto prohlášení jsou ve shodě s předlohy, které jsou specificky kupní smlouva a je na výrobci vydáno prohlášení o shodě podle zřídla č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů) a nahrazení vády č. 150/2002 Sb. Es wird hiermit auf ausschliessliche Verantwortlichkeit erklärt, dass die hier angeführten Erzeugnisse auf die sich diese Erklärung bezieht, entsprechen den im Kaufvertrag spezifizierten Vorschriften. Therefore we declare to our exclusive responsibility that the mentioned products to which this declaration is in accordance with regulations, which are specified by the contract. Nous déclarons à notre responsabilité exclusive que les produits mentionnés se réfèrent à cette déclaration sont conformes aux prescriptions spécifiées par le contrat d'achat.

A04/ Značka výrobce: Manufacturer's mark: Zeichen des Herstellers: Marque du producteur:



202/ Ověření platnosti 203/ Razítko zástupce kontroly

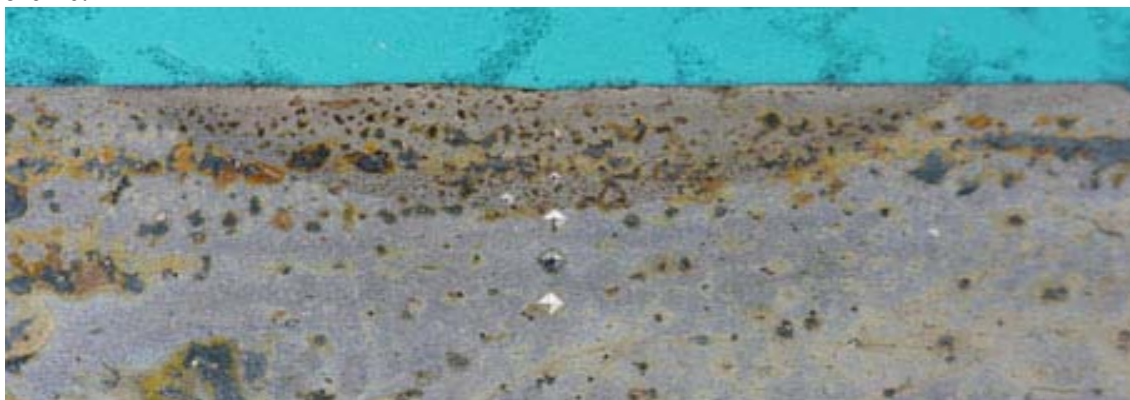
EVRAZ EVRAZ VÍTKOVICE STEEL
 Miluše SITKOVÁ
 independent authorized agent
 unabhängiger berechtigter Vertreter
 nezávislý oprávněný zástupce

C01/ Umístění vzorku, Město A - hřívá, Top, Kopf, Mts, Z - patá, Bettom, Fuss, pied
 C02/ Směr zkušebních vzorků: L - podélná, longitudinal, längs, T - příčná, transverse, quer, transversal.
 C03/ Zkušební teplota, Test temperature, Prüftemperatur, Temperature d'essai
 C10/ Typ zkušebního vzorku: P - prismatic, prismatic, prismatisch, C - cylindrický, cylindrical, zylindrisch
 C11/ Význačná nebo smluvní měřítko, Yield or proof strength, Staufkraft Dehnung, Limite d'élasticité
 C12/ Měřítko pevnosti v tahu, Tensile strength, Zugfestigkeit, Résistance à la traction
 C13/ Tahlost, Elongation after fracture, Bruchdehnung, Allongement après rupture
 C40/ Typ zkušebního tělesa, C41/ Síla zkušebního tělesa, C42/ Technické hodnoty, C43/ Sřední hodnota
 C70/ Způsob výroby oceli, Steelmaking process, Stahlherstellungsverfahren, Mode d'élaboration de l'acier, BO=Y

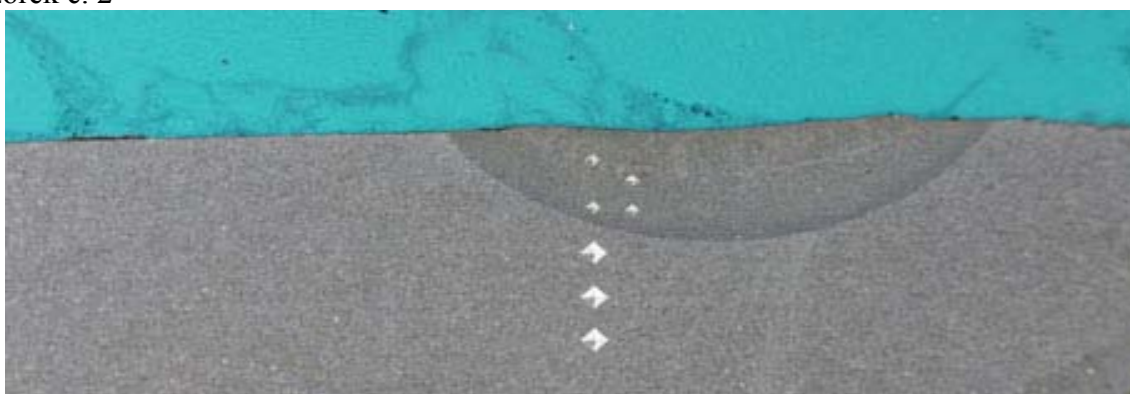
200-F63

Příloha č. 2 – Fotodokumentace makrosnímků zakalené oblasti

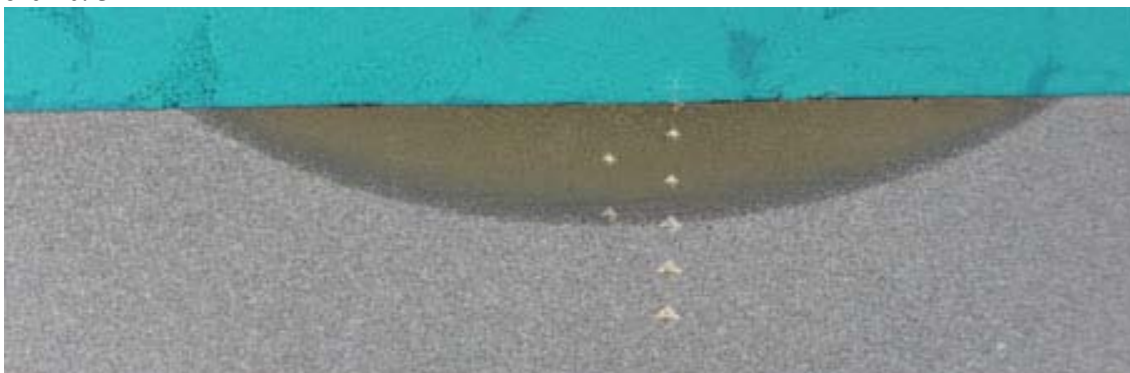
Vzorek č. 1



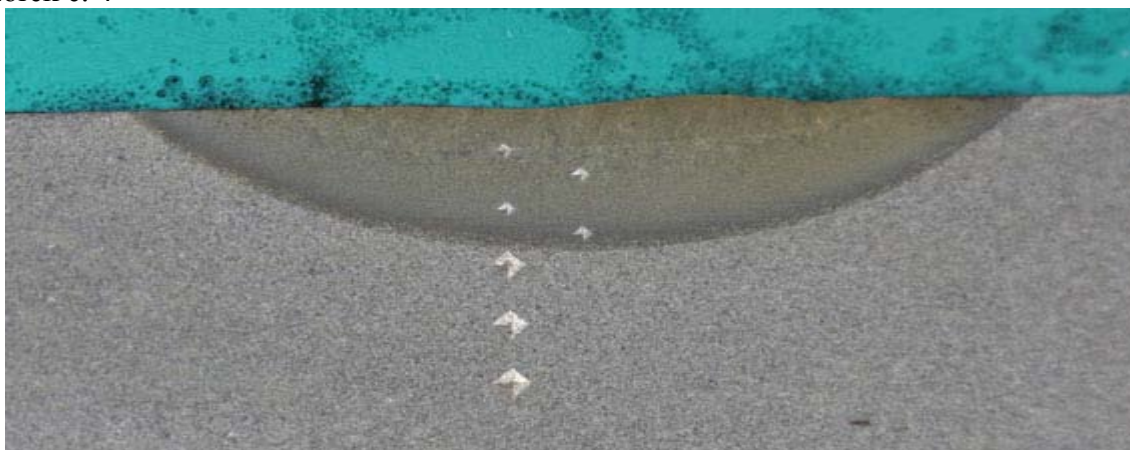
Vzorek č. 2



Vzorek č. 3



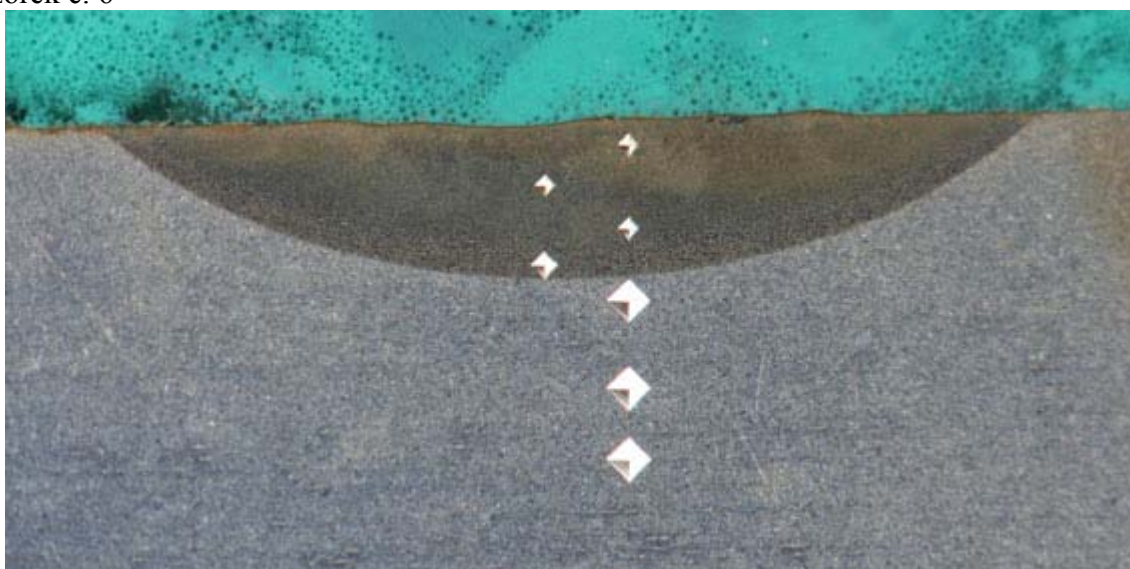
Vzorek č. 4



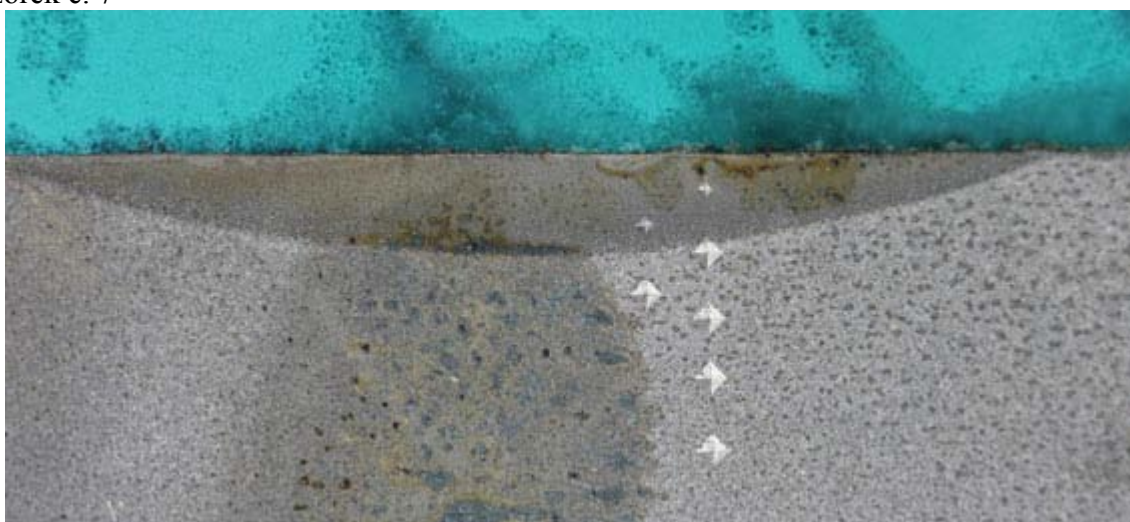
Vzorek č. 5



Vzorek č. 6



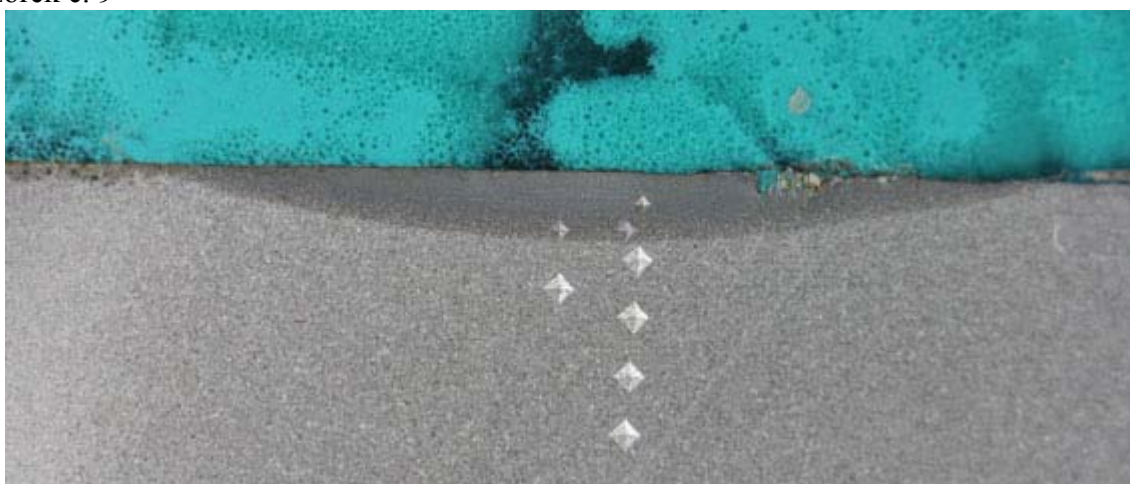
Vzorek č. 7



Vzorek č. 8



Vzorek č. 9



Vzorek č. 10

