



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**ROTAČNÍ BLESKOVÉ KALENÍ S POMOCÍ
ELEKTRONOVÉHO SVAZKU A LASEROVÉHO PAPRSKU**

ROTARY FLASH HARDENING WITH HELP OF ELECTRON BEAM AND LASER RADIATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Klusáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miloslav Kouřil, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	Bc. Martin Klusáček
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Miloslav Kouřil, CSc.
Akademický rok:	2018/19

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:

Rotační bleskové kalení s pomocí elektronového svazku a laserového paprsku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stacionární (součást se nehýbe) bleskové kalení je na základě jednorázového velmi rychlého (0,1 s) ohřevu určité plochy (tvar, velikost) skenujícím elektronovým nebo laserovým paprskem a ochlazení (zakalení) plochy vnitřním odvodem tepla kalené součásti. Podmínkou je dostatečný výkon a technická úroveň zařízení, která umožní sofistikované skenování a řízení výkonu paprsku na ohřívané ploše. Úkolem DP je aplikovat tento princip na rotační plochu (válec, kužel) s pomocí sestrojeného experimentálního zařízení.

Cíle diplomové práce:

Ověřit princip bleskového rotačního kalení s pomocí elektronového svazku a laseru;
Sestrojit přípravek pro rotační kalení.

Seznam doporučené literatury:

ZENKER, Rolf and Anja BUCHWALDER. Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung. Pro Beam AG & CO, 2010.

PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. Brno: CERM, c1999. ISBN 80-7204-130-4.

ASKELAND, Donald R. and Pradeep P. FULAY. The Science and Engineering of Materials. 5th ed. Toronto, Ont.: Thomson, c2006. ISBN 0-534-55396-6.

CALLISTER, William D. Materials Science and Engineering: an Introduction. 6th ed. New York: John Wiley and Sons, 2003. ISBN 0-471-22471-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá aplikací ohřevu elektronovým svazkem a laserovým paprskem pro bleskové (jednorázové) povrchové kalení ocelí za rychlé rotace. Při tomto způsobu kalení dochází k velmi rychlému homogennímu ohřevu definované části povrchu. Jako experimentální materiál byla zvolena ocel 42CrMo4 (Wnr 1.3563, ČSN 15142). Literární část rozebírá nejčastější metody povrchového kalení, zejména pak technologii laserového paprsku a elektronového svazku a cituje některé předchozí práce na podobné téma. V rámci experimentální části byly pro daný účel sestaveny rotační přípravky. Bylo provedeno kalení při různých nastaveních zdroje záření, rychlosti otáčení vzorku a posuvu laserového nebo elektronového paprsku. Rotačním jednorázovým kalením pomocí laserového paprsku bylo dosaženo maximální hloubky zakalení 0,7 mm a šířky stopy 5,6 mm. V případě elektronového svazku byla provedena modulace rozložení výkonu svazku podél šířky stopy za účelem zlepšení poměru mezi hloubkou a šířkou vrstvy. Výsledkem pokusů bylo dosažení maximální hloubky 1,4 mm a šířky stopy 13,4 mm.

Klíčová slova

rotační bleskové kalení, povrchové kalení, laserový paprsek, elektronový svazek, 42CrMo4

ABSTRACT

This master thesis deals with surface hardening of steels, especially with rotary flash hardening of 42CrMo4 steel (Wnr 1.3563, ČSN 15142). In this method homogenous heating of whole surface occurs during a very fast rotation of the component. In the theoretical part of this thesis the most common methods of surface hardening are described, with focus on laser and electron beam technologies. In the experimental part special device for this application was constructed. Rotary flash hardening was done using different radiation source and experimental device parameters. The hardened surface layer of maximal thickness of 0,7 mm and width of 5,6 mm was achieved using laser beam. Results with electron beam were way better, because this technology allows to control the distribution of power along the beam width in order to improve the width/thickness ratio of hardened layer. Using this method maximal layer thickness of 1,4 mm and width of 13,4 mm was achieved.

Key words

rotary flash hardening, surface hardening, laser beam, electron beam, 42CrMo4

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KLUSÁČEK, Martin. *Rotační bleskové kalení s pomocí elektronového svazku a laserového paprsku*. Brno, 2019. 53 stran. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117730>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ing. Miloslav Kouřil, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Rotační bleskové kalení s pomocí elektronového svazku a laserového paprsku* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny a řádně citovány v seznamu použité literatury této práce.

Dne 24. 5. 2019

Martin Klusáček

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Miloslavu Kouřilovi, CSc. za odborné vedení diplomové práce. Velké díky také patří Bc. Janu Kouřilovi za věnovaný čas a pomoc v průběhu experimentu a Ing. Petru Valáškovu za ochotu, cenné rady a možnost využití zařízení firmy.

Obsah

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE	7
2 TEORETICKÁ ČÁST	9
2.1 Povrchové kalení.....	9
2.1.1 Kalení plamenem	9
2.1.2 Indukční kalení	10
2.1.3 Plazmový ohřev	11
2.2 Vybrané vlastnosti ocelí.....	13
2.2.1 Tepelná kapacita	13
2.2.2 Tepelná vodivost.....	13
2.2.3 Prokalitelnost	14
2.3 Termodynamika, termomechanika	16
2.3.1 Fourierův zákon	16
2.3.2 Newtonův zákon ochlazování	17
2.4 Technologie elektronového paprsku	18
2.4.1 Interakce s povrchem	19
2.4.2 Zdroj paprsku	19
2.4.3 Optika.....	20
2.4.4 Aplikace	20
2.5 Laserové technologie	23
2.5.1 Vznik laserového paprsku.....	23
2.5.2 Pevnolátkové lasery	23
2.5.3 Plynové lasery.....	24
2.5.4 Aplikace	25
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
3.1 Použitý materiál	27
3.2 Použitá zařízení	28
3.2.1 Elektronové dělo	28
3.2.2 Laserové zařízení	29
3.3 Metody vyhodnocení	30
3.3.1 Příprava vzorků.....	30
3.3.2 Měření mikrotvrdosti	30
3.4 Parametry experimentu	31
3.4.1 Rovinné kalení elektronovým svazkem	31
3.4.2 Rovinné kalení laserovým paprskem	32
3.4.3 Rotační kalení elektronovým svazkem	32

3.4.4 Rotační kalení laserovým paprskem	34
4 VÝSLEDKY	36
4.1 Kalení elektronovým svazkem	36
4.1.1 Rovinné kalení	36
4.1.2 Rotační kalení	37
4.2 Laserové kalení	40
4.2.1 Rovinné kalení	40
4.2.2 Rotační kalení	41
5 DISKUZE	45
6 ZÁVĚRY	48
7 LITERÁRNÍ ZDROJE	49
8 SEZNAM OBRÁZKŮ.....	51
9 TABULKOVÉ A GRAFICKÉ PŘÍLOHY	53

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Využití elektronového svazku a laserového záření pro povrchové kalení a odvozené úpravy povrchu, je výhodné pro možnost přesné lokalizace exponované plochy i na místa, kde nejsou z různých příčin a důvodů použitelné klasické technologie (indukční ohřev, ohřev plamenem apod.). Např. součást je příliš velká pro umístění do indukčního kalicího zařízení, kalená plocha je tvarově komplikovaná nebo situovaná takovým způsobem, že klasickými prostředky ji nelze ohřát ani ochladit. Ve srovnání s tím umožňují obě uvedené moderní technologie kalení tvarových prvků v otvorech, vytvářet malé kalené plochy na rozměrných součástech, přizpůsobovat okamžitý dodávaný výkon sklonu a tvaru kalené plochy aj.

Naproti tomu, ochlazení ohřáté plochy dostatečnou (z hlediska zakalení nadkritickou) rychlostí je u laseru i elektronového svazku zabezpečeno pouze vnitřním odvodem tepla do hmoty součásti bez možnosti využití vnějšího kalicího prostředí. To s sebou nese omezení hloubky prokalené vrstvy, která bývá všeobecně do cca 1 mm.

Další nevýhodou je, že kalená (ohřátá a posléze ochlazená) stopa má určitou šířku a při kalení větší plochy jsou stopy kladeny vedle sebe. Tím vznikají oblasti s nižší tvrdostí, ať už z příčiny mezery mezi stopami (nezakalené pásy) nebo naopak částečného popuštění předchozí stopy (částečné překrytí stop).

Při dosud používaném laserovém nebo elektronovém kalení rotačních (válcových) povrchů dochází pak k tomu, že kalená vrstva vzniká po obvodu válce postupně, za pomalé rotace. Při pootočení o 360° se nově ohřátá oblast „potká“ s oblastí již zakalenou a dojde ke vzniku měkkého místa v povrchu kaleného válce, a to na stejném principu, jako při kladení stop vedle sebe.

Princip stacionárního (součást se nehýbe) bleskového kalení spočívá v jednorázovém velmi rychlém ohřevu určité plochy (tvar, velikost) skenujícím paprskem a ochlazení (zakalení) plochy vnitřním odvodem tepla kalené součásti. Předpokladem je dostatečný výkon a technická úroveň zařízení, která umožní sofistikované skenování a řízení výkonu paprsku na ohřívání ploše. Ohřev plochy je kvazispojitý. Paprsek skenuje takovou rychlostí, že exponovaná plocha se na pohled ohřívá jako celek. Protože se jedná o rychlé skenování ve dvou osách, je nutno skenovací frekvence přizpůsobit tak, aby vznikající Lissajousovy obrazce vykryly ohřívanou plochu co nejlépe i s využitím určitého rozostření svazku.

Rotační bleskové kalení je dosud pravděpodobně nevyužívanou možností modifikace předchozího principu. Jedná se o ohřev rotační plochy (válec, kužel), která je za rotace (řádů 10^3 min^{-1}) exponována např. v povrchové přímce (površce) paprskem o dostatečném výkonu. Díky rotaci se výkon rozprostře po celém povrchu rotační plochy a je-li ohřev dostatečně rychlý, dosáhne se podobného efektu jako při běžném stacionárním bleskovém ohřevu skenujícím svazkem. Tato technologie umožní např. kalení ložiskového čepu či kroužku pod gufero bez přítomnosti nežádoucích měkkých míst vznikajících při překryvu kalených stop. Maximální velikost zakalené plochy je podobně jako při stacionárním bleskovém kalení určena výkonem použitého zařízení. Dále je důležitá možnost modifikace výkonu svazku vzhledem k místu na kalené dráze; Na krajích ohřívání plochy je nutný vyšší výkon než uprostřed, aby se hloubka kalené vrstvy blížila pokud možno konstantě.

Další možnou modifikací rotačního kalení je bodový ohřev za dostatečně rychlé rotace. Ohřívání bod se díky rotaci a postupnému pohybu součásti ve směru osy rotace pohybuje na válcové ploše po šroubovici a k jedné otáčce (360°) dojde za menší čas, než dojde k ochlazení

a zakalení stopy. Stopa se tedy sama se sebou potká, ještě v austenitickém stavu. Rotace musí být v tomto případě velmi rychlá (pravděpodobně několikanásobně vyšší otáčky než v předchozím případě).

Oba výše popsané principy s sebou nesou omezení v podobě zmíněného maximálního výkonu zařízení (čím menší výkon zařízení, tím menší ohřivaná plocha a v případě rotačního principu i menší průměr kaleného válce). Při stejných rozměrových proporcích (poměr obvodu válce a šířky stopy) roste velikost ohřivané plochy s druhou mocninou průměru; Objem válce pod kalenou plochou pak roste s třetí mocninou průměru. S narůstajícím průměrem se tedy zvyšují požadavky na výkon zařízení s druhou mocninou, ale podmínky pro dostatečný odvod tepla se zlepšují s třetí mocninou průměru. Příliš malý průměr tedy znamená riziko objemového přehřátí a nedostatečného prokalení vrstvy.

Úkolem diplomové práce je

- postavit experimentální zařízení (motor s nastavitelnými otáčkami (měničem kmitočtu), s vhodným upínačem),
- ověřit princip, stanovit módy činnosti a základní parametry a meze pro laserové a elektronové zařízení
- provést základní sérii ověřovacích zkoušek s laserovým a elektronovým ohřevem
- Provést principiální srovnání laserového a elektronového ohřevu pro daný účel
- Naznačit směry dalšího možného vývoje

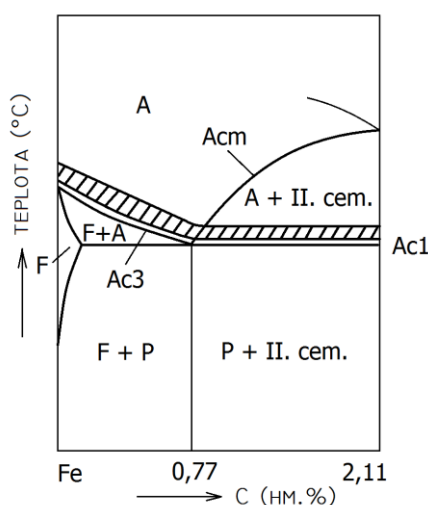
Projekt nebyl financován z žádného externího zdroje; Experimentální materiál a jeho příprava a pomůcky pro realizaci experimentů byly bezplatně získány, resp. zapůjčeny od společnosti Precise motion, a.s. Kuřim a Q.I.P., s.r.o. Brno.

Experimenty byly provedeny ve společnosti Precise motion, a.s. Kuřim (laserové kalení) a v laboratoři elektronového svazku NETME Centre FSI VUT v Brně.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Povrchové kalení

Kalení je druh tepelného zpracování, který se skládá z austenitizace, tj. ohřevu minimálně 40 °C (viz obrázek 1) nad teplotu fázové transformace feritu/perlitu na austenit, a ochlazování za takových podmínek, aby došlo k přeměně austenitu na martenzitickou strukturu [1]. Rychlost ochlazování musí být vyšší než kritická podle příslušného diagramu rozpadu austenitu. Její hodnota závisí na obsahu uhlíku a množství a druhu legujících prvků [2]. Kalení je prováděno za účelem zvýšení hodnoty meze únavy, tvrdosti, ořezavzdornosti a dalších vlastností materiálu. Pokud po kalení následuje popuštění za vysokých teplot, jde o tepelné zpracování s názvem zušlechťování [3].



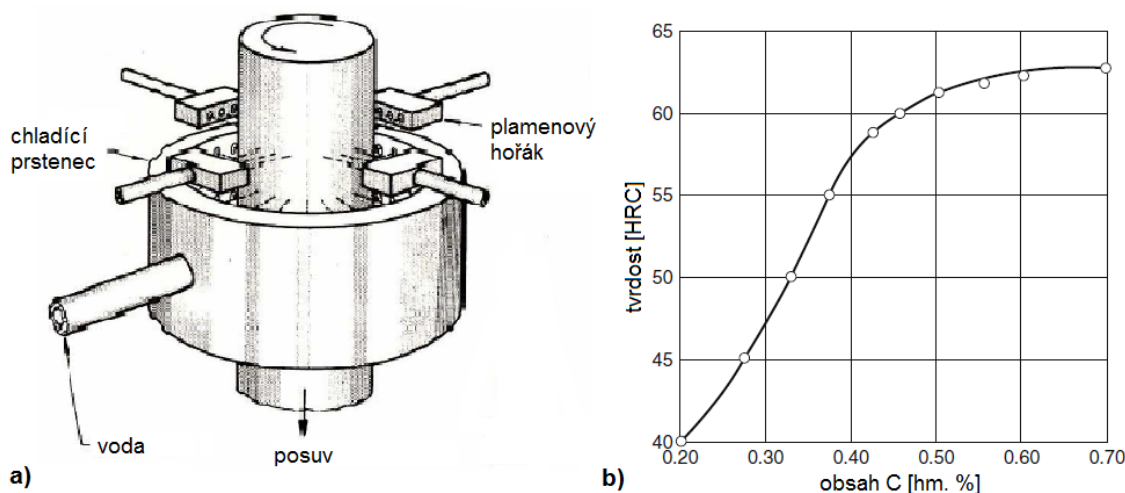
Obrázek 1: Oblast kalicích teplot pro podeutektoidní a nadeutektoidní oceli [4].

Rozlišujeme dva základní typy kalení, a to *objemové* a *povrchové*. Při objemovém kalení dochází ke strukturním změnám a změnám ve vlastnostech tělesa v celém jeho objemu. V druhém případě je cílem zvýšení tvrdosti pouze v povrchové vrstvě součásti za současného zachování houževnatosti jádra. Tepelného ovlivnění pouze blízkého povrchu se dosáhne dostatečně rychlým ohřevem povrchu na kalící teplotu, tak aby odvod tepla do jádra nebyl rychlejší než samotný ohřev, a následným rychlým ochlazením. K povrchovému kalení jsou vhodné oceli s obsahem 0,35 až 0,8 hm. % C nebo nízkolegované kalitelné oceli [1, 5].

Jednotlivé druhy povrchového kalení lze rozdělit podle použitého zdroje energie na kalení plamenem, indukční ohřev, ohřev plazmou, elektromagnetický ohřev, ohřev laserem a pomocí elektronového paprsku.

2.1.1 Kalení plamenem

Tento typ povrchového kalení je z ostatních metod nejstarší. Může být použit jak na malé, tak na větší součásti. Jedná se o intenzivní ohřev pomocí plamenového hořáku [6]. Nejčastěji se používá kyslíko-acetylenový plamen (3150 °C) [1]. Mezi parametry procesu patří rychlost pohybu hořáku, výkon plamene, množství kyslíku v plameni, vzdálenost zdroje od povrchu součásti a typ ochlazovacího média. Moderní aplikační stroje pro kalení plamenem jsou konstruovány jako CNC jednotky [6]. Na obrázku 2 je příklad zařízení pro kalení plamenem a závislost minimální dosažitelné tvrdosti na obsahu uhlíku v oceli.



Obrázek 2: a) Schéma zařízení pro povrchové kalení plamenem, b) závislost minimální dosažitelné tvrdosti na obsahu uhlíku v oceli [7].

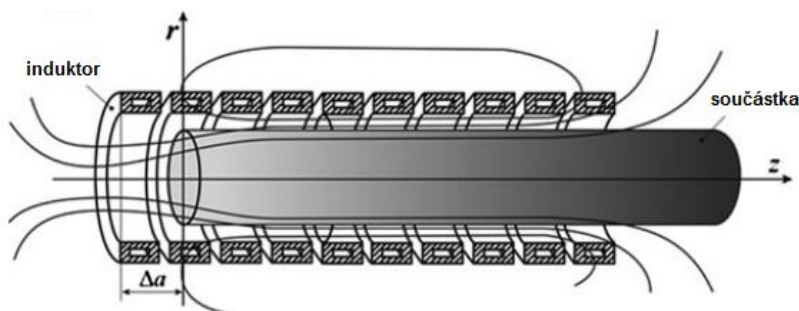
2.1.2 Indukční kalení

V tomto případě dochází k ohřevu povrchu součásti pomocí cívky (induktoru), kterou protéká elektrický proud o střední nebo vysoké frekvenci. Jelikož zpracovávaná kovová součást je elektrický vodič, indukuje se v něm magnetické pole – dochází k elektromagnetické indukci. Vzniklé vířivé proudy ohřívají povrch výrobku Joulovým teplem. Rovnice 1 určuje efektivní tloušťku zakalené vrstvy:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^7}{\mu \cdot f}} \cong 5030 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \text{ [mm]}, \quad (1)$$

kde δ [mm] je hloubka průniku magnetického toku pod povrch,
 ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$] měrný elektrický odpor,
 μ [1] relativní permeabilita,
 f [Hz] frekvence použitého střídavého proudu.

Z uvedeného vztahu je zřejmá nepřímá úměra tloušťky vrstvy a zvolené frekvence střídavého proudu procházejícího cívkou. Používané frekvence se pohybují okolo 5 000 Hz u středně-frekvenčních generátorů a až 2 MHz u generátorů vysoko-frekvenčních. Hloubku vrstvy dále ovlivňuje i rychlost a doba ohřevu. Ta bývá obvykle 1 až 6 mm. Stejně jako u ohřevu plamenem lze kalit součásti jednorázovým nebo postupným způsobem [1]. Indukční kalení se používá pro strojní součásti, zejména pak pro ozubená a řetězová kola, vačkové a klikové hřídele a jiné rozmanité součásti [6].

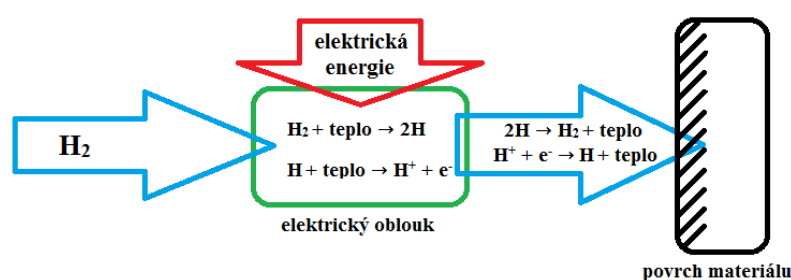


Obrázek 3: Schéma induktoru [8].

Obdobou kalení pomocí elektromagnetické indukce je tepelné zpracování zahrnující *elektromagnetický ohřev*, kdy je součást umístěna ve střídavém magnetickém poli. Na rozdíl od indukčního ohřevu je součást zapojena přímo v elektromagnetickém obvodu. Celý objem součásti se v tomto případě ohřívá hysterezními ztrátami [8].

2.1.3 Plazmový ohřev

Za plazma je považován ionizovaný plyn o vysoké teplotě a energii. Vyskytuje se jak v přírodě, tak jej lze generovat i uměle. Mezi přírodní zdroje plazmatu se řadí například bouřkové a nadoblačné blesky nebo polární záře [9]. Plazma umělé je nejčastěji generováno v elektricky neutrálním plynu, kde se dodáním energie vytvoří podmínky pro vznik elektronů a iontů. Existuje několik typů geneze plazmatu, a to podle druhu dodané energie. Může se jednat o energii dodanou z plamene elektrického obloukového výboje, vysokofrekvenčního magnetického pole nebo pomocí adiabatické komprese plynu [10].

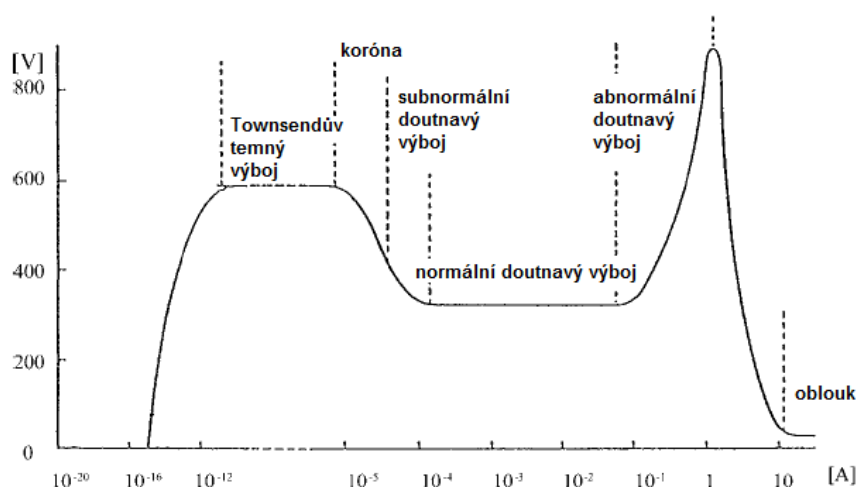


Obrázek 4: Příklad plazmového ohřevu pomocí vodíku a elektrického oblouku, vytvořeno podle [11].

Dle teploty lze plazma rozdělit na dva druhy, a to plazma *vysokoteplotní* a *nízkoteplotní*. V prvním případě se střední energie nabitých částic pohybuje nad 100 eV (okolo 10^6 K) [12]. Další charakteristikou plazmatu je tzv. *stupeň ionizace* α plynu. Jde o parametr, který charakterizuje hustotu nabitých částic v plazmatu. Matematicky je to podíl ionizovaných částic n_i na celkovém počtu částic v plynu n , viz rovnice 2:

$$\alpha = \frac{n_i}{n} [-]. \quad (2)$$

U plazmy dosažené nízkotlakým výbojem je typická hodnota stupně ionizace 10^{-6} až 10^{-3} . Pokud je ovšem přítomno i magnetické pole, může tato hodnota být až 10^{-2} a více [13].



Obrázek 5: Závislost elektrického napětí na elektrickém proudu pro různé druhy výboje [10].

Nejčastější metoda generování nízkoteplotního plazmatu pro technologické aplikace je vystavení elektricky neutrálního plynu elektrickému poli. Každý plyn, ač neutrální, obsahuje určité množství elektronů a iontů, které vznikají například díky interakci kosmického záření nebo radiace s částicemi plynu. Ty jsou vnějším elektrickým polem urychlovány a kolidují s ostatními částicemi použitého plynu, které pak vytváří samotné plazma. Obrázek 5 popisuje nízkoteplotní výboje ve vakuu – plazma s aplikací např. pro plasmovou nitridaci. Pro účely plazmového ohřevu povrchu za účelem kalení/přetavení se používá jako zdroj energie obloukový výboj (na obrázku 5 úplně vpravo, ale za normálního nebo zvýšeného tlaku) [10].

Díky svým vlastnostem lze plazma použít k ohřevu součástí u procesu kalení, protože ohřev je dostatečně intenzivní, aby došlo k zakalení materiálu vnitřním odvodem tepla. Mezi další způsoby zpracování povrchu materiálu, při kterých se využívá plazma, patří například povrchová modifikace polymerů, čištění křemíkových waferů, vytváření oxidických vrstev pomocí oxidového plazmatu, nebo vytvrzování nitridací a boridací [13].

2.2 Vybrané vlastnosti ocelí

Pro tepelné zpracování materiálu jsou důležité zejména ty vlastnosti, které bezprostředně ovlivňují vnitřní termomechaniku ohřevu a ochlazování tělesa (vedení, akumulaci a uvolňování tepla při ohřevu a ochlazování). Budou zmíněny ty, které patří k těm více zásadním s ohledem k tématu práce. Z tepelných vlastností je to tepelná kapacita a tepelná vodivost a z vlastností technologických prokalitelnost.

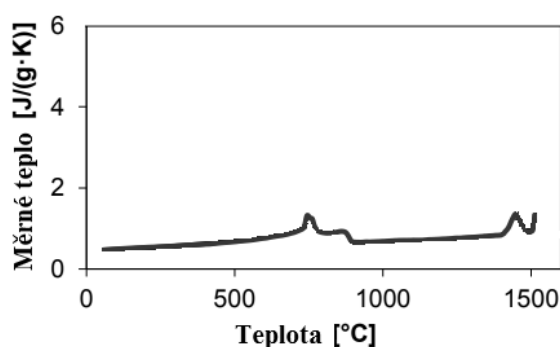
2.2.1 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita je množství energie potřebné k ohřátí látky o 1 °C. Zpravidla se stanovuje za konstantního tlaku nebo objemu. Rovnice 3 definuje měrnou tepelnou kapacitu jako parciální derivaci vnitřní energie U dané uzavřené soustavy podle termodynamické teploty T při konstantním objemu [14].

$$C_V = \left(\frac{\delta U}{\delta T} \right)_V \quad (3)$$

Jednotkou je $J \cdot K^{-1}$. Tato veličina vztažená na množství látky se nazývá *měrná tepelná kapacita* c (měrné teplo) a je definována jako podíl tepelné kapacity a hmotnosti dané látky, případně jejího molárního množství. Rozlišujeme tedy molární a měrnou tepelnou kapacitu. Jednotky jsou pak $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ nebo $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ [14]. Měrná tepelná kapacita s teplotou roste a při absolutní nule je nulová. Proto je tato hodnota udávána pro určitou teplotu nebo interval teplot [15].

Z hlediska tepelného zpracování je tepelná kapacita důležitá pro ohřev strojních součástí. Čím vyšší tato hodnota je, tím více energie je potřeba dodat pro dosažení určené teploty. Pro oceli při pokojové teplotě je hodnota měrné tepelné kapacity $450 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Na obrázku 6 je znázorněna teplotní závislost měrné tepelné kapacity nelegované oceli. Viditelné anomálie na uvedené křivce jsou způsobeny entalpiemi jednotlivých fázových přeměn, neboli tepla, které je při průběhu fázové přeměny spotřebované [14].



Obrázek 6: Teplotní závislost měrné tepelné kapacity nelegované oceli [14].

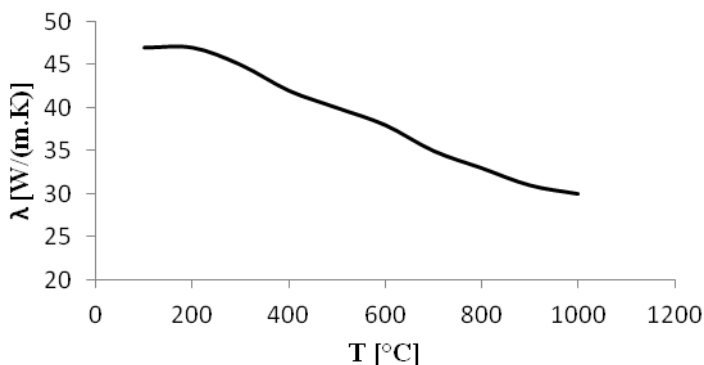
2.2.2 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost kovů je schopnost daného materiálu převádět tepelnou energii mezi dvěma body v případě, že je mezi nimi teplotní rozdíl. Materiálová charakteristika, která tuto schopnost popisuje, se nazývá součinitel tepelné vodivosti (neboli měrná tepelná vodivost) λ . Jde o experimentálně stanovenou konstantu udávající množství tepla, které projde plochou $1 m^2$ v tělese délky 1 m za 1 s při rozdílu teplot 1 °C, viz rovnice 4.

$$Q = \lambda S \tau \frac{T_1 - T_2}{L} \text{ [J]}, \quad (4)$$

kde L je vzdálenost rovin, ΔT rozdíl teplot, S obsah plochy a τ čas. $[\lambda] = \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [15].

Mechanismus přenosu tepla v kovech je spojen s elastickými kmity iontů v mřížce a s existencí valenčních elektronů. S teplotou tato vlastnost kovů klesá, viz obrázek 7. Po dosažení teploty tání materiálu se tepelná vodivost zpravidla mění skokem. Ten je způsoben přerušением pravidelné krystalové struktury [16].



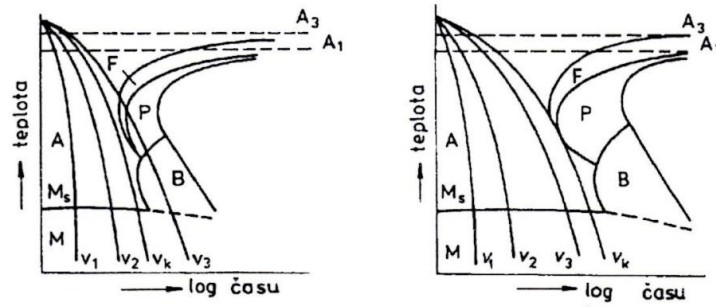
Obrázek 7: Teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti uhlíkové oceli [17].

Z hlediska technologie tepelného zpracování, obzvláště při povrchovém kalení s ochlazováním vnitřním odvodem tepla objemem tělesa, hraje tepelná vodivost důležitou roli. Vyšší tepelná vodivost způsobuje intenzivnější tepelný tok směrem do jádra tělesa, nižší gradient teploty a nižší vlastní napjatost. K vytvoření velmi teplé tenké vrstvy je tedy zapotřebí intenzivnějšího zdroje energie. Horší tepelná vodivost, např. u legovaných ocelí, naopak sice napomáhá vytvoření austenitické tenké vrstvy na povrchu, ale za cenu většího gradientu teploty, vyšší vlastní napjatosti a horší schopnosti materiálu pro zakalení vnitřním odvodem tepla [18].

2.2.3 Prokalitelnost

Prokalitelnost je technologická vlastnost, která bývá označována jako schopnost oceli získat po zakalení tvrdost odpovídající určitému obsahu martenzitu v určité hloubce pod povrchem a za dalších komplexně definovaných podmínek. Závisí na vztahu mezi kritickou (v_K) a skutečnou rychlostí ochlazování, která roste s rostoucí intenzitou odvodu tepla, se zvětšujícím se poměrem povrchu vzhledem k objemu předmětu a se zvyšující se tepelnou vodivostí daného materiálu. Kritickou rychlost lze snížit některými legujícími prvky, které posouvají diagram ARA směrem doprava, viz obrázek 8. Problémem je (zvláště u objemového kalení) nízká rychlost ochlazování v jádře (v_3) na rozdíl od vyšší rychlosti přímo u povrchu součásti (v_1). V jádře pak z důvodu nedostatečné rychlosti chlazení nedochází k úplné martenzitické přeměně, nýbrž jeho struktura je směsí feritu, perlitu, bainitu a martenzitu [4].

Mezi zmíněné prvky, které snižují kritickou rychlost ochlazování austenitu, patří například mangan, ale i uhlík, molybden, chrom a další v austenitu rozpuštěné přísady. S vyšším obsahem manganu se zpomaluje transformace austenitu a křivky ARA a IRA se posouvají doprava. To je jedním z parametrů zvýšení prokalitelnosti. [19].



Obrázek 8: Vliv přidání legur na polohu ARA diagramu podeutektoidní oceli: vlevo nelegovaná, vpravo legovaná [4].

Prokalitelnost lze kvantifikovat jen pokud je definována za konkrétních podmínek, tj. vztažena na geometricky přesně předepsané těleso s daným tepelným zpracováním – teplotou austenitizace, výdrží na teplotě a typem a dynamikou ochlazovacího prostředí (viz např. Jominyho čelní zkouška prokalitelnosti) [20].

Ve vztahu k povrchovému kalení odvodem tepla do tělesa je potřeba, aby zpracovávanému povrchu bylo dodáno určité množství energie pro dosažení dané teploty, ale které zároveň nemá způsobit natavení povrchu. Použitý materiál musí být také schopen takové množství tepla dostatečně rychle odvést dovnitř (ve vztahu ke kritické rychlosti ochlazování z diagramu ARA). Ke zvětšení prokalené hloubky lze využít legované oceli, ale pouze omezeně, jelikož se tímto zároveň snižuje tepelná vodivost materiálu – díky většímu gradientu teploty a složitější vlastní napjatosti bude mít větší sklon k natavení a praskání [3].

2.3 Termodynamika, termomechanika

Pomocí výše zmíněné tepelné kapacity lze počítat termodynamické výpočty a určovat tedy minimum potřebné energie, která se musí materiálu dodat, aby se její teplota změnila o určitou hodnotu. K tomuto účelu lze využít definiční vztah pro entalpii, viz rovnice 5,

$$dH = C_p \cdot dT, \quad (5)$$

kde H je entalpie, C_p molární tepelná kapacita za konstantního tlaku a T termodynamická teplota. Teplotní závislost $C_p = f(T)$ se vyjadřuje pomocí polynomu v rovnici 6. Hodnoty regresních parametrů a , b a c jsou tabelovány.

$$C_p = a + b \cdot T + c \cdot T^{-2} \quad (6)$$

V případě, že v daném teplotním intervalu neprobíhá žádná fázová přeměna, platí pro jednosložkovou homogenní soustavu vztah 7:

$$H_T^0 = H_0^0 + \int_0^T (a + b \cdot T + c \cdot T^{-2}) dT = H_0^0 + \left[a \cdot T + \frac{b}{2} \cdot T^2 - c \cdot T^{-1} \right]_0^T, \quad (7)$$

kde H_0^0 je integrační konstanta. Pokud ve vybraném teplotním intervalu k fázové přeměně dochází, je třeba počítat ještě s reakčním teplem každé z přeměn. Výpočtem pomocí uvedených vztahů lze přibližně určit nejmenší množství energie, která musí být dodána danému množství materiálu, aby se ohřál na určitou teplotu [21, 22].

2.3.1 Fourierův zákon

Přenos tepla v pevných látkách je charakterizován veličinou nazývanou tepelný tok q , který je definován jako

$$q = \frac{dQ}{dt}, \quad (8)$$

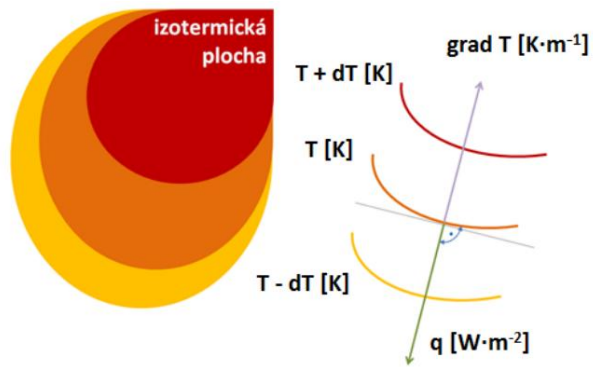
kde Q označuje množství přeneseného tepla a t uplynulý časový úsek. Jestliže se navíc uvažuje prostor (plocha S , kterou teplo prochází), lze definovat vektor hustoty tepelného toku \mathbf{q} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]:

$$\mathbf{q} = \frac{d^2Q}{dSdt} = \frac{dq}{dt}. \quad (9)$$

Fourierův zákon definuje hustotu teplotního toku jako součin gradientu teploty T [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$] a součinitele tepelné vodivosti λ následovně:

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (10)$$

Představa teplotního pole je názorně vyobrazena na obrázku 9. Vektory jsou v opačném směru, jelikož teplo se předává z oblasti o vyšší teplotě do oblasti s teplotou nižší [23].



Obrázek 9: Teplotní pole a izotermy [23].

2.3.2 Newtonův zákon ochlazování

Odvod tepla z materiálu do jeho okolí popisuje tzv. *Newtonův zákon ochlazování*. Ten říká, že rychlost ochlazování daného tělesa na vzduchu je přímo úměrná rozdílu teploty T tělesa a teploty T_v vzduchu. Časová závislost teploty tělesa pak může být zapsána do rovnice 11:

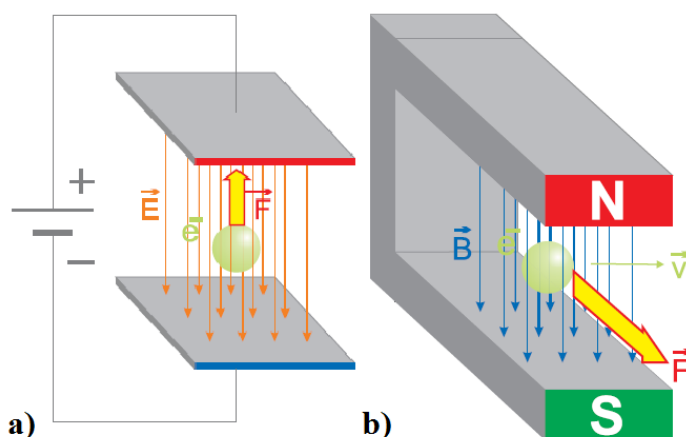
$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_v), \quad (11)$$

kde $k > 0$ je konstanta úměrnosti [24].

2.4 Technologie elektronového paprsku

Elektronový paprsek je úzký svazek urychlených elektronů. Získání volných elektronů pro vznik tohoto paprsku je třeba zahřátí emitující elektrody. Jelikož elektrony mají záporný náboj, lze je ovlivnit dvěma způsoby, viz obrázek 10:

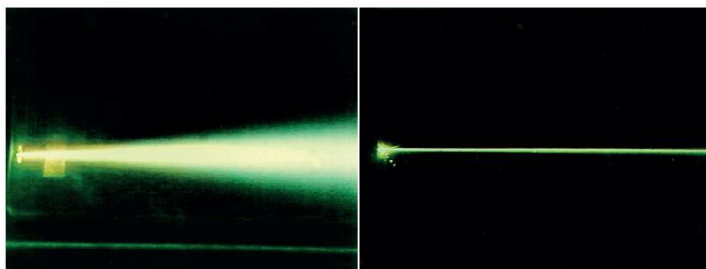
1. V elektrickém poli jsou elektrony urychleny díky *Coulombově síle* směrem k anodě. Energie, kterou při tomto procesu získají, je závislá na aplikovaném elektrickém napětí. Tato energie se pak odrazí na jeho rychlosti. Například při napětí 150 kV dosáhne elektron 63 % rychlosti světla.
2. V magnetickém poli na elektrony působí *Lorentzova síla*. V tomto případě se částice pohybují rovnoměrnou rychlostí ve směru siločar.



Obrázek 10: Schéma urychlování elektronu v a) elektrickém a b) magnetickém poli.

Magnetická pole jsou používána k formování a vychylování paprsku a také tvoří magnetické čočky [25].

Elektrony v paprsku jsou díky jejich zápornému náboji vychylovány atomy, tzn. při kontaktu se zpracovávanou součástí i při průchodu plynem. Pokud svazek prochází plynem, je rozptylován jeho částicemi, a tudíž se stává širším, kvůli mnohočetným rozptylům. Jelikož hustota svazku s jeho rozptylem klesá, upřednostňuje se práce ve vakuu. Srovnání šířky elektronového svazku ve vakuu a ve zbytkovém plynu je vidět na obrázku 11 [25].



Obrázek 11: Elektronový svazek ve zbytkovém plynu (vlevo) a ve vakuu (vpravo) [25].

2.4.1 Interakce s povrchem

Hlavním cílem expozice povrchu materiálu elektronovým svazkem je ohřátí materiálu. Tento jev probíhá přeměnou kinetické energie urychlených částic na energii tepelnou. Elektrony při kontaktu s povrchem penetrují do určité hloubky. Hloubka penetrace závisí na energii elektronů, tedy použitém urychlovacím napětí a na hustotě materiálu. V tabulce 1 jsou uvedeny příklady míry absorpce elektronů různých prvků.

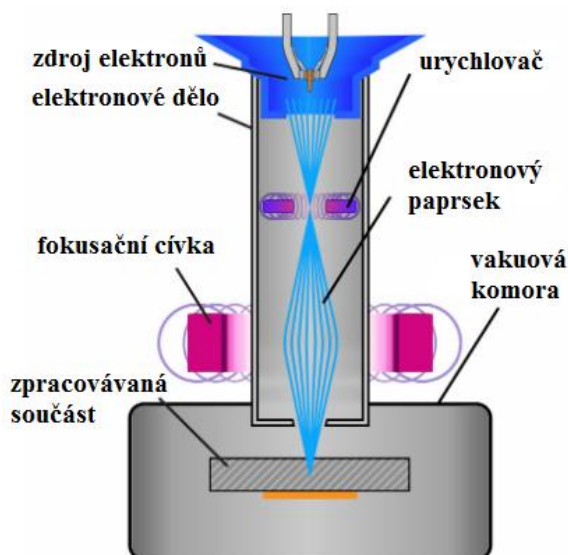
Tabulka 1: Hloubka penetrace elektronů pro různé prvky [25].

	Mg	Al	Ti	Cu	Fe	W
60 kV	35 μm	23 μm	14 μm	7 μm	8 μm	3 μm
120 kV	112 μm	72 μm	43 μm	22 μm	25 μm	10 μm

Elektrony jsou při interakci s povrchem materiálu buď absorbovány, nebo odraženy zpět z materiálu. Tyto zpětně odražené elektrony mohou být použity na pozorování povrchu. Část energie elektronů je vyzářena jako rentgenové vlny (paprsky X), proto je nutné, aby byla pracovní komora adekvátně odstíněna [25].

2.4.2 Zdroj paprsku

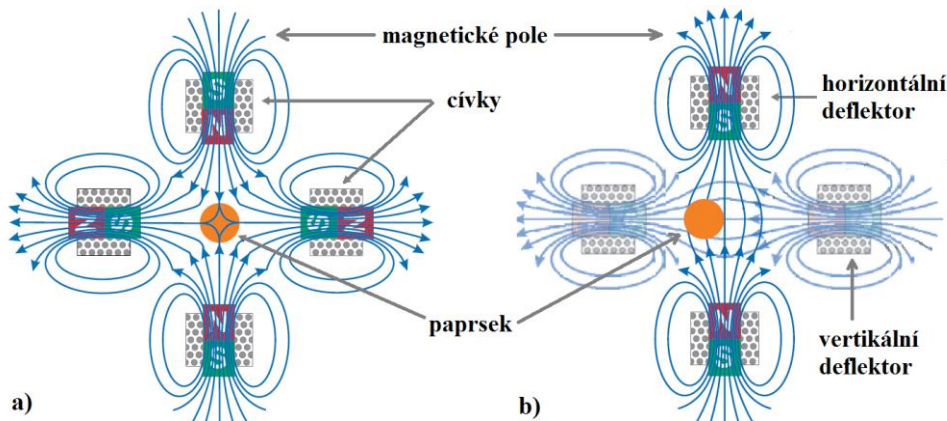
Zásadní pro zdroj elektronového svazku je materiál, který je schopný volné elektrony při vysoké teplotě vyzářovat. Nejčastěji jsou využívány katody z wolframu, a to díky své vysoké teplotě tavení (3422 °C). Wolfram náleží do VI. B skupiny se svou elektronovou konfigurací $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^4 6s^2$ disponuje šesti valenčními elektrony [26]. Mezi další materiály používané jako katody patří tantal (Ta) a borid lanthanový (LaB_6). Katoda je ohřívána buď přímo elektrickým proudem, nebo přidavným topným tělesem. Teplem uvolněné volné elektrony jsou pak urychlovány aplikovaným elektrickým napětím mezi katodou a anodou. Schematické znázornění konstrukce elektronového děla je na obrázku 12 [25].



Obrázek 12: Schéma elektronového děla [27].

2.4.3 Optika

Aby bylo možné s elektronovým paprskem pracovat, tj. vést ho od jeho zdroje ke zpracovávané součásti, musí být v soustavě přítomny elektromagnetické čočky. Ty, stejně jako je tomu u optických čoček např. u světelných zařízení, slouží k zaostřování. Elektromagnetické čočky se skládají z cívek, kterými prochází elektrický proud. Uvnitř cívků je generováno pole, které vychyluje elektronový svazek. Ohnisková vzdálenost závisí na energii elektronů, elektrickém proudu v cívkách a jejich designu. Na rozdíl od optických čoček ty elektromagnetické mohou fokus svazku měnit, a to velice rychle.



Obrázek 13: Schéma soustavy elektromagnetických čoček, a) nevychýlený paprsek, b) paprsek vychýlený úpravou pólů cívek [25].

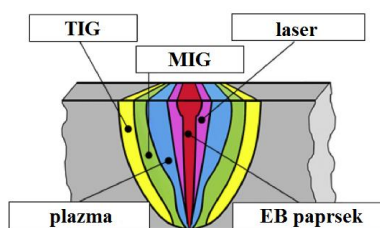
Systémem dvou cívek umístěných kolmo k elektronovému paprsku lze svazek vychylovat do stran, viz obrázek 13. Přidáním další dvojice cívek posunutých o 90° od první lze paprsek vychylovat v druhé ose. Je pak tedy možný pohyb svazku libovolně po zpracovávané součásti. Ovládním intenzity elektrického proudu protékajícího cívkou lze řídit velikost vychýlení. Kromě směru lze pomocí deflektorů upravovat i tvar svazku – zamezuje se tak efektu astigmatismu pro dosažení kruhového průřezu svazku [25].

2.4.4 Aplikace

Díky velké variabilitě nastavení elektronového paprsku lze tuto technologii aplikovat v různých oblastech zpracování strojních součástí.

Svařování

Nejrozšířenějším použitím elektronového svazku je svařování. Nejčastěji je využíváno v automobilovém a leteckém průmyslu, elektronice a strojním inženýrství, a to k úpravě nelegovaných/legovaných ocelí, nezelezných kovů i kovů citlivých na čistotu ochranného plynu. Tato technologie zaručuje vysoce kvalitní svarové spoje. Díky velké hustotě energie (až 10^7 W/cm^2) a malého průměru elektronového svazku lze zhotovovat svary o tloušťce v širokém rozmezí od 0,025 mm až 300 mm [28]. Mezi výhody patří možnost kusového svařování, ale zároveň je možná i hromadná výroba. Naopak tato technologie je limitována rozměry vakuové komory, výkonem zařízení a nemožností svařování 3D profilů (pokud není použit princip elektronového děla na robotickém rameni uvnitř vakuové komory). Nevýhodou je též omezení zpracování magnetických materiálů. I slabé pole v okolí zpracovávané součásti vytvořené zbytkovým magnetizmem materiálu má významný vliv na geometrii (průřez a zakřivení) svazku a při svařování může docházet k nepřesnostem [29].



Obrázek 14: Geometrie jednotlivých typů svařovacích technologií [28].

Hlavní výhodou využití elektronového svazku pro svařování je unikátní poměr mezi hloubkou a šířkou svaru, který je z používaných metod největší (viz obrázek 14).

Novější aplikací ohřevu elektronovým svazkem jsou metody povrchových úprav, které se v závislosti na skupenství povrchové vrstvy ve fázi ohřevu dělí na pochody:

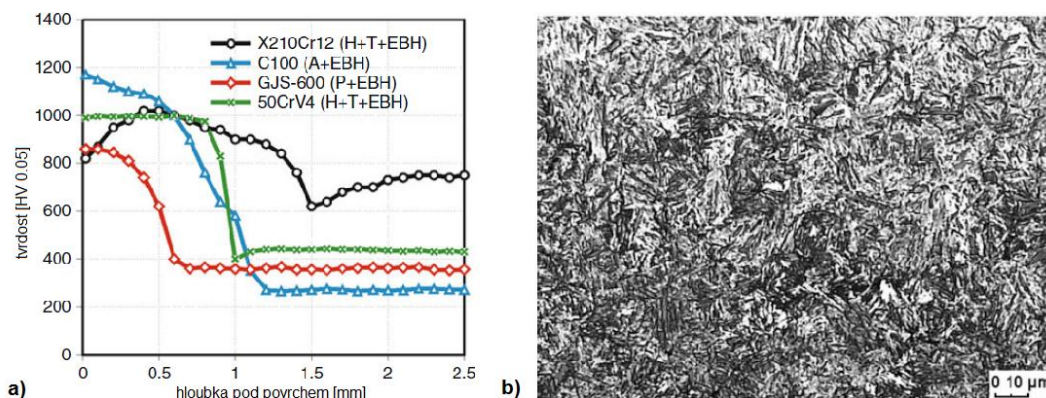
- V tuhé fázi
- V kapalně fázi

U pochodů v tuhé fázi se může jednat o veškeré metody tepelného zpracování, tj. žíhání a popouštění povrchové vrstvy, ale hlavně o povrchové kalení u ocelí, případně litin, u neželezných kovů a speciálních litin pak analogicky o metody u nich používané. Oproti klasickým metodám spočívá hlavní rozdíl v rychlosti změny teploty, a to jak při ohřevu, tak při ochlazování.

Pochody v kapalně fázi obsahují natavení povrchové vrstvy. Samotné přetavení vede ke zjemnění struktury a zlepšení vlastností, u grafitických litin vede ke změně struktury na ledeburitickou. Součástí tohoto pochodu může být i martenzitická přeměna, neboli zakalení vrstvy. Natavení může být dále spojeno s dodáním rozpustné přísady (např. Cr, Ni), pak jde o *povrchové legování*. V případě přidání nerozpustných (např. keramických) částic jde o tzv. *povrchovou dispergaci*. Přidavné materiály mohou být dodávány v podobě prášku nebo drátu. Takto mohou být vytvářeny i nové povrchové vrstvy neboli *návary*.

Povrchové kalení

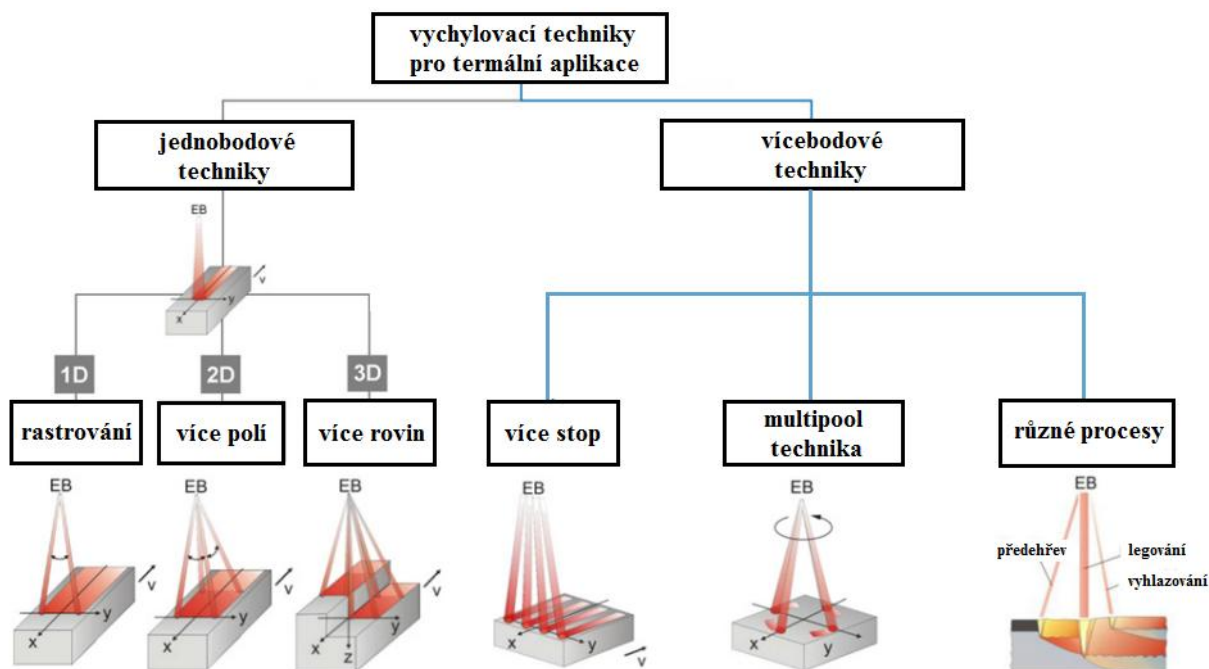
Při povrchovém kalení elektronovým svazkem dochází k velmi rychlému ohřevu povrchu materiálu nad teplotu austenitizace, teplota ale nesmí přesáhnout teplotu tavení. Hustota energie se v tomto případě pohybuje v jednotkách kW/mm^2 . Rychlým ochlazováním studenějším objemem tělesa (10^4 – 10^5 K/s) se docílí jemnozrnné zakalené struktury se znatelně vyšší tvrdostí, než lze dosáhnout u ostatních metod povrchového kalení jako je indukční kalení nebo kalení plamenem, viz obrázek 15 [7, 28].



Obrázek 15: a) Průběhy tvrdostí u ocelí po EB kalení, b) martenzitická struktura dosažená EB kalením [7].

Při vhodném nastavení parametrů svazku, kdy ještě nedochází k natavování povrchu, je drsnost povrchu stejná jako před procesem kalení a díky vakuu není kalení na vzhledu povrchu součásti ani viditelné. Prokalené hloubky se mohou pohybovat až k několika milimetrům.

Elektronový svazek se po povrchu součásti může pohybovat různými způsoby, viz obrázek 16. Dají se dělit na jednobodové a vícebodové. Dále také podle směru posuvu a typu a počtu probíhajícího tepelného zpracování [28].



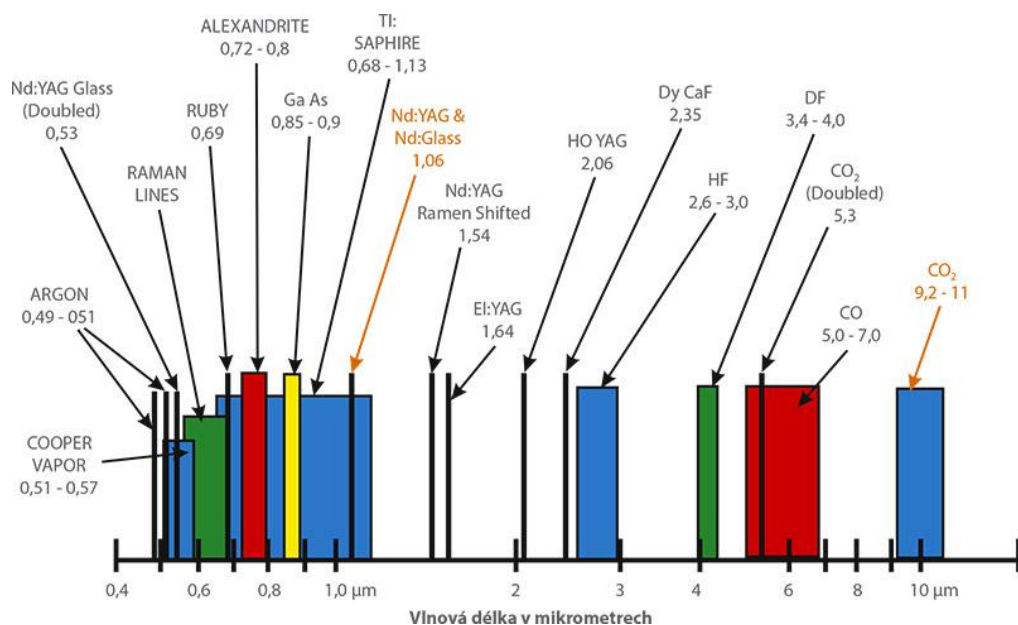
Obrázek 16: Různé vychylovací techniky pro termální aplikace elektronového svazku [28].

2.5 Laserové technologie

Laserové technologie jsou vysoce výkonné, relativně jednoduché a rychlé. V principu jsou mladší než technologie elektronového svazku a podobně jako u nich je jejich typickou vlastností nejprve koncentrace energie do malého bodu. V současné době nacházejí uplatnění ve velmi široké škále nejen průmyslových odvětví. Typickými strojírenskými aplikacemi jsou řezání, svařování, navařování a povrchové kalení [30].

2.5.1 Vznik laserového paprsku

Laser (neboli Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je zařízení, které umožňuje transformovat neorganizovanou, tzv. čerpací energii (elektrická, chemická, světelná) do energeticky vysoce koncentrovaného paprsku monochromatického koherentního elektromagnetického záření. Tento paprsek může být pulzní nebo kontinuální. Obrázek 17 ukazuje vlnovou délku výsledného záření, která závisí na typu laseru. Vzniku takového záření se dosahuje excitací atomů a molekul použitého aktivního média. Dodaná energie se zpětně vyzařuje a zrcadlovým systémem je soustředěna do jediného paprsku laseru [31].



Obrázek 17: Vlnové délky vybraných typů laserů [32].

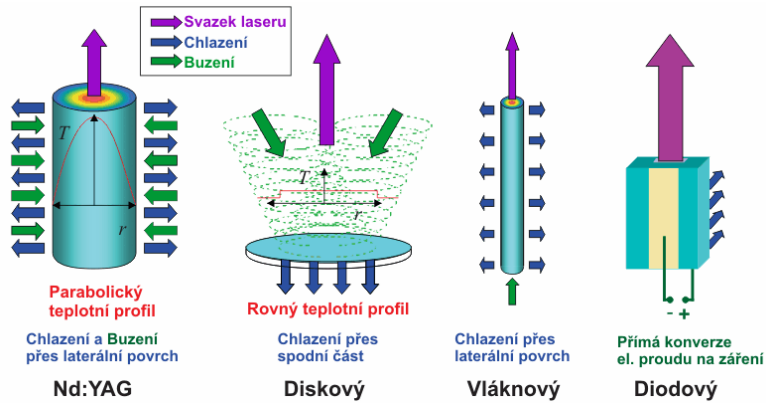
Podle typu aktivního média se lasery mohou dělit na *plynové* a *pevnolátkové*. Konkrétních typů a konstrukcí existuje velké množství. Pro technologické účely se nejčastěji používá plynový CO₂ laser a z pevnolátkových pak tyčinkové, diskové a vláknové lasery a dále polovodičové, neboli diodové lasery [31].

2.5.2 Pevnolátkové lasery

Mezi tento typ laserů řadíme lasery Nd:YAG, diskové a vláknové. Zmíněné druhy se liší především tvarem aktivního prostředí, které tvoří YAG krystal (ytrium aluminium granát) dopovaný ionty neodymu (Nd). Nd:YAG lasery mohou být buzené buď výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state) nebo diodami (DPSS – diode pumped solid state). Na obrázku 18 jsou znázorněny různé tvary aktivního média. U Nd:YAG laseru (vlnová délka 1,06 μm) je to tyčinka (dlouhá přibližně 15–20 cm, průměr ~1 mm), u diskového je to tenký disk (průměr

10 mm, tloušťka 0,25 mm) a u vláknového laseru je to dlouhé optické vlákno (délka ~1 m, průměr 50–300 μm) [31].

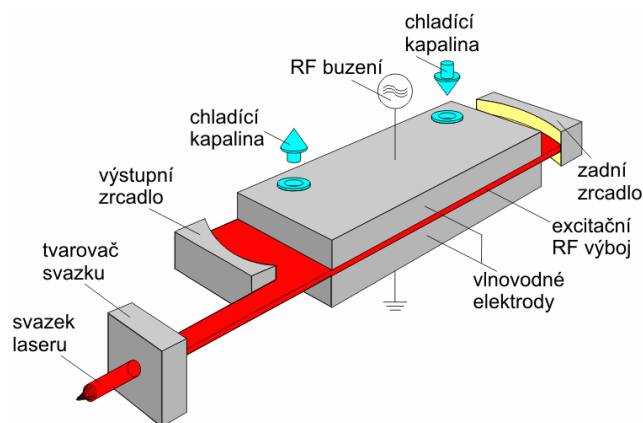
Vlnová délka Nd:YAG laserů (1,06 μm) umožňuje vést laserový paprsek vláknovou optikou, tedy, tedy flexibilním pasivním optickým vláknem až na místo aplikace. To je značnou výhodou proti plynovému CO₂ laseru.



Obrázek 18: Různé tvary laserových aktivních médií [31].

2.5.3 Plynové lasery

Plynové lasery mají na rozdíl od pevnolátkových aktivní prostředí v plynném skupenství. Konkrétně u CO₂ laseru se jedná o směs plynů obsahující oxid uhličitý. Buzení probíhá nejčastěji buď radio-frekvenčně (RF) nebo elektrickým výbojem. Na obrázku 19 je znázorněn princip RF buzení aktivního plynu. To probíhá mezi elektrodami, které díky své velké ploše usnadňují chlazení plynu. CO₂ lasery se vyznačují poměrně nízkými provozními náklady. Také pro svou dlouhou životnost a spolehlivost jsou průmyslově velmi rozšířené a úspěšně se aplikují na gravírování a řezání nekovových materiálů (nižší výkony, zpravidla do 1,5 kW), ale také na řezání a svařování kovů (do 20 kW). Nevýhodou u těchto laserů je nemožnost vedení paprsku optickými vlákny kvůli jejich vlnové délce (10,6 μm) – používají se zrcadla [31].



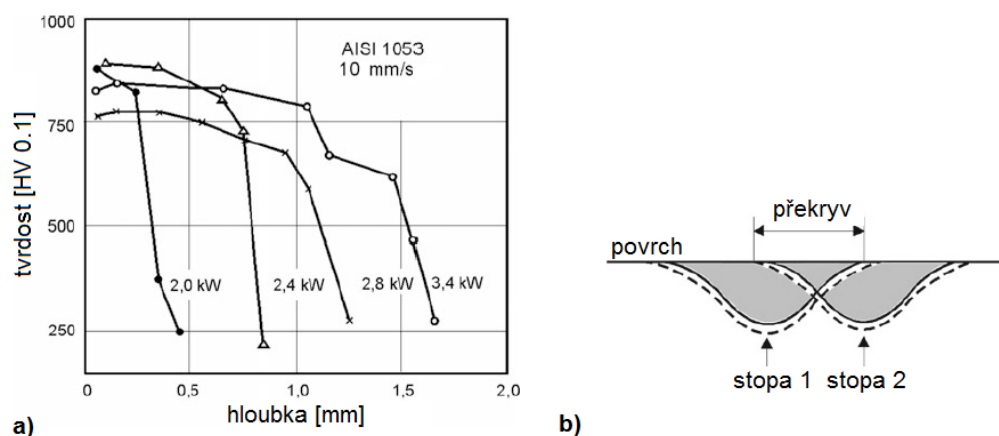
Obrázek 19: Schéma zdroje CO₂ laseru [31].

2.5.4 Aplikace

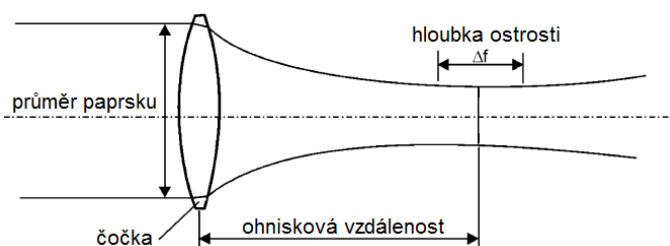
Podobně jako u elektronového svazku lze u laserových aplikací definovat pochody v tuhé a kapalné fázi. Laserový paprsek je tak úspěšně využíván při svařování, navařování vrstev, legování, texturování a také při povrchovém kalení strojních součástí. [7].

Povrchové kalení

Stejně jako u technologie elektronového svazku se tu uplatňuje schopnost sebezakalení materiálu vnitřním odvodem tepla. Účelem povrchového kalení pomocí laserového paprsku je vytvořit na vybraných místech povrchu materiálu místa s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení. Zaostřeným paprskem je skenován povrch – dochází tak k rychlému ohřevu materiálu (ideálně na cca 1200 °C) a jeho rychlému ochlazení odvodem tepla do objemu tělesa. Při zpracování většího povrchu se provádí skenování s překryvem kalených stop, viz obrázek 20b. Závislost zakalené hloubky na použitém výkonu zdroje laseru je vidět na obrázku 20a. Na obrázku 21 je zjednodušené schéma optické soustavy laseru [7].

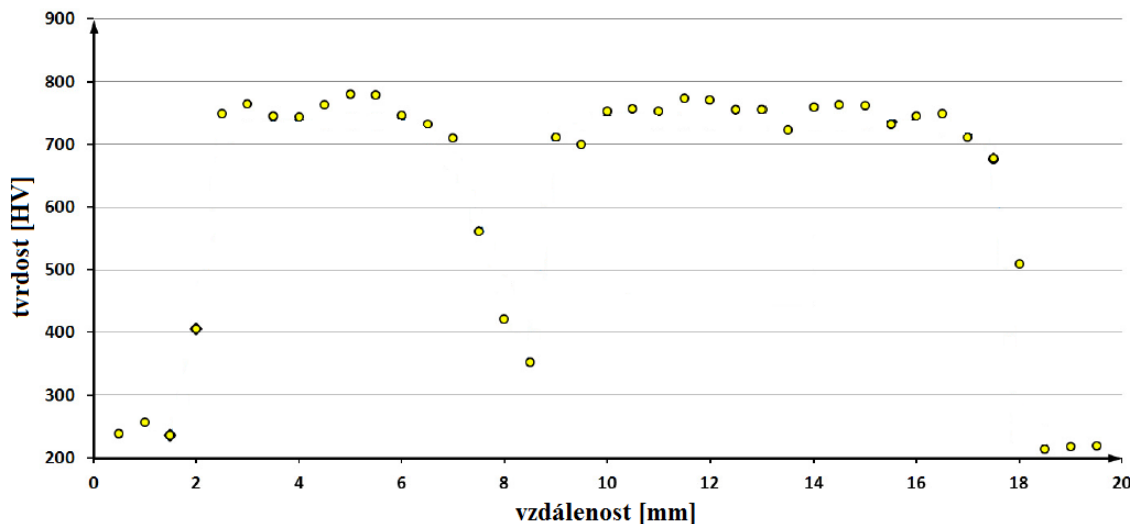


Obrázek 20: a) Závislost průběhu tvrdosti na použitém výkonu zdroje laseru, b) překryv tepelně ovlivněných zón při skenování povrchu [7].

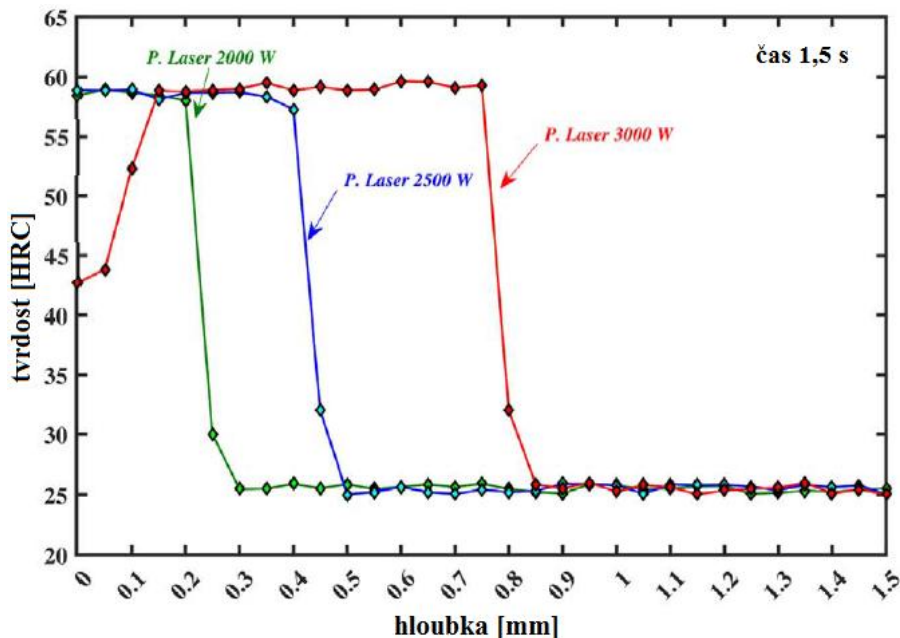


Obrázek 21: Schéma optické soustavy laseru [7].

Kalení pomocí laserového paprsku lze aplikovat na rovinné i rotační plochy. V případě rovinného kalení se paprskem skenuje povrch. U kalení ploch větších rozměrů je potřeba klást jednotlivé stopy vedle sebe. Konvenční kalení rotačních součástí probíhá po obvodu válcového povrchu během jedné otáčky součásti. Při překryvu stop pak ale dochází ke vzniku měkkých míst kvůli opětovnému zahřátí již zakalené struktury, viz obrázek 22. Možný je ovšem i režim bleskového ohřevu, kdy při rychlé rotaci vzorku dochází k zahřátí celého obvodu najednou. Tím se předchází vzniku měkkých míst kvůli překryvu stop. Zakalená hloubka je pak funkcí výkonu laserového paprsku, jeho průměru a času ozáření. Příklad výsledku rotačního bleskového kalení oceli 36CrNiMo4 je na obrázku 23, kde byly válcové vzorky za rotace 5 000 ot./min kaleny laserem o různých výkonech [30].



Obrázek 22: Pokles podpovrchové tvrdosti při 40% překryvu stop kalených laserem [33].



Obrázek 23: Závislost zakalené hloubky na různých výkonech laserového paprsku aplikovaného na válcové vzorky z materiálu 36CrNiMo4 [30].

Výhodami procesu kalení laserem je možnost plné automatizace, minimální změny rozměrů zpracovávané součásti a schopnost kalit i velmi malé součástky komplexních tvarů. Proces je také vhodný jak pro kusovou tak i pro sériovou výrobu. Problémem je nehomogenní distribuce energie v laserovém paprsku a v některých případech špatná absorpce energie povrchem materiálu. Z tohoto důvodu se často používá tzv. absorbentů, které se nanáší na povrch součásti a zajišťují zlepšení absorptivity. Základním požadavkem na tyto látky je nereaktivita se základním materiálem a jejich snadné nanášení na povrch [34].

Na rozdíl od technologie elektronového svazku nevyžadují lasery jako pracovní prostředí vakuum. Ochranné působení vakua je zde nahrazováno vhodným ochranným plynem (Ar, N₂). Laserová technologická zařízení nejsou tedy prostorově omežována velikostí vakuové komory. Protože laserové záření tvoří elektricky neutrální fotony, jsou lasery též aplikovatelné pro řezání a jiné druhy zpracování elektricky nevodivých materiálů, jako je keramika, sklo, ale i dřevo a textilie [5].

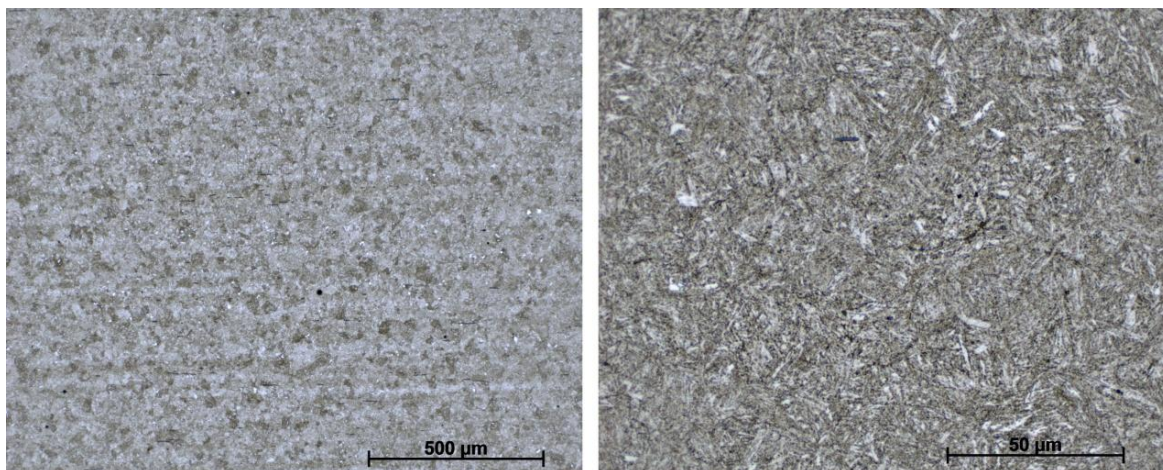
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použitý materiál

Jako zkušební materiál byla vybrána běžně užívaná nízkolegovaná ušlechtilá chrom-molybdenová ocel 42CrMo4 (15142). Ocel je typově vhodná k zušlechťování, nitridaci, ale též k povrchovému kalení. Zušlechťování vzorků bylo provedeno s ohřevem v ochranné atmosféře a kalením v oleji. Bylo použito kalicí teploty 860 °C, a teploty 70 °C u kalicího oleje Durixol W72. Popuštění bylo provedeno při teplotě 600 °C po dobu dvou hodin. Takto byl získán pro použitou ocel standardní strukturní stav, tedy sorbitická struktura (viz obrázek 24) o mezi pevnosti cca 1 000 MPa. Směrné chemické složení použité oceli je uvedeno v tabulce 2. Ostatní vlastnosti materiálu jsou uvedeny v materiálovém listu v příloze 1.

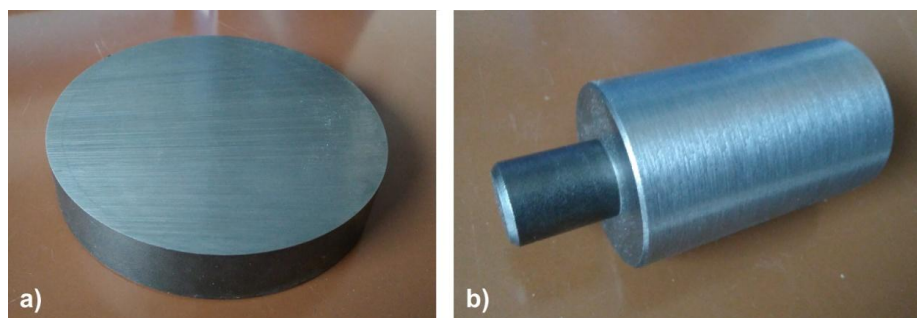
Tabulka 2: Chemické složení oceli 42CrMo4.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
min. %	0,38	0,15	0,50	-	-	0,90	0,15	-	-
max. %	0,45	0,35	0,80	0,035	0,035	1,20	0,25	-	-



Obrázek 24: Původní mikrostruktura použité oceli 42CrMo4 při zvětšení 100x (vlevo) a 1000x (vpravo).

Vzorky pro rovinné kalení byly vyrobeny ve formě kotoučů o průměru 125 mm a tloušťce 30 mm. Funkční plochy byly přebroušeny na rovinné brusce. Materiál pro rotační kalení byl dodán jako válcovaná tyč o průměru 40 mm. Z této tyče byly po zušlechťování vyrobeny vzorky s válcovou částí pro povrchové kalení a průměru 37 mm a délce 60 mm. Zmenšený průměr (15 mm) byl použit pro upnutí do sklíčidla motoru, viz obrázek 25.



Obrázek 25: Vzorky pro experiment a) rovinného, b) rotačního kalení.

3.2 Použitá zařízení

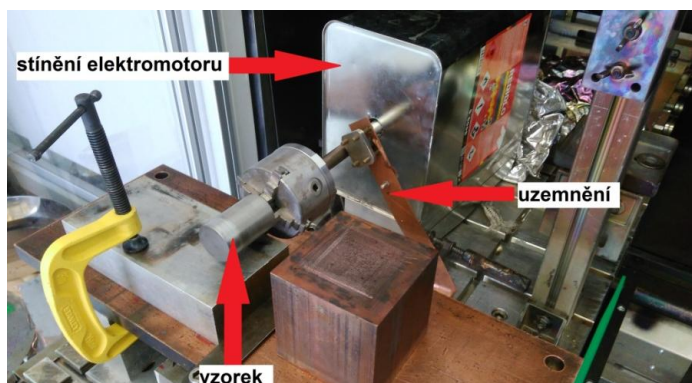
3.2.1 Elektronové dělo

Experimentální zkoušky povrchového kalení rovinných i rotačních ocelových vzorků probíhaly v laboratoři technologie elektronového svazku spadající pod NETME Centrum – Centrum technologií pro strojírenství, divize progresivních kovových materiálů. Bylo použito zařízení PROBEAM K26. Jde o univerzální vakuovou komoru s víceosým numericky řízeným polohovacím systémem, s elektronovým dělem umožňujícím horizontální i vertikální svařování. Dále je zařízení osazeno manipulátorem pro podávání drátu do prostoru svaru či návaru. Komora obsahuje průchodky pro přívod procesních a inertních plynů, chladicí vody a případné osazení dalších přístrojů, našem případě k zapojení motoru pro prováděné zkoušky. Celé zařízení je ovládáno řídicím systémem Siemens Sinumerik. V možnostech zařízení je svařování běžných i reaktivních kovů. Umožňuje tepelné zpracování povrchu včetně kalení vnitřním odvodem tepla, přetavování povrchu, legování povrchové vrstvy a vytváření návarů z běžných i speciálních materiálů.

Tabulka 3: Technická specifikace zařízení PROBEAM K26.

objem komory	2,6 m ³
rozměry pracovního stolu	500 × 800 mm
maximální výška	700 mm
maximální hmotnost dílu	až 500 kg
pohyb v osách x, y	500 × 800 mm
maximální výkon svazku	15 kW
maximální proud svazku	100 mA
urychlovací napětí	80 až 150 kV
vakuum	až 10 ⁻⁶ mbar

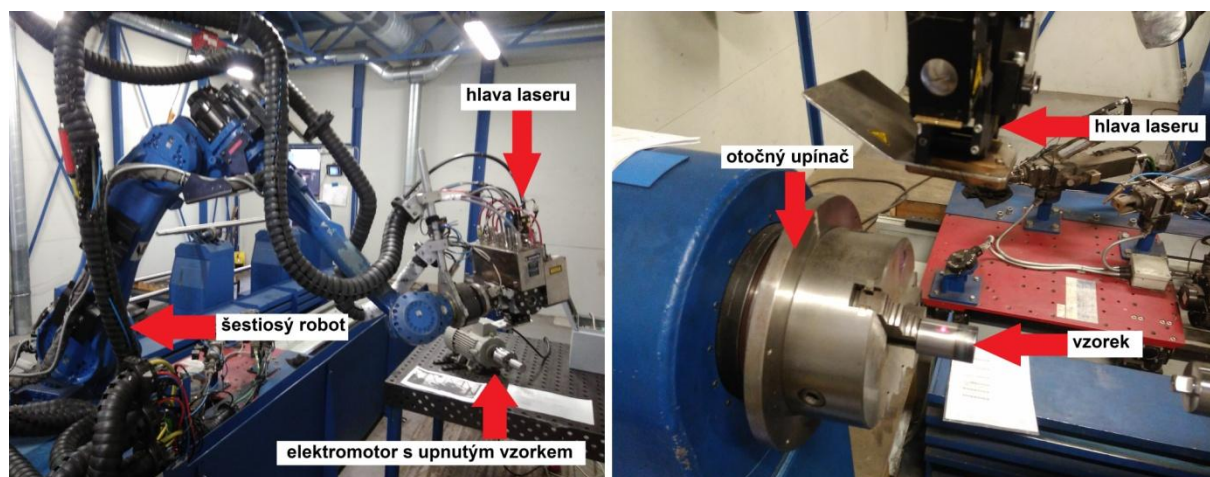
Vlastní experiment rotačního bleskového kalení vyžadoval zhotovení speciálního rotačního přípravku. Byl použit asynchronní třífázový motor s prodlouženou hřídelí, osazený soustružnickým čtyřčelistovým sklíčidlem o průměru 80 mm. Aby bylo minimalizováno ovlivnění elektronového svazku střídavým magnetickým polem motoru, byl použit improvizovaný uzemněný kryt z ocelového plechu. Protože elektronový svazek je součástí elektrického spojení mezi katodou přístroje a přístrojovou zemí, bylo nutno provést uzemnění hřídele motoru a těla vakuové komory. Jinak by ložiska motoru mohla být poškozena elektrickým obloukem mezi kroužky ložisek a valivými tělisky. Pro tento účel byl ke hřídeli rotoru osazen grafitový kartáč s měděným propojením na přístrojovou zem komory. Pro mazání ložisek motoru bylo použito speciální plastické mazivo pro vakuové podmínky. Celá sestava je na obrázku 26.



Obrázek 26: Sestava pro rotační bleskové kalení elektronovým paprskem.

3.2.2 Laserové zařízení

Část experimentu zabývající se laserovým bleskovým kalením probíhala na vysokovýkonném laserovém robotizovaném pracovišti německého výrobce Scansonic IM GmbH ve firmě KSK Precise Motion, a.s. v Kuřimi. Pracoviště je vybaveno laserem o maximálním výkonu paprsku 6 kW. Jde o pevnolátkový diskový Nd:YAG laser sycený laserovými diodami. Průměr paprsku je 600 μm , vlnová délka záření je 1030 nm. Dále je součástí zařízení šestiosý robot Motoman s pracovním rozsahem 2 000 \times 7 000 mm a pevným přípravkovým stolem o rozměru 1 000 \times 1 000 mm, viz obrázek 27. Zařízení je schopné provádět kalení a svařování součástí a dále také navařování s pomocí práškového přídavného materiálu.



Obrázek 27: Laserové pracoviště, vlevo sestava pro rotační bleskové kalení, vpravo pro rotační kalení s jednou otočkou kolem osy vzorku.

3.3 Metody vyhodnocení

3.3.1 Příprava vzorků

Příprava metalografických vzorků zahrnovala řezání na pile Struers Discotom-6 a zalisování vzorků za tepla hmotou ClaroFast pomocí lisu LECO PR-4X do tablet. Následovalo broušení a leštění na brusce Pedemin 2. Následně byly vzorky naleptány leptadlem nital s 2% koncentrací HNO₃ po dobu cca 10 s. Připravené výbrusy byly pozorovány a fotografovány pomocí světelného mikroskopu Zeiss Observer Z1.m a Olympus GX51.

3.3.2 Měření mikrotvrdomosti

Měření mikrotvrdomosti probíhalo pomocí mikrotvrdoměru LM 247AT firmy LECO a na automatickém mikrotvrdoměru Qness Q10 A. Mikrotvrdomost podle Vickerse byla stanovena s parametry nastavenými podle tabulky 4.

Tabulka 4: Nastavení mikrotvrdoměru.

<u>zátěž</u>	<u>interval vtisků</u>
HV 0.025	0,03 mm
HV 0.1	0,06 mm

Vyhodnocení vtisků proběhlo podle normy ČSN EN ISO 6507-1.

3.4 Parametry experimentu

3.4.1 Rovinné kalení elektronovým svazkem

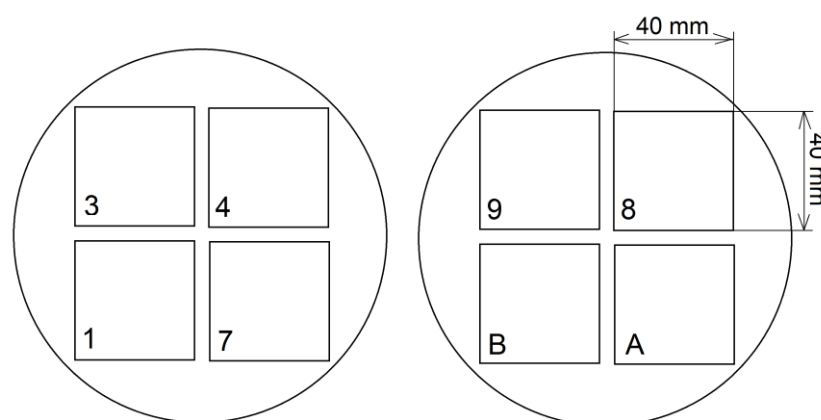
Pro rovinné kalení elektronovým svazkem byla nastavena plocha ozáření 40×40 mm, a to velmi rychlým vychylováním svazku pomocí dvou generátorů – frekvencí 2 500 Hz v ose X a frekvencí 56 Hz v ose Y. Exponovaný obrazec tak tvořil čtverec. Vlivem kmitů svazku ve dvou osách ukazoval osciloskop interferenční obrazce (Lissajousovy křivky), které jsou příčinou výskytu míst s větší intenzitou ozáření.

Intenzita ozáření byla určena pomocí elektrického proudu na cívce, který byl rozdělen do dvou fází, lišící se dobou a proudem. První fáze byla intenzivnější a časově delší než druhá z důvodu ohřevu povrchu na určitou teplotu v první fázi a následné výdrže na teplotě ve fázi druhé. Výkon byl nastaven na maximální hodnotu 15 kW. Dalším parametrem byla defokusace (přenos roviny ostrosti) svazku (Surface+) udávající výšku nad povrchem materiálu, ve které je svazek zaostřen. Hodnoty (Surface+) [mA] v tabulce 5 znamenají zvětšení proudu fokusační cívky o uvedený počet miliampér. Kvalifikovaným odhadem bylo určeno, že při zanedbání nelinearity elektronového optického systému a při výkonu svazku 15 kW, odpovídá 1 mA proudu fokusační cívky posunutí roviny o cca 1 mm.

Na kruhovém vzorku byly provedeny 4 expozice vedle sebe po obou stranách podle schématu na obrázku 28. Aby bylo eliminováno zkreslení výsledku vlivem zvýšené teploty vzorku, byl vzorek před další expozicí vždy vyjmut a dochlazen na pokojovou teplotu.

Tabulka 5: Parametry nastavení EB děla pro rovinné kalení.

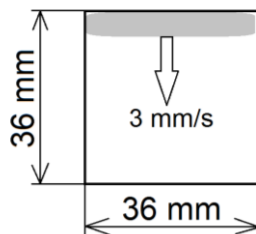
	I_1 [mA]	t_1 [s]	I_2 [mA]	t_2 [s]	Surface+ [mA]	U [kV]	f_1 [Hz]	X_1 [mm]	Y_1 [mm]	f_2 [Hz]	X_2 [mm]	Y_2 [mm]
1	100	1,8	45	1,3	+50	150	2500	40	0	56	0	40
3	100	2,8	45	1,3	+50	150	2500	40	0	56	0	40
4	100	2,8	45	0	+50	150	2500	40	0	56	0	40
7	100	1,8	45	0	+50	150	2500	40	0	56	0	40
8	100	1,8	45	0	+150	150	2500	40	0	56	0	40
9	100	1,8	45	0	+100	150	2500	40	0	56	0	40
A	50	3,6	45	0	+100	150	2500	40	0	56	0	40
B	75	2,4	45	0	+100	150	2500	40	0	56	0	40



Obrázek 28: Schéma expozice elektronového svazku pro rovinné kalení.

3.4.2 Rovinné kalení laserovým paprskem

Parametry pro kalení pomocí laserového zařízení byly nastaveny tak, aby byly co nejvíce podobné předchozímu případu. Povrch vzorku byl skenován laserovým paprskem v šířce 36 mm (skenovací hlava s kmitajícím zrcátkem) a posuvem 3 mm/s o 36 mm. Výsledná exponovaná plocha byla tudíž 36 × 36 mm, viz schéma na obrázku 29.



Obrázek 29: Schéma rovinného kalení pomocí laserového paprsku.

3.4.3 Rotační kalení elektronovým svazkem

U rotačního kalení pomocí EB bylo základní nastavení elektronového děla stejné jako v případě kalení rovinného, viz tabulka 6.

Tabulka 6: Základní nastavení parametrů elektronového děla pro rotační kalení.

výkon [kW]	proud [mA]	urychlovací napětí [kV]	frekvence měniče [Hz]
15	100	150	15

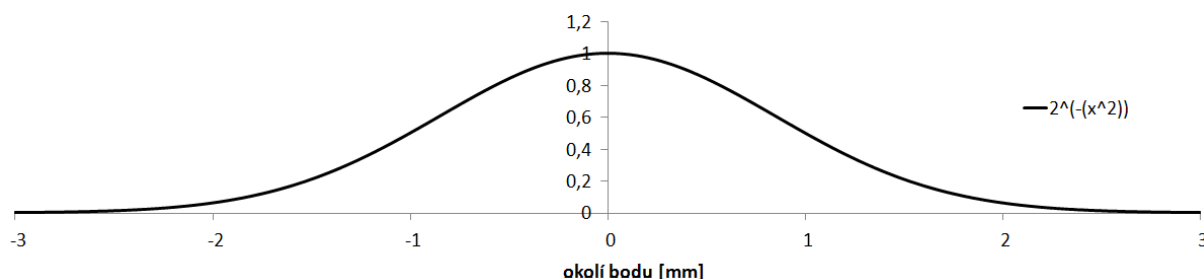
Na rozdíl od laserového zařízení dokáže řídicí jednotka elektronového děla upravovat výkon svazku podél šířky stopy. Stopa jako taková se skládá z jednotlivých bodů, které paprsek prochází tam a zpátky určitou frekvencí. V našem případě obsahuje souřadnicový systém 65 535 bodů. Nastavením, ve kterých z těchto bodů dojde k vypálení elektronového svazku (pálené body blíže u sebe = vyšší hustota výkonu), lze tedy kvazispojitě řídit rozložení výkonu svazku po šířce jeho stopy. Použitá frekvence tohoto skenování byla 2 500 Hz (v případě prvních dvou vzorků je frekvence skenování v druhé ose rovna 56 Hz). Dále byl různě volen již zmíněný parametr defokusace svazku. Všechny pokusy byly prováděny při frekvenci měniče 15 Hz, což odpovídá přibližně hodnotě 900 ot./min (byl použit dvoupólový asynchronní motor s měničem frekvence – plynulou regulací otáček). Parametry všech proběhlých pokusů jsou sepsány v tabulce 7.

Tabulka 7: Parametry nastavení elektronového děla pro rotační kalení.

vzorek	stopa [mm]	t [s]	Surface+ [mA]	úprava výkonu
R1	1,3 × 1,3	1,8	0	-
R2	1,3 × 1,3	1,8	0	-
R3	20	1,0	0	-
R4	20	1,8	+300	-
R5	15	1,8	+300	-
R6	15	2,3	+300	-
R7	15	2,8	+300	-
R8	10	1,3	+300	-
R9	10	1,0	+300	-
R0	10	0,8	+300	-

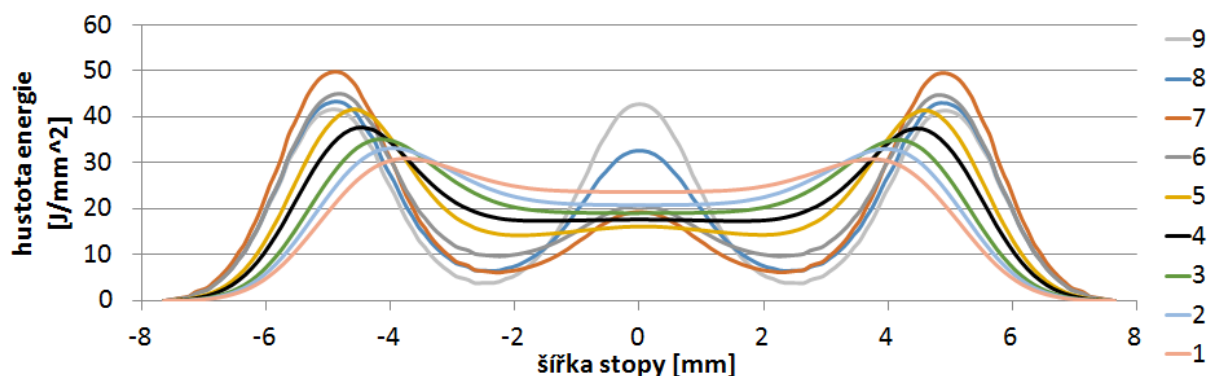
RA	20	2,3	+300	-
RB	20	2,8	+300	-
RI	10	1,0	+100	-
RJ	10	1,0	+500	-
RK	10	1,0	+400	-
RL	10	1,0	+200	-
RM1	10	1,3	+300	ano
RM2	10	1,3	+300	ano
RM3	10	1,3	+300	ano
RN3	10	1,8	+300	ano
RO4	10	1,8	+300	ano
RO5	10	1,8	+300	ano
RP6	10	2,3	+300	ano
RQ7	10	2,8	+300	ano
RQ8	10	2,8	+300	ano
RQ9	10	2,8	+300	ano
RR9	10	2,5	+300	ano
RS9	10	2,3	+300	ano

Úprava výkonu u vzorků RM1 až RS9 byla zhotovena pomocí MS Excel, a to sestavením posloupnosti bodů, které určovaly rozložení výkonu. Při grafickém znázornění tohoto přerozdělení, viz obrázek 30, se počítalo s aproximací vlivu každého z bodů na svoje okolí. Jako aproximační funkce byla zvolena funkce $y = 2^{-x^2}$.



Obrázek 30: Aproximace vlivu každého bodu na své okolí.

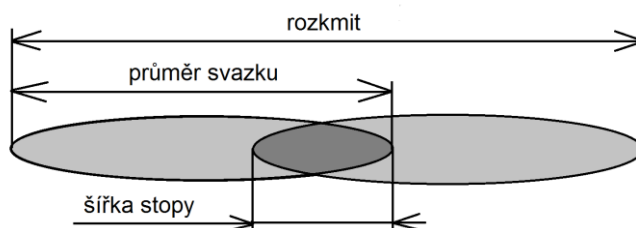
Bylo sestaveno celkem 9 různých vstupů výkonů (označení dvoupísmenných vzorků 1 až 9). Obrázek 31 ukazuje jejich grafické znázornění. Přepočtená osa Y je na $J \cdot mm^{-2}$. Hlavním cílem přerozdělení výkonu bylo zvýšit výkon na stranách stopy tak, aby výsledná zakalená vrstva nebyla uprostřed přetavená a zároveň aby byla stopa co nejširší.



Obrázek 31: Grafické znázornění přerozdělení výkonu elektronového svazku podél šířky stopy.

3.4.4 Rotační kalení laserovým paprskem

Při výkonu laseru 5 kW byly provedeny zkoušky lišící se časem ozáření, průměrem svazku a jeho rozkmitem (viz obrázek 32) při rychlosti skenování 50 Hz. Hodnota emisivity činila 0,7. Vzorek Z4 byl zhotoven klasickým přístupem, tedy nikoli bleskovým ohřevem, ale expozicí laserového paprsku po dobu jedné otáčky kolem podélné osy válečku s obvodovou rychlostí posuvu 3 mm/s. Vzorek X7 kromě bodového ohřevu za rotace součásti zahrnoval následný posuv podél osy rotace vzorku, viz tabulka 8 a 9. Frekvence měniče při hodnotě 50 Hz v tomto případě odpovídala přibližně 1 500 ot./min (čtyřpólový asynchronní motor).



Obrázek 32: Schéma kmitajícího laserového paprsku.

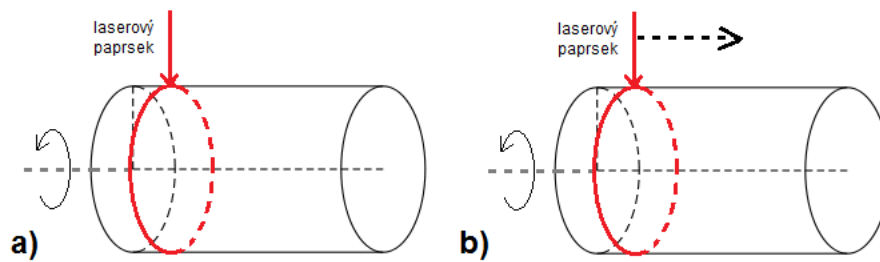
Tabulka 8: Parametry nastavení laserového paprsku pro rotační kalení.

vzorek	frekvence měniče [Hz]	průměr svazku [mm]	šířka stopy [mm]	čas [s]
Z0	100	3	1	4
Z1	100	3	1	7
Z2	100	3	1	5
Z3	100	6	1	12
Z4	-	6	1	-
Z5	50	6	1	7
Z6	50	6	1	9
Z7	50	6	1	12
Z8	50	3	1	5
Z9	50	3	1	7
Z10	50	3	1	4

Kalení probíhalo ve dvou módech znázorněných na obrázku 33. První mód zahrnoval ozáření rotujícího vzorku v jednom bodě (tedy po kružnici). Při druhém módu následoval po této fázi posuv hlavy laseru o 20 mm ve směru osy otáčení vzorku, tudíž stopa paprsku vytvářela po povrchu válce šroubovici se stoupáním.

Tabulka 9: Parametry nastavení rotačního kalení s posuvem podél osy rotace.

vzorek	frekvence měniče [Hz]	průměr svazku [mm]	šířka stopy [mm]	doba ohřevu [s]	rychlost posuvu [mm/s]
X7	100	6	1	12	1,7



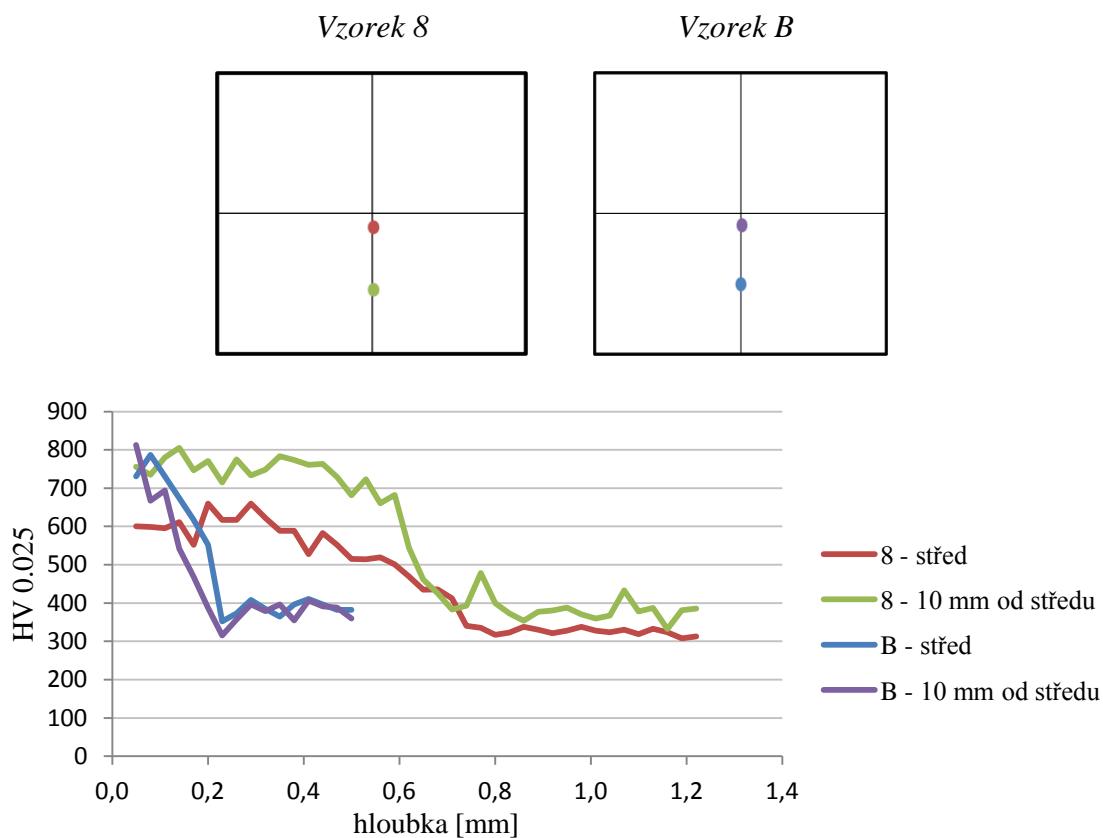
Obrázek 33: Dva módy průběhu rotačního kalení pomocí laserového paprsku, a) mód I, b) mód II.

4 VÝSLEDKY

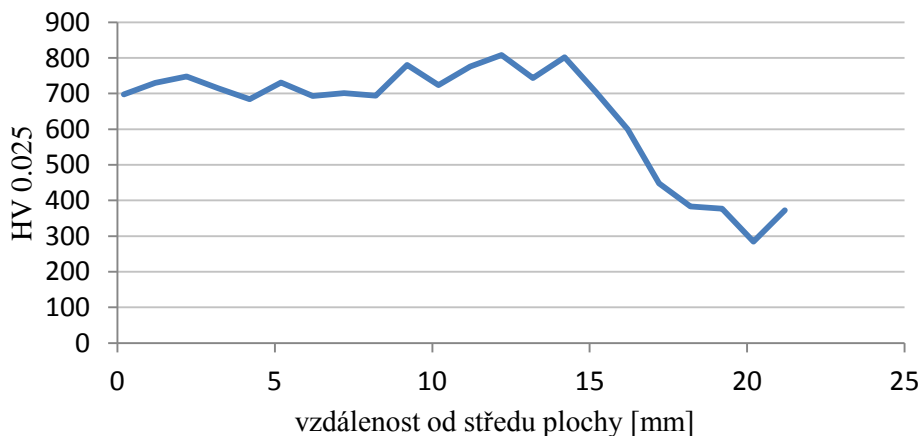
4.1 Kalení elektronovým svazkem

4.1.1 Rovinné kalení

U exponovaných ploch 40×40 mm byly změřeny profily tvrdostí uprostřed zakalené plochy a 10 mm od jejího středu (viz obrázek 34). Dále byla získána podpovrchová tvrdost v hloubce 0,2 mm (viz obrázek 35).



Obrázek 34: Profily tvrdosti vzorku 8 a B.



Obrázek 35: Podpovrchová tvrdost vzorku 8.

4.1.2 Rotační kalení

Vzorky R5, R6 a R7 měly stejnou šířku exponované stopy (15 mm). Lišily se časem ozáření (viz tabulka 10). Šířka zakalené vrstvy a maximální hloubka se jeví závislé na době ozáření.

Tabulka 10: Parametry výsledných vrstev u vzorků R5, R6 a R7.

vzorek	čas ozáření [s]	šířka exponované stopy [mm]	šířka zakalené stopy [mm]	max. hloubka [mm]
R5	1,8	15,0	12,0	0,25
R6	2,3	15,0	12,7	0,50
R7	2,8	15,0	13,0	0,70

Vzorky R0, R9 a R8 se šířkou exponované stopy 10 mm s různým časem ozáření vykazují stejnou závislost jako vzorky v předchozím případě (viz tabulka 11).

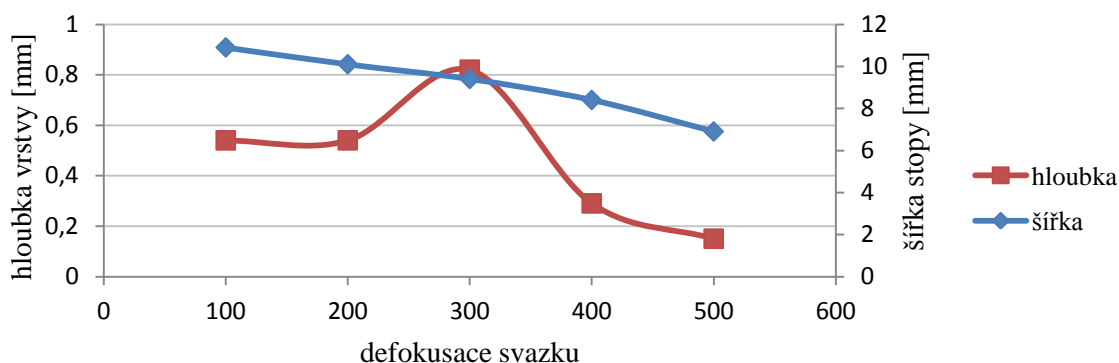
Tabulka 11: Parametry výsledných vrstev u vzorků R0, R9 a R8.

vzorek	čas ozáření [s]	šířka exponované stopy [mm]	šířka zakalené stopy [mm]	max. hloubka [mm]
R0	0,8	10,0	8,0	0,35
R9	1,0	10,0	9,4	0,53
R8	1,3	10,0	10,0	0,83

Při změně defokusace (Surface+) [mA] elektronového svazku na hodnotu +100 až +200 mA (vzorky RI a RL) dochází v případě menšího rozostření k většímu natavení povrchu materiálu. Při hodnotách +400 až +500 mA je energie svazku více rozptýlena, tudíž výsledná šířka a hloubka zakalené stopy je nižší (viz tabulka 12). Jako nejlepší se z tohoto hlediska jeví defokusace +300, kde je kombinace výsledků nejlepší. Grafické znázornění této závislosti je na obrázku 36.

Tabulka 12: Parametry výsledných vrstev u vzorků R9, RI, RJ, RK a RL.

vzorek	SURF	čas ozáření [s]	šířka exponované stopy [mm]	šířka zakalené stopy [mm]	max. hloubka [mm]
RI	+100	1,0	10,0	10,9	0,54
RL	+200	1,0	10,0	10,1	0,54
R9	+300	1,0	10,0	9,4	0,82
RK	+400	1,0	10,0	8,4	0,29
RJ	+500	1,0	10,0	6,9	0,15



Obrázek 36: Vliv defokusace svazku na hloubku a šířku zakalené vrstvy.

Následující vzorky měly upraveny přerozdělení výkonu po šířce stopy (viz tabulka 13). Typ 7 u vzorku RQ7 (viz obrázek 31 v kapitole 3.4.3) vedl k nadměrnému výkonu po stranách a naopak nedostatečnému uprostřed stopy (viz obrázek 37). K rovnoměrnější vrstvě vedly typy přerozdělení 8 vzorku RQ8 (viz obrázek 38) a 9, kde byl výkon nepatrně přenesen zpět do středu stopy. Typ 9 (viz obrázek 39) vedl s nejvyšší hloubkou vrstvy také k mírnému natavení materiálu na povrchu.

Tabulka 13: Parametry výsledných vrstev u vzorků RQ7, RQ8 a RQ9.

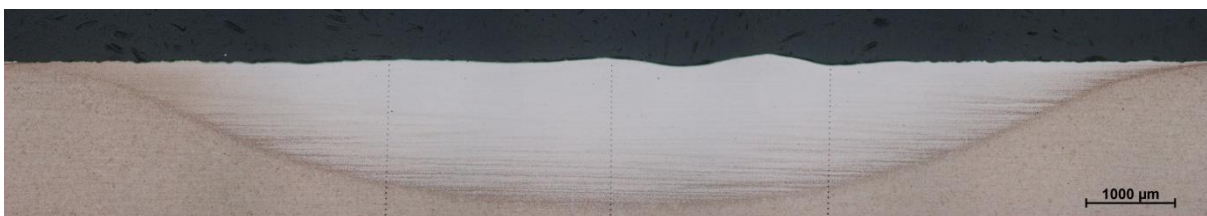
vzorek	typ přerozdělení výkonu	čas ozáření [s]	šířka exponované stopy [mm]	šířka zakalené stopy [mm]	max. hloubka [mm]
RQ7	7	2,8	10,0	15,3	0,41
RQ8	8	2,8	10,0	13,2	1,00
RQ9	9	2,8	10,0	13,4	1,40



Obrázek 37: Vzorek RQ7 s nadměrným výkonem na okrajích stopy.



Obrázek 38: Vzorek RQ8.



Obrázek 39: Vzorek RQ9.

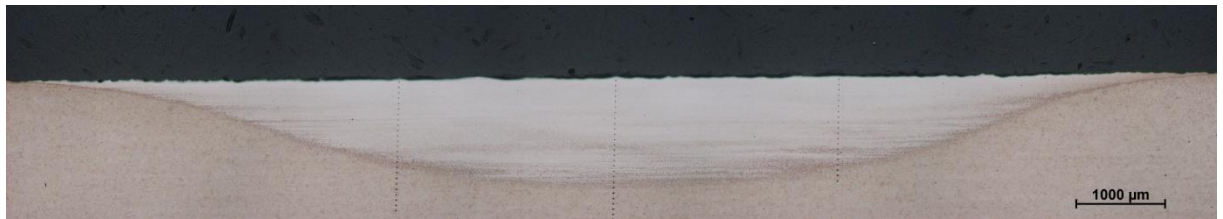
Na základě předchozího pokusu byla vyzkoušena různá doba expozice elektronového svazku při přerozdělení výkonu typu 9 (tabulka 14). U vzorků RR9 a RS9 (viz obrázek 40 a 41) na rozdíl od předchozího vzorku RQ9 nedošlo k natavení povrchu při mírném poklesu šířky zakalené stopy a snížení hloubky vrstvy. Mikrostruktura vzorku RR9 je uvedena na obrázku 42.

Tabulka 14: Parametry výsledných vrstev u vzorků RQ9, RR9 a RS9.

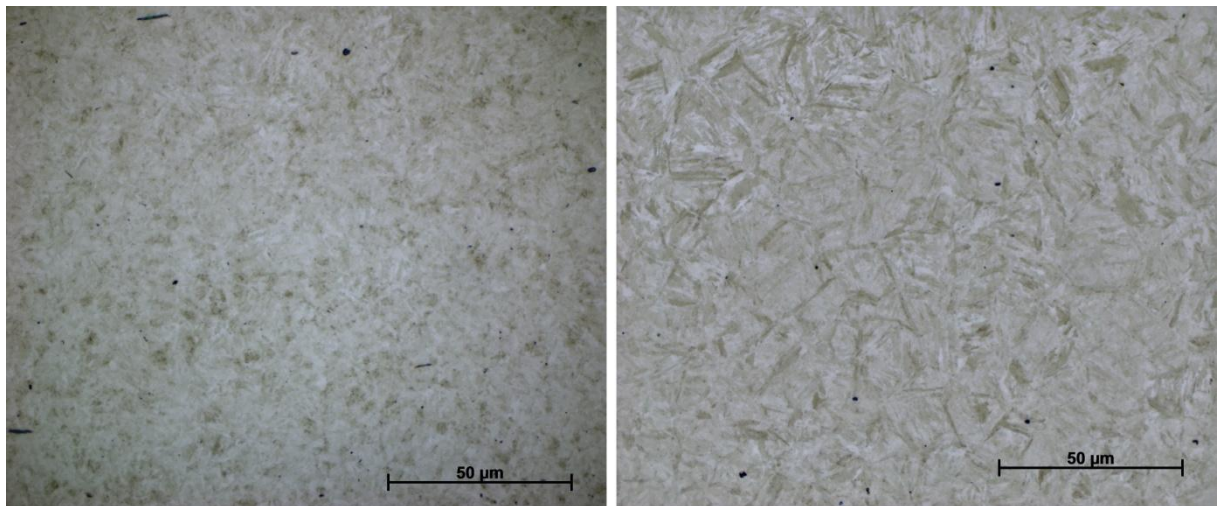
vzorek	čas ozáření [s]	typ přerozdělení výkonu	šířka exponované stopy [mm]	šířka zakalené stopy [mm]	max. hloubka [mm]
RS9	2,3	9	10,0	12,8	0,83
RR9	2,5	9	10,0	13,1	0,99
RQ9	2,8	9	10,0	13,4	1,40



Obrázek 40: Vzorek RS9.



Obrázek 41: Vzorek RR9.



Obrázek 42: Mikrostruktura vzorku RR9, zakalená vrstva (vlevo), přetavená vrstva (vpravo).

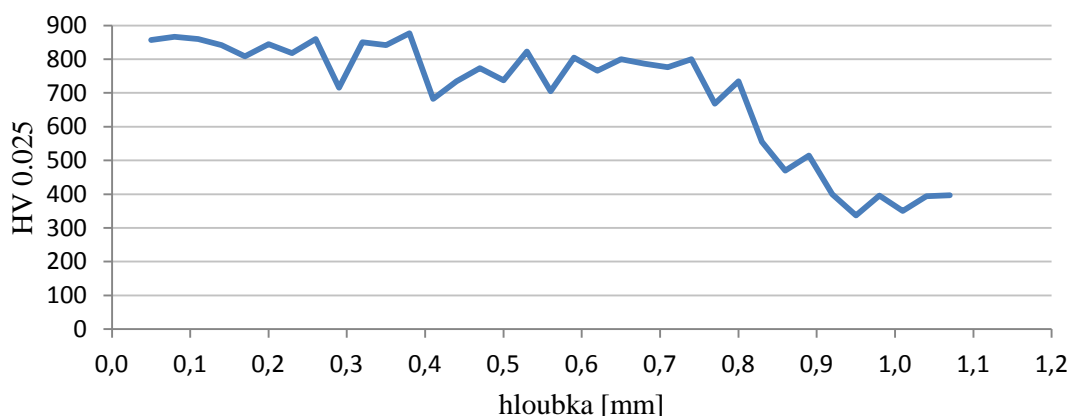
4.2 Laserové kalení

4.2.1 Rovinné kalení

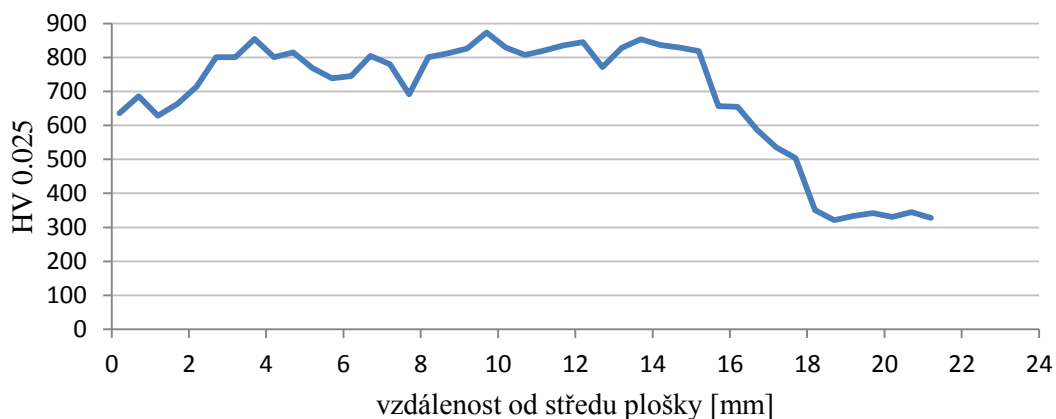
Byl získán výsledný profil tvrdosti (průměr ze 4 profilů vždy 2 mm od středu zakalené oblasti, jejíž vzhled je obrázku 43) exponované plochy o rozměrech 36×36 mm (viz obrázek 44). Hloubka zakalení činí 0,8 mm. Dále byla změřena podpovrchová tvrdost v hloubce 0,2 mm (viz obrázek 45). Dle získaných hodnot má zakalená plocha rozměry 34×34 mm.



Obrázek 43: Vzhled zakalené plochy kalené laserem.



Obrázek 44: Profily tvrdosti plochy zakalené laserem.



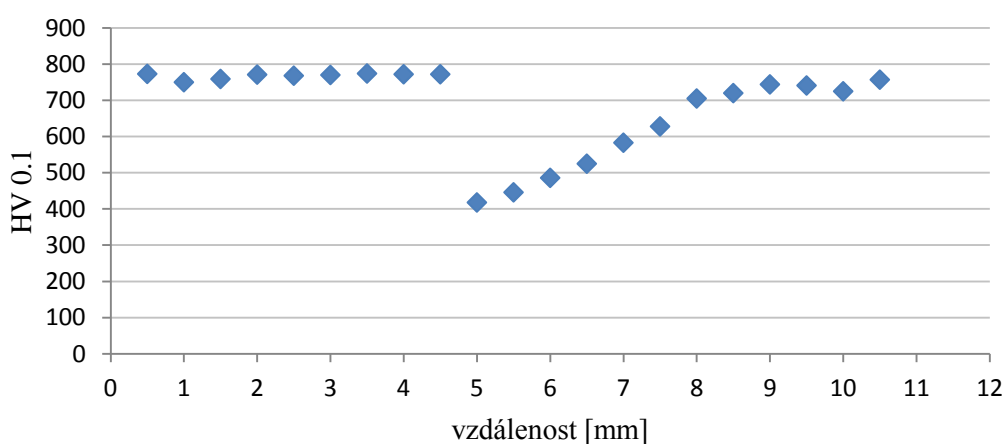
Obrázek 45: Podpovrchová tvrdost laserem zakalené plochy.

4.2.2 Rotační kalení

Vzorek Z4 zhotovený v režimu jedné otočky kolem osy vzorku (obrázek 46) vykazuje předpokládaný pokles tvrdosti i změnu struktury v oblasti dokončení otočky a překryvu stop. Měření podpovrchové tvrdosti proběhlo v hloubce 0,2 mm (viz obrázek 47).

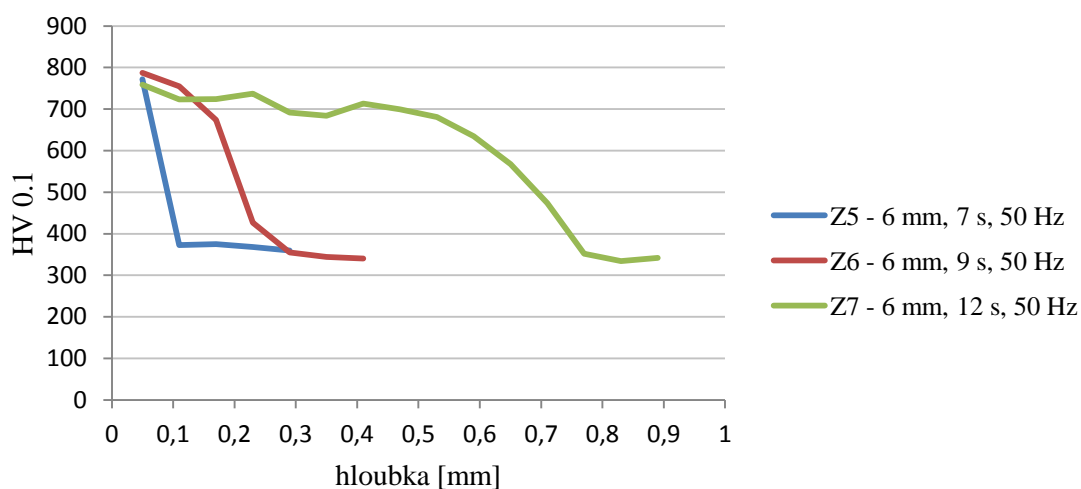


Obrázek 46: Překryv kalených stop při konvenčním rotačním kalení



Obrázek 47: Překryv stop při konvenčním rotačním kalení.

Zřejmá je výrazná závislost hloubky zakalení na délce ozáření laserem. Při prodloužení doby expozice o 3 s je zakalená vrstva až 3× hlubší (viz obrázek 48).

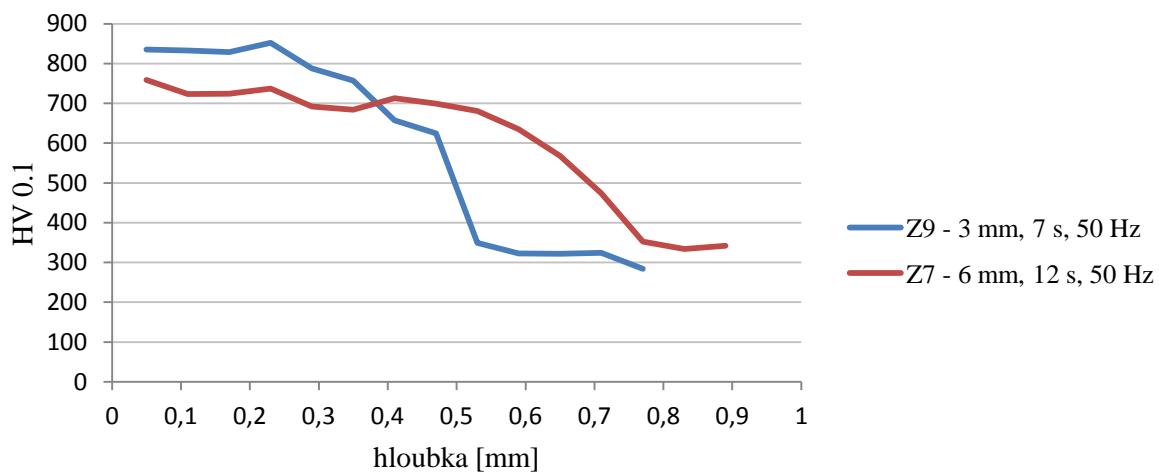


Obrázek 48: Profily tvrdosti vzorku Z5, Z6 a Z7.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo u vzorků Z7 a Z9 (viz obrázky 50 a 51), u kterých se podařilo dosáhnout hloubek 0,7 a 0,45 mm. Jejich grafické srovnání je na obrázku 49. Šířky zakalených stop jsou uvedeny v tabulce 15. Detailní mikrostruktury vzorků Z7 a Z9 jsou na obrázcích 52 a 53.

Tabulka 15: Šířky zakalených vrstev vzorku Z5, Z6, Z7 a Z9.

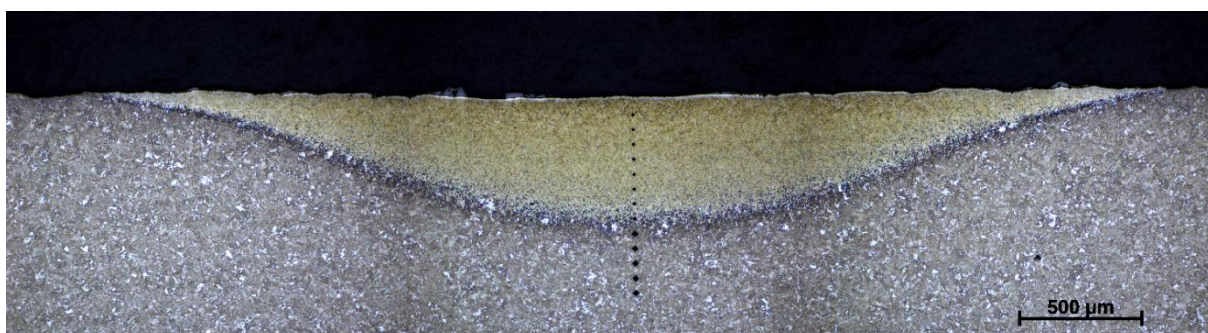
	Z5	Z6	Z7	Z9
šířka zakalené stopy [mm]	3,2	4,4	5,6	4,1



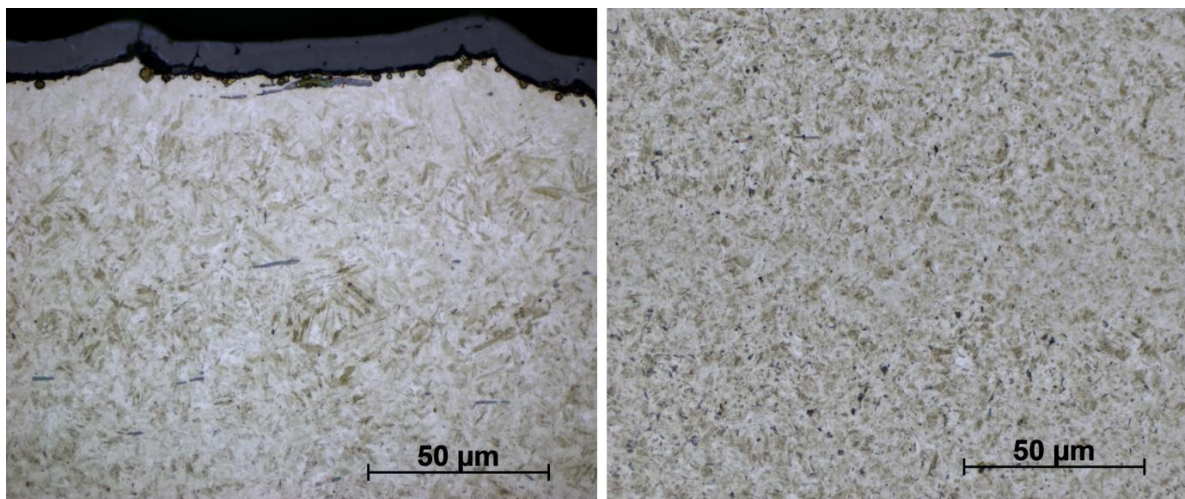
Obrázek 49: Profily tvrdosti vzorku Z7 a Z9.



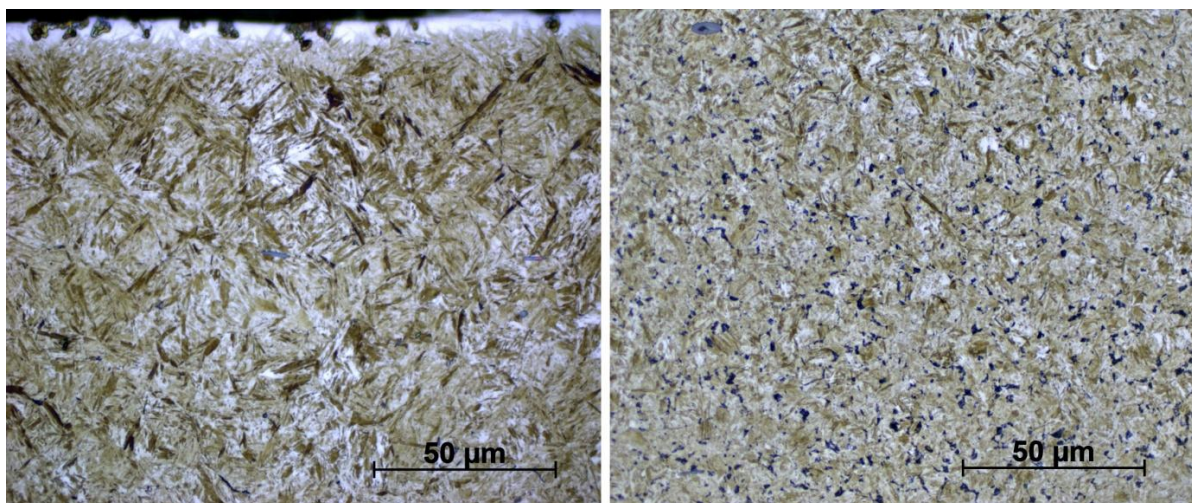
Obrázek 50: Vzorek Z7.



Obrázek 51: Vzorek Z9.

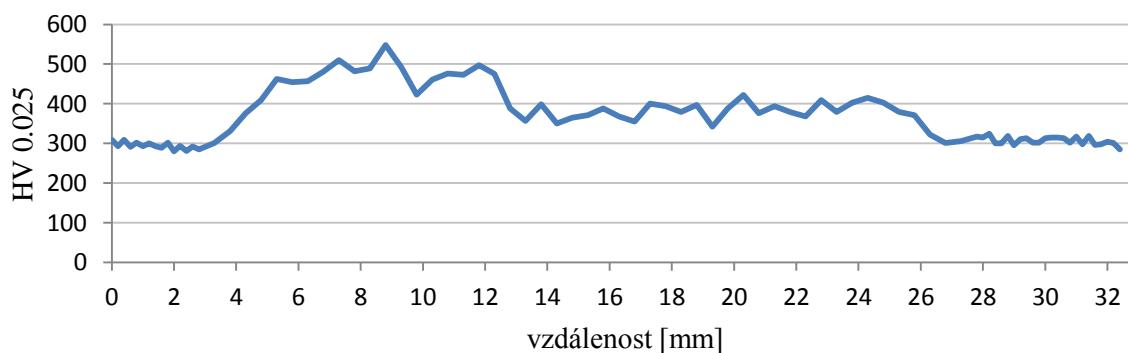


Obrázek 52: Mikrostruktura vzorku Z7 při zvětšení 1000x, u povrchu (vlevo) a v hloubce cca 0,2 mm (vpravo).

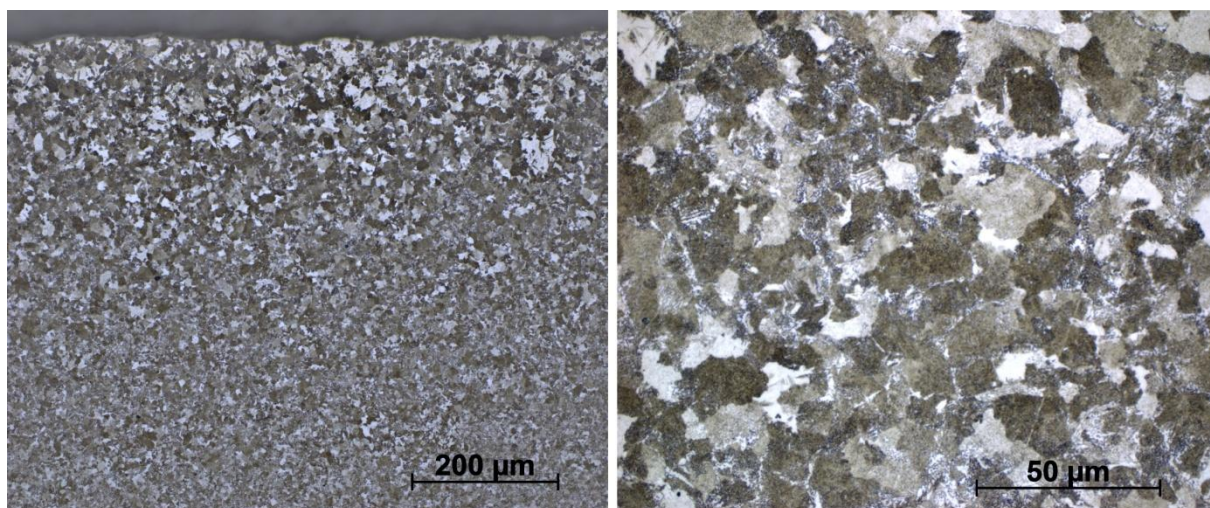


Obrázek 53: Mikrostruktura vzorku Z9 při zvětšení 1000x, u povrchu (vlevo) a v hloubce cca 0,2 mm (vpravo).

Vzorek X7 v režimu s posuvem laserové hlavy o 20 mm podél osy rotace vzorku nevedl k zakalení materiálu z příčiny příliš velkého množství dodaného tepla, které už materiál o daném objemu nebyl schopen odvést a povrchovou vrstvu zakalit. Výsledná struktura 0,2 mm pod povrchem, vynesena do grafu na obrázku 54, tudíž vykazuje pouze jen mírně vyšší tvrdost než je tvrdost jádra součásti a tvrdost s postupem svazku ve směru osy klesá tak, jak se vzorek postupně ohřívá. Detailní mikrostruktura je vidět na obrázku 55.



Obrázek 54: Podpovrchová tvrdost podél osy rotace vzorku X7.



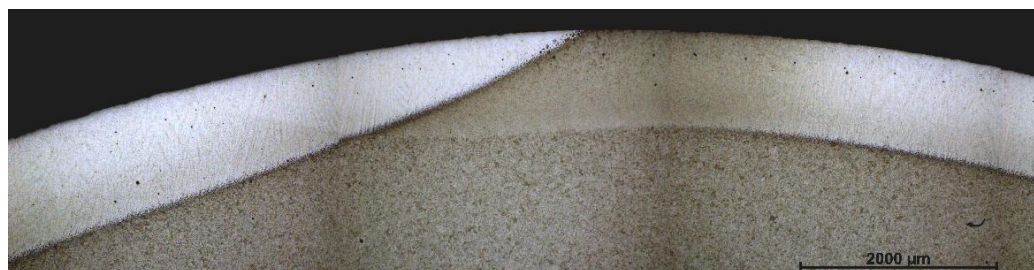
Obrázek 55: Mikrostruktura vzorku X7, zvětšení 200x (vlevo) a 1000x (vpravo).

5 DISKUZE

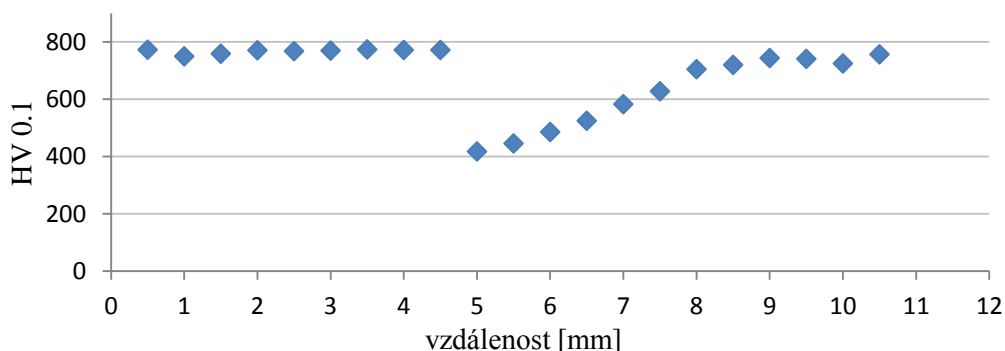
Pilotní experiment, tedy rovinné povrchové kalení exponované plochy o rozměrech 36×36 mm pomocí laserového paprsku a plochy 40×40 mm pomocí elektronového svazku, vedl v obou případech ke vzniku zakalené plochy o rozměrech 34×34 mm. Zakalená plocha pomocí laseru odpovídá rozměrům původní exponované plochy více, než je tomu v případě elektronového svazku. Podpovrchová tvrdost laserem kalené plochy vykazuje lepší homogenitu, jelikož v případě kalení elektronovým svazkem docházelo ke vzniku zmíněných interferenčních obrazců. Menší intenzita výkonu elektronového svazku v některých místech ozářené plochy vedla k nižší podpovrchové tvrdosti. Praktické využití plošného rovinného bleskového kalení by tedy, hlavně v případě elektronového svazku, vyžadovalo důkladnější optimalizaci skenovacího módu.

Hloubka zakalení byla naměřena větší u kalení laserem (0,8 mm) než u elektronového svazku (0,6 mm). Vzhledem k tomu, že aplikovatelný výkon elektronového svazku v komoře PROBEAM K26 je oproti použitému laseru cca trojnásobný, může být tento poměr pravděpodobně zlepšen úpravou parametrů jako je výkon, rychlost pohybu svazku po ploše a popřípadě rozostření svazku.

Uvedené experimentální výsledky rotačního kalení potvrzují úvodní předpoklad, že při použití bleskového ohřevu celého povrchu (pláště) válce za rychlé rotace nedochází k vytvoření měkkých míst, viz už zmíněný obrázek 56 a 57. Použitá metodika ohřevu tento jev v podstatě vylučuje.



Obrázek 56: Měkké místo na obvodu součásti vzniklé kvůli opětovnému zahřátí již zakalené struktury.



Obrázek 57: Pokles tvrdosti na překryvu kalených stop.

Výsledek experimentu rotačního kalení pomocí laserového paprsku (maximální dosažená hloubka zakalení je cca 0,7 mm, viz kapitola 4.2.2) je podobný jako výsledek experimentu [30], kde se podařilo pomocí laseru o výkonu 3 kW zakalit válcový vzorek z oceli 36CrNiMo4 do hloubky cca 0,8 mm, viz obrázek 23 v kapitole 2.5.4. Oba tyto výsledky jsou

naopak nižší ve srovnání s konvenčním rotačním kalením součásti během jedné otočky, kde je hloubka zakalení až 1,2 mm (vzorek Z4, viz obrázek 46 v kapitole 4.2.2).

Povrchové rotační kalení pomocí laserového paprsku v této práci vedlo ke vzniku hrubší martenzitické struktury u povrchu v důsledku vyšší teploty austenitizace (těsně pod teplotou tavení) než je tomu v případě míst dál od povrchu, kde je mikrostruktura jemnější. Eliminace hrubší struktury může být předmětem další optimalizace parametrů kalení, tedy zřejmě výkonu a rychlosti a otáčení.

Při srovnání laserového a elektronového kalení v této práci, je nutno mít na paměti nižší výkon použitého laseru. Vyšší výkon elektronového svazku tedy umožnil dosažení větší hloubky zakalení – až 1 mm s nepřetaveným povrchem a 1,4 mm za cenu mírného natavení. Modulace výkonu svazku po šířce stopy dále umožnila vytvoření zakaleného obvodového pásu o šířce 13,4 mm s poměrně homogenní hloubkou vrstvy, viz kapitola 4.1.2.

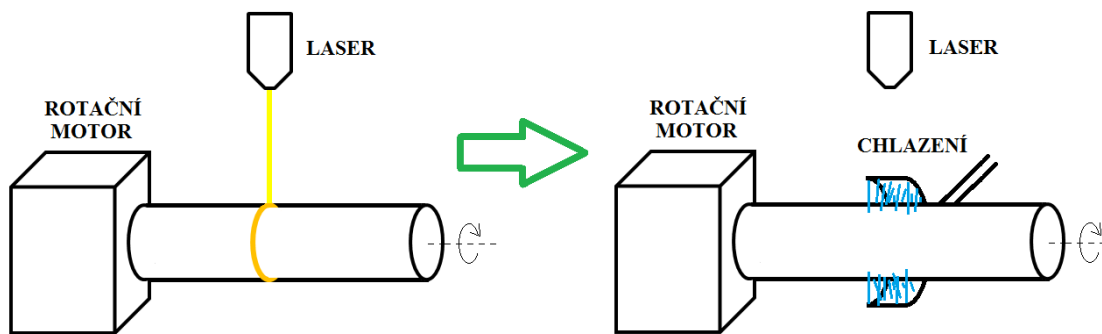
Zmíněná možnost nastavení rozložení výkonu v různých místech skenované dráhy je jedním z předpokladů lepších výsledků u elektronového svazku. Na druhé straně, tento způsob úpravy (optimalizace) výkonu a pohybu elektronového svazku, je na daném zařízení poměrně pracný.

Z hlediska dosažené tvrdosti jsou použité metody zcela srovnatelné. V obou případech dochází ke vzniku mikrostruktury s podobnou maximální tvrdostí, tj. 750–850 HV. Bylo tedy dosaženo předpokládaných maximálních hodnot pro použitý experimentální materiál, tedy 42CrMo4 (15142).

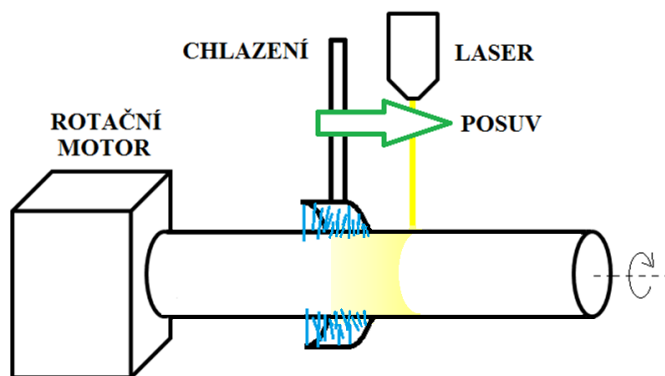
Postupné kalení laserem, tj. kalení laserovým paprskem za rotace a současného posuvu součásti ve směru osy rotace nedošlo ke vzniku zakalené struktury. Příčinou tohoto výsledku bylo pravděpodobně příliš velké množství tepla dodané vzorku o daném objemu. Materiál nebyl schopen toto množství tepla odvést do jádra součásti dostatečně rychle na to, aby došlo k požadované strukturní přeměně povrchové vrstvy, viz obrázek 54 v kapitole 4.2.2. Výsledná mikrostruktura vrstvy, vykazující stejnou či na některých místech i nižší tvrdost než je tvrdost jádra součásti, obsahuje po austenitizaci a relativně pomalém vychladnutí strukturu jemného perlitu a feritu na rozdíl od sorbitické struktury jádra. Z uvedeného plyne, že řešení by mohlo být v celkovém urychlení procesu (vyšší otáčky, vyšší výkon svazku) pro součásti o větším objemu – větší odvedené teplo.

U laseru se však v principu nabízí (na rozdíl od elektronového svazku limitovaného nutností vakua) možnost použití externího chlazení, podobně jako je tomu například u indukčního kalení, tj. ohřívat válcový povrch za rotace a postupného pohybu ve směru osy a zasouvat součást ohřátým povrchem do vodní sprchy (viz schémata na obrázcích 56 a 57). Výsledek by se do určité míry podobal *postupnému* indukčnímu kalení, avšak s daleko přesnějším ohraničením kalené plochy. Takto by bylo možno vytvořit kratší nebo delší kalenou plochu s homogenní tloušťkou a tvrdostí na válcovém povrchu. Příkladem aplikace může být kalení čepu kluzného nebo valivého ložiska, popřípadě plochy pod těsnicí kroužek (gufero).

Ohřevem bez osového pohybu (pouze s rotací) a následným ponořením do kalicí lázně (*jednorázové kalení*) by bylo možno zakalit například dno zápichu.



Obrázek 58: Schéma jednorázového rotačního bleskového kalení válcové součásti pomocí laserového paprsku.



Obrázek 59: Schéma postupného rotačního bleskového kalení válcové součásti pomocí laserového paprsku.

Postupy povrchového kalení elektronovým svazkem a laserem za rychlé rotace (bleskové rotační kalení) se jeví jako účelné rozšíření spektra běžně aplikovaných metod EB a laserových technik. Hlavními výhodami jsou odstranění přechodových měkkých pásů při kladení stop vedle sebe nebo překrytí konce a začátku stopy při kalení po obvodu válce.

Použití těchto metod je limitováno zejména výkonem zařízení (ohřívaná plocha řádu 10^3 mm^2) při nutnosti zamezení natavení povrchu (sofistikované vedení svazku po ohřivaném povrchu). Součásti tedy musí být aspoň tak velké, aby byl umožněn dostatečný odvod tepla do jádra (dosažení větší než kritické rychlosti ochlazování), na druhou stranu při zvětšování průměru součásti vzniká potřeba urychlení rotace, aby samovolné chladnutí nezabránilo zakalení vrstvy. Z tohoto pohledu a při možnostech experimentálního zařízení lze volbu použitých rozměrů vzorků považovat za zdařilou.

6 ZÁVĚRY

Pro elektronové experimentálně technologické zařízení PROBEAM K26 a laserové pracoviště RLH-A výrobce Scansonic byly sestrojeny aplikační přípravky pro rotační jednorázové i postupné kalení. Následně bylo provedeno rovinné a rotační kalení vzorků z oceli 42CrMo4. Při kalení válcových vzorků byla vyzkoušena různá nastavení parametrů – výkon zdroje energie, čas ozáření a charakteristiky záření jednotlivých zařízení.

- Rovinným kalením bylo dosaženo zakalených ploch o hloubce 0,8 mm u laserového paprsku a 0,6 mm u elektronového svazku ve čtverci cca 36 x 36 mm.
- Rotačním jednorázovým laserovým kalením s laserem o výkonu 5 kW bylo dosaženo maximální hloubky zakalení 0,7 mm a šířky stopy necelých 6 mm.
- Rotačním jednorázovým elektronovým kalením s komorou K26 o výkonu elektronového děla 15 kW bylo dosaženo maximální hloubky 1 mm s nepřetaveným povrchem a 1,4 mm s mírným natavením při šířce stopy 13,4 mm.
- Při postupném laserovém kalení (za současného posuvu ve směru osy rotace vzorku) nebylo pro omezené technické možnosti zařízení dosaženo parametrů dostatečných ke vzniku zakalené struktury.
- Na základě měření bylo stanoveno nastavení parametru Surface+ (tedy hodnota zvětšení proudu fokusační cívky odpovídající posunu roviny ostrosti) elektronového děla tak, aby kombinace hloubky a šířky zakalené vrstvy byly ideální. Jako nejlepší byl vyhodnocen parametr Surface+ = 300 mA.
- Experimenty provedené na špičkových laserových a elektronových zařízeních ale s relativně jednoduchými rotačními přípravky potvrdily, že využití laserového i elektronového zařízení pro rotační jednorázové (bleskové), ale i pro postupné kalení, je velmi dobře schůdné. Profesionální využití zkoušených metod může být realizovatelné na základě aplikačních zařízení s větší tuhostí, širším rozsahem otáček a možností upnutí větších těles.

7 LITERÁRNÍ ZDROJE

- [1] PILOUS, V., *Tepelné zpracování kovových materiálů*. Brno: TESIYO, 2015.
- [2] CORNIER, D. and WALSH, R. A., *McGraw-Hill machining and metalworking handbook*. McGraw-Hill Professional Publishing, 2005.
- [3] CALLISTER, W. D. and RETHWISCH, D. G., *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & Sons New York, 2007.
- [4] PTÁČEK, L., *Nauka o materiálu II, 2.*, opr. a rozš. vyd. ed. Brno: Brno : CERM, 2002.
- [5] ASKELAND., R. and PHULE, P. P., *The science and engineering of materials*. Springer, 2003.
- [6] GENG, H., *Manufacturing engineering handbook*, Second edition ed. New York : McGraw-Hill Education (in English), 2016.
- [7] WANG, Q. J. and CHUNG, Y.-W., *Encyclopedia of tribology*. Springer, 2013.
- [8] LUPI, S., FORZAN, M. and ALIFEROV, A., *Induction and direct resistance heating*. Springer, 2015.
- [9] GOLDSTION, R. J. and RUTHERFORD, P. H., *Introduction to plasma physics*. CRC Press, 1995.
- [10] H. Conrads and M. Schmidt, "Plasma generation and plasma sources," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 9, no. 4, p. 441, 2000.
- [11] S. M. Rossnagel, J. J. Cuomo, and W. Westwood, *Handbook of Plasma Processing Technology: Fundamentals, Etching, Deposition, and Surface Interactions (Materials Science and Process Technology)*(Berkshire, UK: Noyes). Noyes Publications, 1990.
- [12] V. Martišovits, *Základy fyziky plazmy : učebný text pre magisterské štúdium*, 1. vyd. ed. Bratislava: Bratislava : Univerzita Komenského, 2006.
- [13] GRILL, A., *Cold plasma in materials fabrication*. IEEE Press, New York, 1994.
- [14] E. Wielgosz, T. Kargul, and J. Falkus, "Comparison of experimental and numerically calculated thermal properties of steels," *Proceedings paper, METAL*, 2014.
- [15] KRAUS, I., *Elementární fyzika pevných látek*, 1. vyd. ed. Praha: Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [16] TRITT, T. M., *Thermal conductivity: theory, properties, and applications*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [17] M. Jahoda, O. Holeček, and L. Schreiberová, "Tepelná vodivost vybraných kovů a slitin v závislosti na teplotě," ed. Praha , dostupné z: https://vscht.cz/uchi/e_tabulky/tepvods.html: Ústav chemického inženýrství VŠCHT, 2019.
- [18] TOTTEN, G. E., FUNATANI, K., and XIE, L., *Handbook of metallurgical process design*. CRC press, 2004.
- [19] J. Roubalová, "Optimalizace tepelného zpracování cementační oceli," ed: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [20] *ČSN EN ISO 642 (420447) A Ocel - Čelní zkouška prokalitelnosti (zkouška podle Jominyho)*, Praha: Český normalizační institut, 2001. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>.
- [21] E. Molliková, "Termodynamika čistých látek," in *Podklady pro cvičení do předmětu Fyzika materiálů*, ed, 2015.
- [22] MYSLIVEC, T., *Fyzikálně chemické základy ocelářství*, Vyd. 2., přeprac. a rozš. ed. Praha: Praha : SNTL, 1971.

- [23] D. DOLEŽAL, "Simulace vedení tepla pomocí programu COMSOL Multiphysics [online]," Bakalářská práce, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Faculty of Education, České Budějovice, 2018 [cit. 2019-04-23]. [Online]. Available: Dostupné z WWW <<https://theses.cz/id/z8v3rr/>>
- [24] "Základy teorie ODR," VUT v Brně, Brno, 2007. [Online]. Available: www.mathonline.fme.vutbr.cz/Zaklady-teorie-ODR
- [25] V. Adam and U. Clauß, "Electron Beam Welding, The fundamentals of a fascinating technology," ed. Gilching, dostupné z: [https://www.pro-beam.com/unternehmen:pro-beam AG & Co. KGaA, 2011](https://www.pro-beam.com/unternehmen:pro-beam-AG-&Co.KGaA,2011).
- [26] E. Lassner and W.-D. Schubert, "The element tungsten," in *Tungsten*: Springer, 1999, pp. 1-59.
- [27] D. WOODARD, "Electron beam welder," in *Dru Woodard's illustrations portfolio*, dostupné z: <http://www.druwoodard.com/portfolio/electron-beam-welder/>, 2016.
- [28] M. S. Węglowski, S. Błacha, and A. Phillips, "Electron beam welding—Techniques and trends—Review," *Vacuum*, vol. 130, pp. 72-92, 2016.
- [29] A. H. Meleka, "ELECTRON BEAM WELDING. PRINCIPLES AND PRACTICE," 1971.
- [30] R. Fakir, N. Barka, and J. Brousseau, "Case study of laser hardening process applied to 4340 steel cylindrical specimens using simulation and experimental validation," *Case studies in thermal engineering*, vol. 11, pp. 15-25, 2018.
- [31] M. Novák. "Základní přehled průmyslových laserů." dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu> (accessed 24.2.2019).
- [32] L. Technology. "Možné dělení typů a druhů laserů." dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru> (accessed 24.2.2019).
- [33] S. Martínez, D. Lesyk, A. Lamikiz, E. Ukar, and V. Dzhemelinsky, "Hardness simulation of over-tempered area during laser hardening treatment," *Physics Procedia*, vol. 83, pp. 1357-1366, 2016.
- [34] J. Grum, "Comparison of different techniques of laser surface hardening," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 17-25, 2007.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Oblast kalicích teplot pro podeutektoidní a nadeutektoidní oceli [4].	9
Obrázek 2: a) Schéma zařízení pro povrchové kalení plamenem, b) závislost minimální dosažitelné tvrdosti na obsahu uhlíku v oceli [7].	10
Obrázek 3: Schéma induktoru [8].	10
Obrázek 4: Příklad plazmového ohřevu pomocí vodíku a elektrického oblouku, vytvořeno podle [11].	11
Obrázek 5: Závislost elektrického napětí na elektrickém proudu pro různé druhy výboje [10].	11
Obrázek 6: Teplotní závislost měrné tepelné kapacity nelegované oceli [14].	13
Obrázek 7: Teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti uhlíkové oceli [17].	14
Obrázek 8: Vliv přidání legur na polohu ARA diagramu podeutektoidní oceli: vlevo nelegovaná, vpravo legovaná [4].	15
Obrázek 9: Teplotní pole a izotermy [23].	17
Obrázek 10: Schéma urychlování elektronu v a) elektrickém a b) magnetickém poli.	18
Obrázek 11: Elektronový svazek ve zbytkovém plynu (vlevo) a ve vakuu (vpravo) [25].	18
Obrázek 12: Schéma elektronového děla [27].	19
Obrázek 13: Schéma soustavy elektromagnetických čoček, a) nevychýlený paprsek, b) paprsek vychýlený úpravou pólů cívek [25].	20
Obrázek 14: Geometrie jednotlivých typů svařovacích technologií [28].	21
Obrázek 15: a) Průběhy tvrdostí u ocelí po EB kalení, b) martenzitická struktura dosažená EB kalením [7].	21
Obrázek 16: Různé vychylovačí techniky pro termální aplikace elektronového svazku [28].	22
Obrázek 17: Vlnové délky vybraných typů laserů [32].	23
Obrázek 18: Různé tvary laserových aktivních médií [31].	24
Obrázek 19: Schéma zdroje CO ₂ laseru [31].	24
Obrázek 20: a) Závislost průběhu tvrdosti na použitém výkonu zdroje laseru, b) překryv tepelně ovlivněných zón při skenování povrchu [7].	25
Obrázek 21: Schéma optické soustavy laseru [7].	25
Obrázek 22: Pokles podpovrchové tvrdosti při 40% překryvu stop kalených laserem [33].	26
Obrázek 23: Závislost zakalené hloubky na různých výkonech laserového paprsku aplikovaného na válcové vzorky z materiálu 36CrNiMo4 [30].	26
Obrázek 24: Původní mikrostruktura použité oceli 42CrMo4 při zvětšení 100x (vlevo) a 1000x (vpravo).	27
Obrázek 25: Vzorky pro experiment a) rovinného, b) rotačního kalení.	27
Obrázek 26: Sestava pro rotační bleskové kalení elektronovým paprskem.	28
Obrázek 27: Laserové pracoviště, vlevo sestava pro rotační bleskové kalení, vpravo pro rotační kalení s jednou otočkou kolem osy vzorku.	29
Obrázek 28: Schéma expozice elektronového svazku pro rovinné kalení.	31
Obrázek 29: Schéma rovinného kalení pomocí laserového paprsku.	32
Obrázek 30: Aproximace vlivu každého bodu na své okolí.	33
Obrázek 31: Grafické znázornění přerozdělení výkonu elektronového svazku podél šířky stopy.	33
Obrázek 32: Schéma kmitajícího laserového paprsku.	34
Obrázek 33: Dva módy průběhu rotačního kalení pomocí laserového paprsku, a) mód I, b) mód II.	35
Obrázek 34: Profily tvrdosti vzorku 8 a B.	36
Obrázek 35: Podpovrchová tvrdost vzorku 8.	36
Obrázek 36: Vliv defokusace svazku na hloubku a šířku zakalené vrstvy.	37

Obrázek 37: Vzorek RQ7 s nadměrným výkonem na okrajích stopy.	38
Obrázek 38: Vzorek RQ8.	38
Obrázek 39: Vzorek RQ9.	38
Obrázek 40: Vzorek RS9.	39
Obrázek 41: Vzorek RR9.	39
Obrázek 42: Mikrostruktura vzorku RR9, zakalená vrstva (vlevo), přetavená vrstva (vpravo).	39
Obrázek 43: Vzhled zakalené plochy kalené laserem.	40
Obrázek 44: Profily tvrdosti plochy zakalené laserem.	40
Obrázek 45: Podpovrchová tvrdost laserem zakalené plochy.	40
Obrázek 46: Překryv kalených stop při konvenčním rotačním kalení.	41
Obrázek 47: Překryv stop při konvenčním rotačním kalení.	41
Obrázek 48: Profily tvrdosti vzorku Z5, Z6 a Z7.	41
Obrázek 49: Profily tvrdosti vzorku Z7 a Z9.	42
Obrázek 50: Vzorek Z7.	42
Obrázek 51: Vzorek Z9.	42
Obrázek 52: Mikrostruktura vzorku Z7 při zvětšení 1000x, u povrchu (vlevo) a v hloubce cca 0,2 mm (vpravo).	43
Obrázek 53: Mikrostruktura vzorku Z9 při zvětšení 1000x, u povrchu (vlevo) a v hloubce cca 0,2 mm (vpravo).	43
Obrázek 54: Podpovrchová tvrdost podél osy rotace vzorku X7.	43
Obrázek 55: Mikrostruktura vzorku X7, zvětšení 200x (vlevo) a 1000x (vpravo).	44
Obrázek 56: Měkké místo na obvodu součásti vzniklé kvůli opětovnému zahřátí již zakalené struktury.	45
Obrázek 57: Pokles tvrdosti na překryvu kalených stop.	45
Obrázek 58: Schéma jednorázového rotačního bleskového kalení válcové součásti pomocí laserového paprsku.	47
Obrázek 59: Schéma postupného rotačního bleskového kalení válcové součásti pomocí laserového paprsku.	47

9 TABULKOVÉ A GRAFICKÉ PŘÍLOHY

Příloha 1: Materiálový list oceli 42CrMo4 firmy Bohdan Bolzano, s.r.o.

Mechanické vlastnosti v zušlechtném stavu. ³⁾	Průměr mm	R_e min. MPa	R_m MPa	A min. %	Z min. %	KV min. J										
	$d \leq 16$	900	1100 - 1300	10	40	-										
	$16 < d \leq 40$	750	1000 - 1200	11	45	35										
	$40 < d \leq 100$	650	900 - 1100	12	50	35										
	$100 < d \leq 160$	550	800 - 950	13	50	35										
	$160 < d \leq 250$	500	750 - 900	14	55	35										
Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost		Žháno na měkko				Povrchově kaleno (tvrdost povrchu)									
	HB max. 255		HB max. 241				HRC min. 53									
Prokalitelnost ⁴⁾	Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušebního tělesa v mm															
	Tvrdost v HRC															
	⁵⁾ Mez	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
	+H max.	61	61	61	60	60	59	59	58	56	53	51	48	47	46	45
	+H min.	53	53	52	51	49	43	40	37	34	32	31	30	30	29	29
	+HH max.	61	61	61	60	60	59	59	58	56	53	51	48	47	46	45
+HH min.	56	56	55	54	52	48	46	44	41	39	38	36	36	35	34	
+HL max.	58	58	58	57	56	54	53	51	49	46	44	42	41	40	40	
+HL min.	53	53	52	51	49	43	40	37	34	32	31	30	30	29	29	
<p>Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 30 mm)</p>								<p>Křivky prokalitelnosti</p>								