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

VLIV TRAJEKTORIE ELEKTRONOVÉHO SVAZKU NA VLASTNOSTI POVRCHU OCELI 42CRMO4

INFLUENCE OF THE ELECTRON BEAM TRAJECTORY ON THE SURFACE PROPERTIES OF STEEL 42CRMO4

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Tomáš Mikuš

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Rudolf Foret, CSc.

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	**Bc. Tomáš Mikuš**
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Vedoucí práce:	**prof. Ing. Rudolf Foret, CSc.**
Akademický rok:	2017/18

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:

Vliv trajektorie elektronového svazku na vlastnosti povrchu oceli 42CrMo4

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Povrch použité oceli bude modifikován třemi trajektoriemi elektronového svazku (přímka, kalící pole, meandry) „bez“ a „s“ natavením povrchu. Na takto modifikovaných površích bude hodnocena mikrostruktura, včetně její homogenity, mikro a makro tvrdost a odolnost vůči opotřebení. Povrchy budou podrobeny i scratch testům. Etalonovým stavem bude stav po povrchovém kalení.

Cíle diplomové práce:

– pois možnosti vychylováni elektronového svazku na zařízení instalovaném na ÚMVI,
– vliv trajektorie elektronového svazku na vlastnosti povrchu oceli 42CrMo4, srovnání se stavem .....
..po standardním povrchovém kalení.

Seznam doporučené literatury:

ZENKER, R. Materials Science Forum, Vols. 102-104, 1992, pp. 459-476.

DUPÁK, L. Mikroobrábění nekovových materiálů elektronovým svazkem.(disertační práce) Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012.

MATLÁK, J. Povrchové zpracování vybraných druhů ocelí pomocí elektronového svazku (diplomová práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013.

BUCHWALDER, A, KLOSE, N., JUNG, A. et al. Improved surface properties of nodular cast iron using electron beam remelting and alloying with nickel based additives. (2016) Electrotechnica and electronica E+E. Varna.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá povrchovým kalením oceli 42CrMo4 elektronovým svazkem. Je studován vliv parametrů a zejména trajektorie elektronového svazku na výsledné vlastnosti a strukturu kalené vrstvy. Bylo zkoumáno kalení elektronovým svazkem jak bez natavení, tak i s částečným natavením povrchu. Struktury vzniklé po kalení vybranými trajektoriemi elektronového svazku byly porovnány se strukturami po kalení pomocí laseru a elektromagnetické indukce. Strukturní a fázová identifikace byla provedena pomocí SM, SEM a rentgenové difrakce. Na vzniklých kalených vrstvách byly měřeny průběhy tvrdosti.

Klíčová slova

Povrchové kalení, ocel 42CrMo4, elektronový svazek, laser, elektromagnetická indukce, mikrostruktura, tvrdost

ABSTRAKT

The thesis deals with surface quenching of steel 42CrMo4 by electron beam. Influence of technologic parameters and beam deflection on properties and structure of prepared layers is studied. Electron beam surface quenching was applicated with and without melting of the surface. Structures of layers made by electron beam quenching were compared with structures made by laser and electromagnetic induction. Structures and phases were analysed by optical microscopy, SEM and roentgen diffraction. Hardness was measured on hardened layers.

Key words

Surface quenching, steel 42CrMo4, electron beam, laser, electromagnetic induction

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MIKUŠ, T. *Vliv trajektorie elektronového svazku na vlastnosti povrchu oceli 42CrMo4*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 52 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Rudolf Foret, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Vliv trajektorie elektronového svazku na vlastnosti povrchu oceli 42CrMo4* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny a řádně citovány v seznamu použité literatury této práce.

Datum: 25. 5. 2018 .....

Tomáš Mikuš

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat prof. Ing. Rudolfu Foretovi, CSc. za vedení a veškerou pomoc při tvorbě této práce. Další díky patří Ing. et Ing. Jiřímu Matlákovi za pomoc s experimentálními pracemi a mé manželce, která mě při psaní práce věrně povzbuzovala.

OBSAH:

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE 9

2 TEORETICKÁ ČÁST 10

2.1 Povrchové kalení 10

2.2 Technologie povrchového kalení 11

2.2.1 Indukční kalení 11

2.2.2 Kalení plamenem 11

2.2.3 Kalení laserem 13

2.2.4 Kalení elektronovým svazkem 13

2.3 Elektronový svazek 15

2.3.1 Generátor elektronového svazku 15

2.3.2 Interakce elektronového svazku s materiálem 16

2.3.3 Možnosti ovládání trajektorie 19

3 POPIS EXPERIEMENTU 21

3.1 Experimentální materiál 21

3.2 Povrchové kalení 22

3.3 Příprava vzorků 28

3.4 Měření mikrotvrdosti 28

3.5 Rentgenová difrakce 28

4 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY 29

4.1 Hodnocení mikrostruktury 29

4.2 Vliv trajektorie el. svazku a rozostření na profil zakalené vrstvy 38

4.3 Měření mikrotvrdosti 39

5 DISKUZE VÝSLEDKŮ 44

6 ZÁVĚR 49

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 50

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 52

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

V současné době, kdy zažíváme uplatňování pokročilých technologií napříč téměř všemi obory, je kladen enormní tlak na produktivitu a ekologii výrobních procesů. Tyto trendy jsou nejvíce patrné v automobilovém průmyslu, kde je vzhledem k velkým výrobním objemům každá úspora času, energie nebo dopadu na životní prostředí velmi znatelná. Tyto pozitivní změny jsou v poslední době globálně vyžadovány a vysoce ceněny. Každé takové změně ale předchází více či méně rozsáhlý výzkum, který odhalí potenciál nové technologie či postupu, který může být následně použit v praxi.

Součásti, jejíž povrchy jsou vystaveny velkým silám nebo otěru, a na něž je rovněž kladen požadavek dostatečné houževnatosti, jsou tradičně povrchově kaleny. Příkladem může být vačkový hřídel. Povrchové kalení je běžně prováděno konvenčními metodami téměř v každém větším podniku a není tedy žádnou novinkou. Technologii kalení, při níž jako zdroj ohřevu slouží elektronový svazek, bychom ovšem jako nekonvenční nazvat rozhodně mohli. Fokusovaný elektronový svazek je moderní technologie, která má již zmíněný potenciál k časovým a překvapivě i energetickým úsporám, pokud je použita v hromadné výrobě, protože se vyznačuje vysokou hustotou vnesené energie, a tedy i vysokou rychlostí ohřevu. Technologie, využívající elektronový svazek, jsou pro své široké uplatnění, výhody a technologický potenciál v současné době stále ještě předmětem intenzivního výzkumu.

Dosažení žádaných výsledků povrchového kalení s pomocí elektronového svazku vyžaduje nalezení správných technologických parametrů, ale také správné trajektorie svazku, který je po povrchu vzorku vychylován. Elektronový svazek se vyznačuje vynikajícími možnostmi vychylování svazku, díky čemuž lze pro rastrování povrchu vzorku zvolit vícero strategií (trajektorií). Oblast vlivu výběru dané trajektorie na výsledné vlastnosti zakalené vrstvy dosud zůstává otázkou, které nebyla věnována dostatečná publikační činnost. Tato práce se tedy zabývá popisem možností ovládání trajektorie elektronového svazku na zařízení instalovaném na Ústavu materiálových věd a inženýrství, Fakulty strojního inženýrství, Vysokého učení technického v Brně a dále vlivem použité trajektorie na výsledné vlastnosti povrchově kalené oceli.

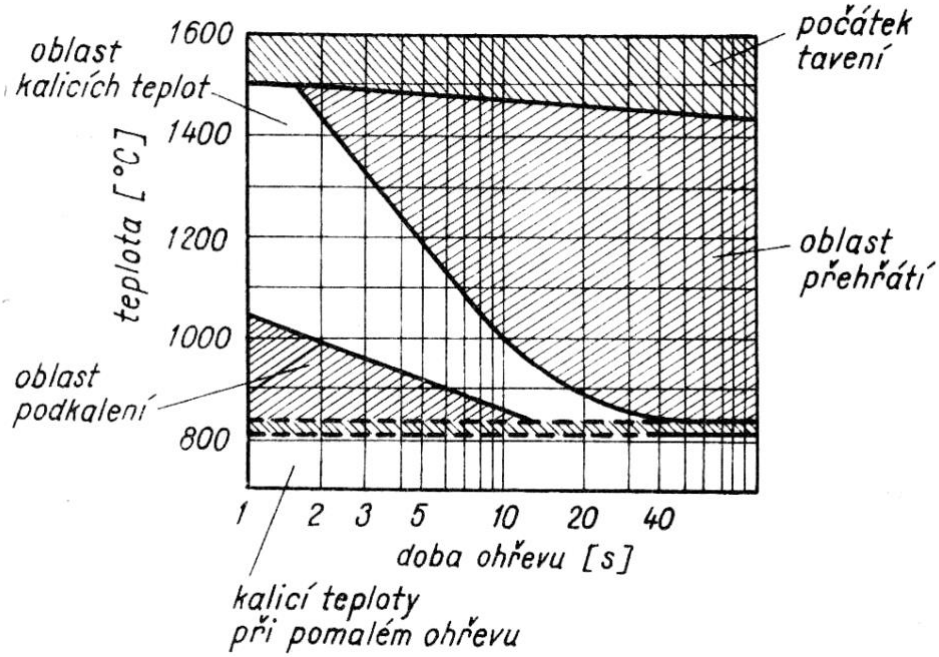
2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Povrchové kalení

Povrchové kalení je proces tepelného zpracování materiálu, díky němuž získáváme součásti s tvrdými a otěruvzdornými povrchy a současně houževnatými jádry. Od běžného objemového kalení se liší tím, že součást ohřejeme tak rychle, aby k austenitizaci došlo jen na povrchu, a poté nadkritickou rychlostí ochladíme. Vhodný způsob ohřevu je tedy pro tuto technologii zásadní.

Zvýšení tvrdosti povrchu je způsobeno transformací austenitu na martenzit, a také razantním zjemněním zrna. Jádro zůstává houževnaté, protože si zachovává svoji původní strukturu, která je nejčastěji feriticko-perlitická nebo sorbitická.

Problémem je, že teplota austenitizace, které musíme pro uskutečnění austenitické přeměny dosáhnout, není za všech podmínek ohřevů stejná, ale s rostoucí rychlostí ohřevu materiálu výrazně roste. Tento vliv je patrný z Obr. 1. Teplota potřebná pro dosažení homogenního austenitu při povrchovém kalení může být i o 200 °C vyšší než u klasického objemového kalení. Spoléhat se tedy na teplotní údaje obsažené v metastabilním diagramu Fe-Fe_3C by bylo chybné, protože zmíněný vliv rychlosti ohřevu nezahrnuje. [1,2]



Obr. 1 : *Vliv rychlosti ohřevu na teplotu austenitizace* [2]

Nejčastěji používanými materiály pro povrchové kalení jsou podeutektoidní oceli s obsahem uhlíku 0,3 – 0,7 hm. %. S rostoucím obsahem uhlíku roste tvrdost i pevnost, může však docházet k praskání. Oceli s vyššími obsahy uhlíku tedy lze použít jen pro jednodušší součásti bez výrazných koncentrátorů napětí. Nejlepších výsledných vlastností, tedy nejvyšších tvrdostí s minimem trhlin, je dosahováno u ocelí s obsahy uhlíku 0,4 – 0,5 hm. %. Povrchově lze kalit i litiny, které neobsahují ledeburitický cementit. [1,3]

2.2 Technologie povrchového kalení

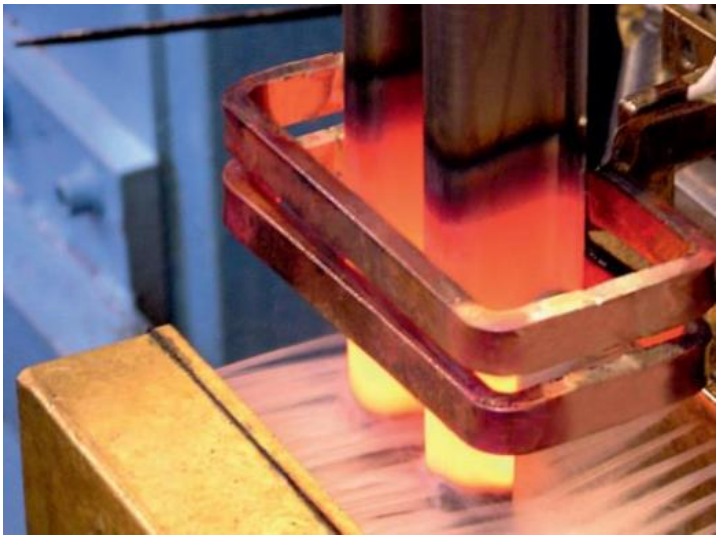
2.2.1 Indukční kalení

Nejčastěji používaným způsobem ohřevu povrchu je elektromagnetická indukce. Součást je ohřívána pomocí induktoru, který je nejčastěji měděný a tvarem je podobný ohřívané součásti. Střídavým magnetickým polem o frekvenci 1000 Hz až 2 MHz, které je indukováno kolem induktoru, jsou v součásti indukovány vířivé proudy, které způsobují ohřev Joulovým teplem. Tyto proudy jsou indukovány zejména na povrchu (skin efekt). Rozlišujeme kalení jednorázové nebo postupné (nepřetržité - Obr. 2) podle toho, jestli povrch ohříváme a kalíme postupně nebo celý najednou. Po ohřevu je součást ochlazena buď do vodní lázně, nebo vodní sprchou. Tloušťka zakalené vrstvy dosažená indukčním kalením je 1 až 6 mm. [1, 4]

Hloubka průniku magnetického pole:

$$h = \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}} \qquad (2.1)$$

Hloubka průniku střídavého magnetického pole h [mm] je přímo úměrná specifickému elektrickému odporu ρ [Ω.m] a nepřímo úměrná frekvenci elektrického proudu f [Hz] a relativní magnetické permeabilitě μ [-].



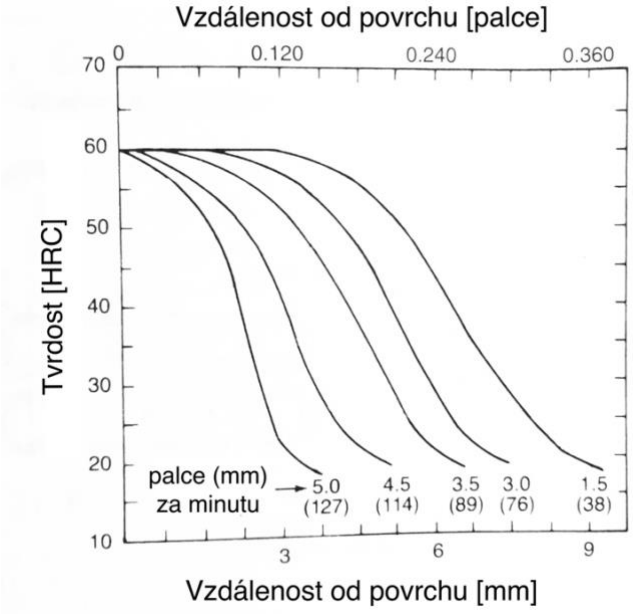
Obr. 2 : *Nepřetržité indukční kalení* [5]

2.2.2 Kalení plamenem

Povrch součásti je ohříván nejčastěji kyslíko-acetylenovým plamenem, jehož teplota je až 3200 °C. Hořáky používané pro řezání a svařování nejsou pro tento ohřev vhodné kvůli přílišné fokusaci plamene. Je totiž nutné, aby plamen ohříval větší plochu. V porovnání s kalením pomocí elektromagnetické indukce je ohřev plamenem pomalejší a výsledná struktura má nižší homogenitu. Chlazení nadkritickou rychlostí je zajištěno vodní sprchou, která je přímo součástí pohyblivého hořáku - Obr. 3. Druhou možností je uspořádání, kdy je pohyblivá kalená součást. Hloubka prokalení a průběh tvrdosti jsou

silně závislé na rychlosti posuvu hořáku (Obr. 4). Minimální tloušťka zakalené vrstvy je obecně 1,5 až 3 mm, podle použité metody. Výhodou kalení plamenem je relativní přenosnost zařízení, je tedy používáno pro velké rotační součásti jako ozubená kola, kladky atd. [3, 6, 8, 21]

Obr. 3 : *Kalení plamenem* [7]

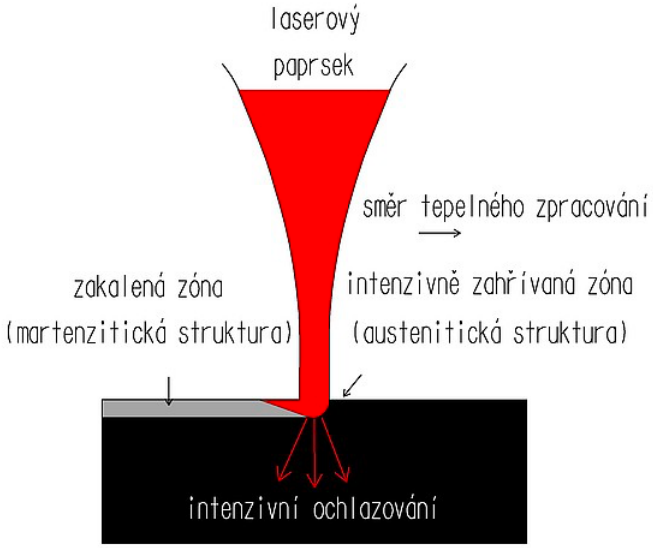


Obr. 4 : *Vliv rychlosti posuvu hořáku na hloubku prokalení oceli AISI 1050* [21]

2.2.3 Kalení laserem

Laser je koherentní vysoko energetické elektromagnetické záření, jehož energii využíváme i pro povrchové kalení. Při dopadu paprsku na povrch je část energie absorbována ve formě tepla, díky čemuž je možné ohřívat povrchy rychlostí 10^4 až 10^6 °C/s. Povrchová vrstva je během zlomku sekundy austenitizována a jádro je téměř neovlivněno. Účinnost ohřevu je snižována zejména tím, že část záření je od povrchu součásti odražena. Tento jev je závislý zejména na materiálu, povrchové úpravě a vlnové délce použitého záření. V některých případech je vlnová délka záření volena tak, aby byla maximalizována transformace energie. Dodaná energie je poté odvedena do jádra (Obr. 5), což zajistí dostatečnou rychlost ochlazení pro vznik martenzitu a zároveň odpadá nutnost vnějšího chlazení. Tento plynulý odvod tepla má za následek vznik jemnějšího martenzitu s tvrdostí vyšší až o 100 HV než u indukčního kalení. Dále také menší oxidaci povrchu a nižší vnitřní napětí. Zakalené vrstvy dosahují tlouštěk až 2 mm.

Laser má vyšší hustotu energie, než je tomu u výše uvedených konkurenčních technologií. Tuto technologii lze spolehlivě automatizovat. Laserové povrchové kalení je úspěšně používáno pro kalení ocelí a litin. [1, 8, 10, 21]



Obr. 5 : *Povrchové kalení laserem* [9]

2.2.4 Kalení elektronovým svazkem

Elektronový svazek je používán pro modifikaci vlastností povrchu materiálu a jednou z metod modifikace je i povrchové kalení. Nespornými výhodami elektronového svazku jsou jeho vysoká energetická hustota, možnosti rychlého vychylování svazku po povrchu materiálu a regulovatelnost celého procesu, díky čemuž mohou být povrchově kaleny i malé oblasti součástí a proces je reprodukovatelný.

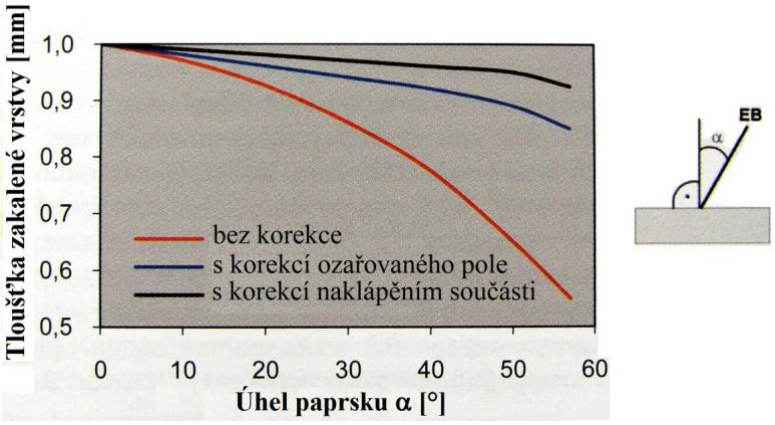
Při kalení je povrchová vrstva rychle zahřáta těsně pod teplotu tání a po krátké výdrži (v desetinách sekundy) je teplo odvedeno do materiálu. Tento odvod tepla dosahuje rychlostí až 10^4 K/s. Tloušťka zakalené vrstvy závisí na aplikovaných parametrech,

trajektorii vychylování paprsku, tloušťce materiálu a na úhlu dopadu paprsku na povrch součásti. Při zvětšování úhlu dopadu se vlivem energetických ztrát snižuje tloušťka zakalené vrstvy, což lze vidět na Obr. 6. Účinek tohoto jevu může být snížen korekcemi, ale úplně ho odstranit nelze.

Takto zakalené povrchy vykazují zvýšenou tvrdost – Zenker a Buchwalder [12] uvádějí, že na oceli 100Cr6 dosahují tvrdosti povrchu téměř 1000 HV0,3. Dále zvýšenou otěruvzdornost a korozivzdornost.

Kalení elektronovým svazkem je uplatňováno zejména v automobilovém průmyslu a při speciálních aplikacích. Celý proces musí probíhat ve vakuové komoře, což spolu s vysokou pořizovací cenou zařízení zůstává hlavní nevýhodou. [11, 12]

Při volbě technologie povrchového kalení je nutno brát v úvahu jak ekonomické hledisko, tak hlavně výhody a nevýhody technologií. Přehled hlavních výhod a nevýhod uvedených technologií je uveden v Tab. 1.



Obr. 6 : *Závislost tloušťky zakalené vrstvy na úhlu dopadu elektronového svazku* [12]

Tab. 1 : *Hlavní výhody a nevýhody technologií povrchového kalení*

Technologie	Výhody	Nevýhody
Plamen	nízké pořizovací náklady, přibližně konstantní rychlost ohřevu	pomalý ohřev, nižší homogenita struktury, obtížně dosažitelná menší hloubka zakalení
Indukce	relativně velká hloubka prokalení, snadná automatizace	nutnost relativně drahého induktoru na míru
Laser	vysoká rychlost ohřevu, přijatelná pořizovací cena	nižší variabilita vychylování a fokusace než u el. svazku
Elektronový svazek	vysoká rychlost ohřevu, vysoká hustota vnesené energie, rychlé vychylování svazku	nutnost vakua, vysoká pořizovací cena

2.3 Elektronový svazek

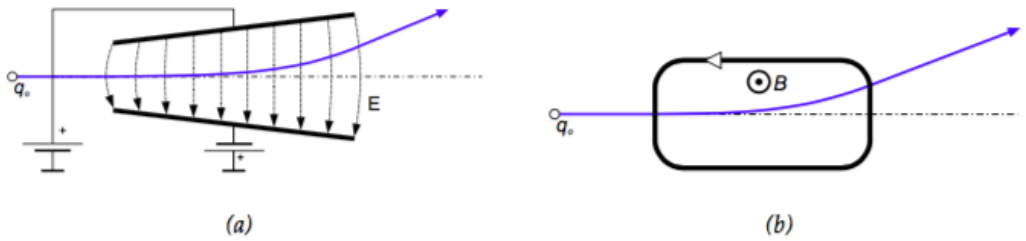
2.3.1 Generátor elektronového svazku

K vytvoření a manipulaci s elektronovým svazkem je zapotřebí poměrně komplikovaného generátoru, jehož schéma je znázorněno na Obr. 9. K vytvoření a urychlení svazku elektronů slouží žhavená termoemisní katoda a Wehneltův válec. U katody je možno využít i principu autoemise, kdy jsou elektrony emitovány působením silného elektrického pole. V tomto případě ale nastává problém nutnosti ultra vakuové aparatury (10^{-5} až 10^{-10} Pa) a nedostatečnosti poskytovaného výkonu, který je pro výkonové aplikace nutný. Z těchto důvodů je autoemisních katod užíváno zejména v elektronových mikroskopech. Katody bývají nejčastěji vyrobeny z wolframu, tantalu, nebo hexaboridu lanthanu (LaB_6). Na Obr. 7 je znázorněno těleso termoemisní katody s wolframovým drátem. [14]

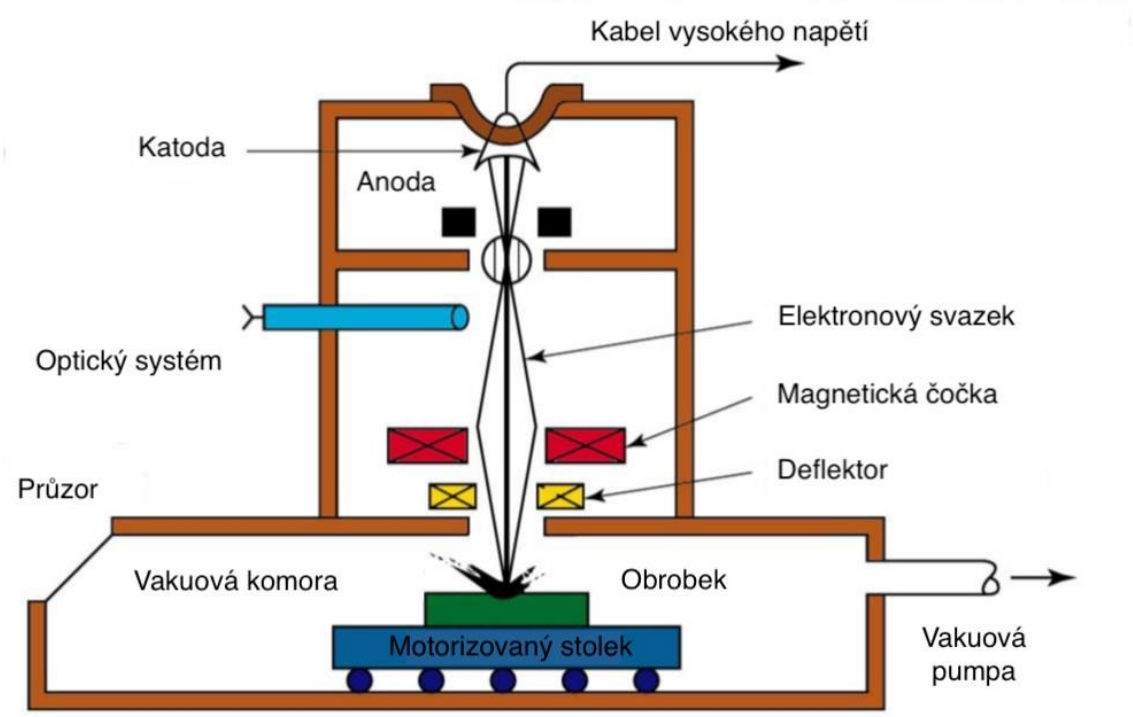
Obr. 7 : *Těleso termoemisní katody* [17]

Svazek elektronů je dále zaostřován, naváděn a vychylován optickými systémy na požadované místo určení. Toto je možno provést buď pomocí elektrického, nebo magnetického pole (Obr. 8). Vychylování pomocí elektrického pole je použitelné pouze pro nižší energie svazku a menší maximální výchylky, protože potřebné napětí na elektrostatických deskách roste úměrně s urychlovacím napěním elektronů [16]. Z těchto důvodů je tato metoda používána zejména u osciloskopických obrazovek a některých typů elektronových mikroskopů. Svazek běžněji vychylujeme pomocí magnetického pole indukovaného pomocí budících cívek. Uvnitř cívek je teoreticky homogenní magnetické pole, které vychyluje svazek směrem od optické osy systému. Toto vychýlení je závislé na intenzitě magnetického pole a odpovídá jeho směru. Hodnotu vychýlení tedy regulujeme budícím proudem protékajícím cívkou. Optický systém většinou obsahuje soustavu více cívek – centrovací, fokusační a vychylovací.

Nezbytnou součástí generátoru je evakuovaná pracovní komora, která udržuje tlak potřebný pro funkci zařízení a chrání obsluhu před emitovaným rentgenovým zářením. Komora obvykle obsahuje také motorizovaný upínací stůl a termokameru. [14, 15]



Obr. 8 : *Vychylování svazku* ***a)*** *elektrickým polem* ***b)*** *magnetickým polem* [15]



Obr. 9 : *Generátor elektronového svazku* [13]

2.3.2 Interakce elektronového svazku s materiálem

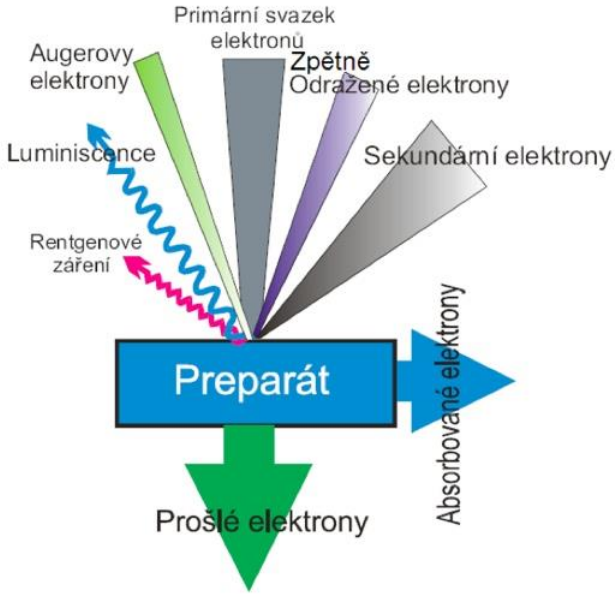
Při dopadu primárního svazku elektronů na povrch materiálu dochází k jeho penetraci. Hloubku penetrace elektronů lze orientačně vypočítat pomocí empirického vztahu:

$$d_v = 2{,}1 \cdot 10^{-5} \frac{U^2}{\rho} \qquad (2.2)$$

Hloubka penetrace d_v [μm] je přímo úměrná druhé mocnině urychlovacího napětí U [V] a nepřímo úměrná hustotě materiálu ρ [kg.m^{-3}].

Při průniku elektronů do materiálu dochází ke dvěma základním typům interakcí s hmotou materiálu, a to ke srážkám pružným a nepružným. Pružnou srážkou nazýváme kolizi elektronu s jádrem základního materiálu, při které ale nedochází k předání téměř žádné energie. Tyto srážky jsou relativně málo pravděpodobné. Podstatně

pravděpodobnější jsou srážky primárních elektronů s elektrony v obalech základního materiálu. Těmto srážkám říkáme nepružné a předaná energie je při nich podstatně větší než při pružných srážkách. Důležité jsou také srážky s mřížkovými fonony, jimž elektrony předávají energii a zvyšují tak energii mřížkových atomů, což se projeví zvyšováním teploty. V důsledku interakcí primárních elektronů s materiálem vzniká celá řada signálů, jak je patrné z Obr. 10. Detekcí a vyhodnocením těchto signálů lze získat informace o struktuře a chemickém složení materiálu. [19]



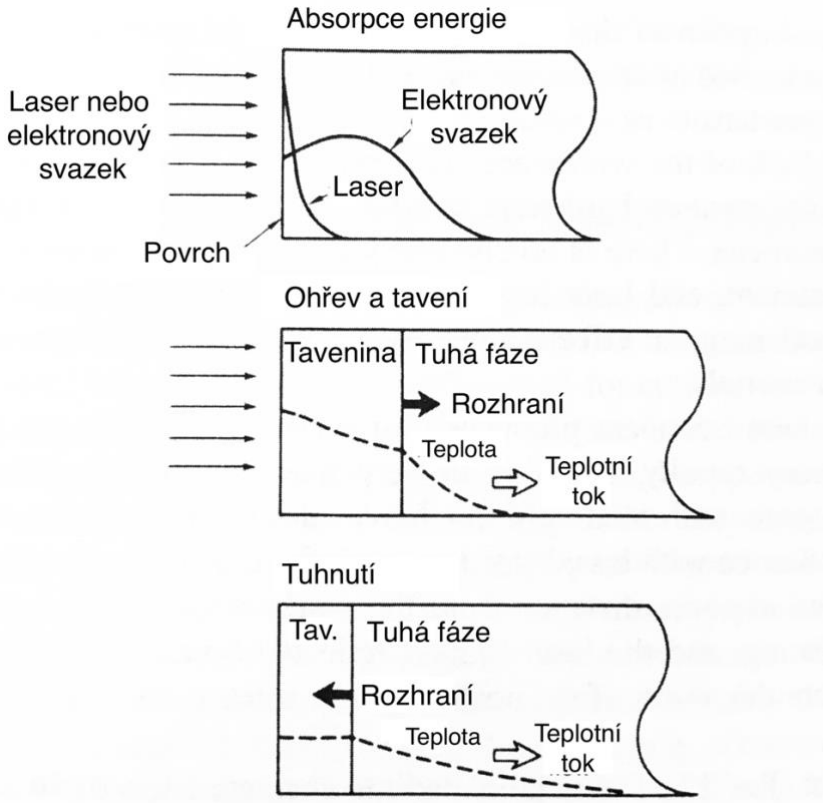
Obr. 10 : *Přehled interakcí elektronu s materiálem* [18]

Primární elektrony mohou ztratit při srážkách část své energie a poté vzorek opustit. Tyto elektrony poté nazýváme zpětně odražené. Sekundární elektrony vznikají při srážce primárního elektronu s elektrony v atomových obalech. Při předání dostatečné energie je elektron schopen obal a poté i vzorek opustit a je možno jej detekovat. V případě tenkých preparátů procházejí primární elektrony vzorkem skrz (transmitované elektrony). Pokud primární elektron koliduje s elektronem ve vnitřní energetické hladině obalu a dojde k excitaci, tak vznikne díra, která je zaplněna elektronem z vyšší energetické hladiny a přebytek energie je vyzářen ve formě charakteristického rentgenova záření. Toto záření dále může způsobit excitaci elektronu nacházejícího se ve vyšší vrstvě. Tento elektron je pak nazýván Augerův. Augerův elektron má poměrně malou energii, a proto může opustit vzorek jen z hloubky několika nanometrů. Kromě charakteristického rentgenova záření vzniká při interakcích i nekvantované spojité záření. Energie rentgenova záření rychle roste se zvyšujícím se urychlovacím napětím. Při překročení hodnoty 60 kV je obvykle zapotřebí aplikovat přídavná bezpečností opatření. Při nižších hodnotách napětí k zajištění bezpečnosti většinou stačí stěna komory. Dopadající elektrony také způsobují vznik záření s vlnovou délkou ve viditelné části spektra (luminiscence). [19]

Většinu své energie předají primární elektrony částicím bombardovaného materiálu prostřednictvím nepružných srážek. Část této energie se spotřebuje při emisi zmíněných

druhů záření a částic, ale většina (nejdříve asi 60 %, ale s rostoucí hloubkou penetrace až 95 %) energie látku zahřívá. Dobře fokusovaný elektronový svazek může dosahovat objemové hustoty výkonu 10^5 až 10^8 W·mm^{-3}. Tepelné účinky silně ovlivňuje plošná hustota výkonu svazku, která se pohybuje v poměrně širokém rozsahu, a to od 10^{-1} do 10^7 W·mm^{-2}. Pro povrchové kalení je plošná hustota výkonu obvykle 10^{-1} až 1 W·mm^{-2}. [15]

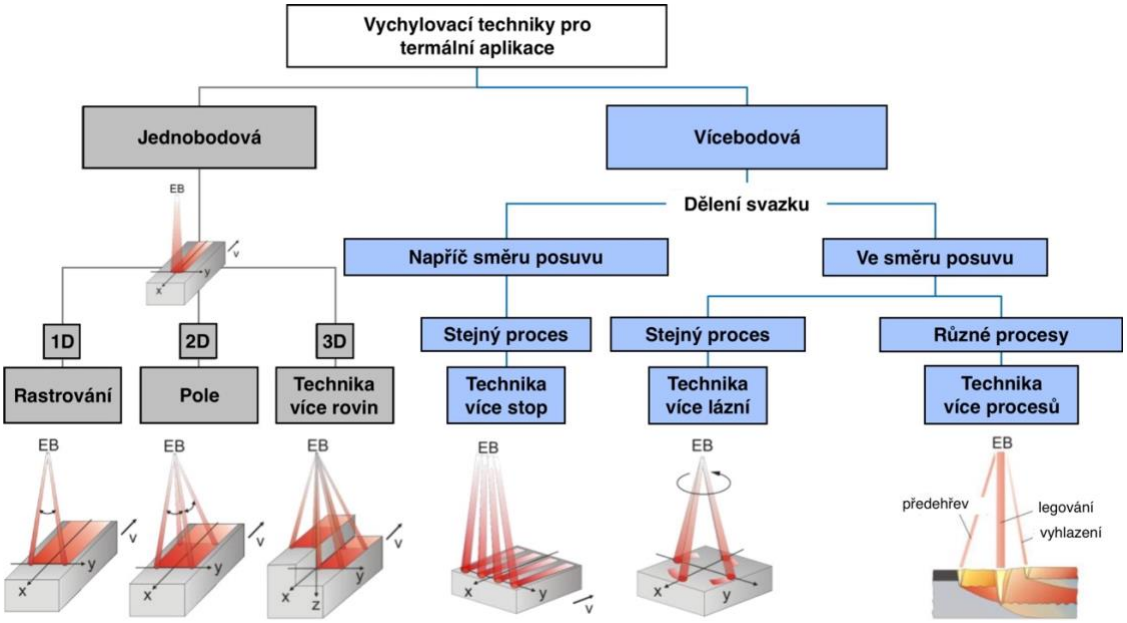
Dopadající elektrony způsobují rychlé roztavení a odpaření materiálu. Obr. 11 znázorňuje kvalitativní rozdíl mezi absorpcí energie laserového paprsku a elektronového svazku při přetavení povrchu. Dále pak schematicky znázorňuje tavení a tuhnutí povrchové vrstvy. Díky principu ohřevu laserem a elektronovým svazkem lze materiál dostatečně zahřát v časovém intervalu řádu nanosekund. Ochlazování dosahuje podobných rychlostí. George Krauss [21] uvádí, že rychlosti ohřevu a ochlazování mohou v některých případech dosahovat hodnot 10^8 až 10^{10} K/s. Důsledkem je extrémně rychlé tuhnutí za vzniku velmi jemných nerovnovážných struktur. Při extrémních podmínkách lze pozorovat výskyt nových metastabilních krystalických fází, amorfních struktur nebo superpřesycených tuhých roztoků. [21]



Obr. 11 : *Absorpce energie při ohřevu laserem a elektronovým svazkem, schémata tavení a tuhnutí modifikovaného povrchu* [21]

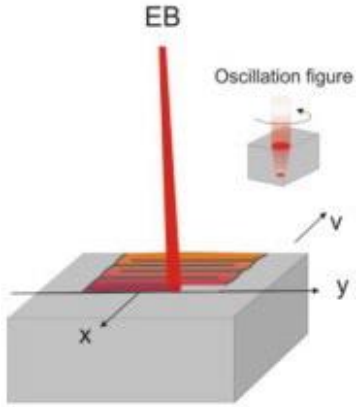
2.3.3 Možnosti ovládání trajektorie

Technologie elektronového svazku vyniká nad výše zmíněnými svými širokými možnostmi ovládání trajektorie. Při pohledu na Obr. 12 můžeme vidět, že i základní přehled těchto možností je velmi různorodý. Díky těmto možnostem a jejich kombinacím můžeme dosahovat povrchových modifikací, které jsou na jeden průchod ostatními technologiemi nedosažitelné. Příkladem může být technika, při které svazek aplikuje v jednom průchodu proces předehřevu, přetavení povrchu s legováním a nakonec vyhlazení.



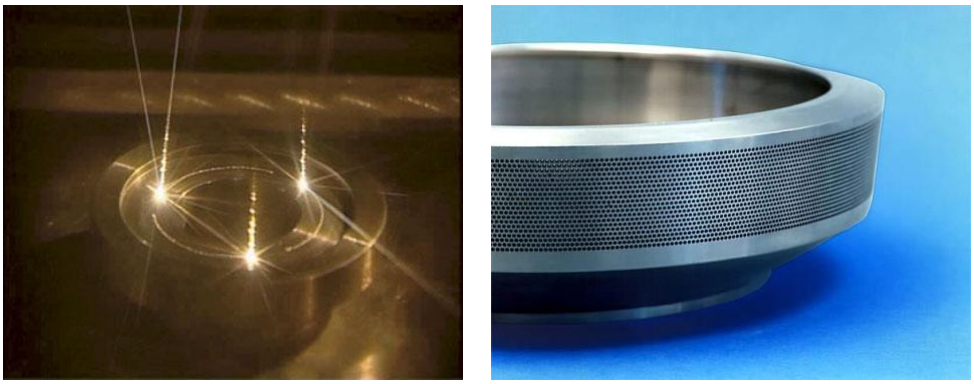
Obr. 12 : *Přehled možností vychylování elektronového svazku* [20]

Trajektorie rozdělujeme podle počtu bodů, mezi kterými svazek rastruje, dále podle směru posuvu, a nakonec podle aplikovaných technik tepelného zpracování. Mezi techniky, kdy svazek není rozdělen – tzv. jednobodové patří, prosté postupné rastrování povrchu. Tato technika je dobře pochopitelná například na rastrování vzoru tzv. meandrů – viz Obr. 13. Dále je možné rastrování o vyšší frekvenci ve dvou osách – vznikne vzor 2D plochy s možností gradientu teplotního pole, např. se snižující se plošnou hustotou výkonu svazku ve směru posuvu. Těmito poli je možno v jednu chvíli tepelně zpracovávat i více oddělených ploch, a dokonce i ve více fokusačních rovinách. V tomto případě jsme limitováni pouze vychylovacími možnostmi optického systému (zejména maximální možnou výchylkou).



Obr. 13 : *Aplikace techniky meandrů* [20]

Svazek je možné také rozdělit a modifikovat povrch pomocí více stop. Tato technologie je zajímavá tím, že je možné aplikovat více různých pochodů najednou, jak již bylo zmíněno. Technika rozdělení svazku umožňuje také unikátní možnost svařování elektronovým svazkem pomocí více lázní současně (anglicky „multipool“). Tato technologie není na jiných zařízeních možná. Při tomto svařovacím pochodu jsou minimalizovány teplotní deformace svařované součásti. Průběh takového svařování je zobrazen na Obr. 14a. Zařízení pracující s elektronovým svazkem je s úspěchem používáno k vrtání až několika tisíc děr za sekundu. Pokud je zařízení opatřeno otočným vřetenem a součást je rotační je možno vrtat s vysokou produktivitou. Typický příklad takto vrtané součásti můžeme vidět na Obr. 14b. Zařízení instalováno na ÚMVI FSI VUT ale touto možností nedisponuje. Na tomto místě můžeme konstatovat, že elektronovým svazkem lze manipulovat s vysokou variabilitou a frekvencí v důsledku funkce optického systému, který nepracuje s mechanickými částmi, ale pouze s elektronickým signálem. [19]



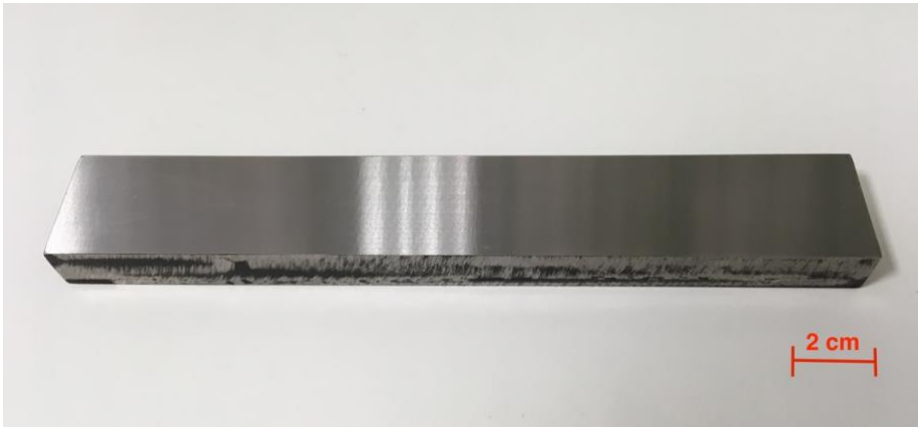
a) b)

Obr. 14 : *a) vícebodové svařování, b) Nástroj na výrobu polymerních vláken* [19]

3 POPIS EXPERIEMENTU

3.1 Experimentální materiál

Jako experimentální materiál byla zvolena ocel vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení 42CrMo4 (dle ČSN 15142), která je legována chromem a molybdenem z důvodu zvýšení prokalitelnosti. U dodaného materiálu bylo ověřeno chemické složení pomocí emisního spektrometru Spectrumat GDS 750. Výsledek analýzy je uveden v Tab. 2, přičemž obsah železa jakožto majoritního prvku tvoří zbytek. Pro kalení elektronovým svazkem a laserem byl použit materiál ve formě plochých tyčí o rozměrech 40x20x250 mm viz Obr. 15. Pro kalení pomocí elektromagnetické indukce byla z důvodu nutnosti úpravy geometrie kvůli induktoru zvolena forma kruhových tyčí o průměru 23 mm.

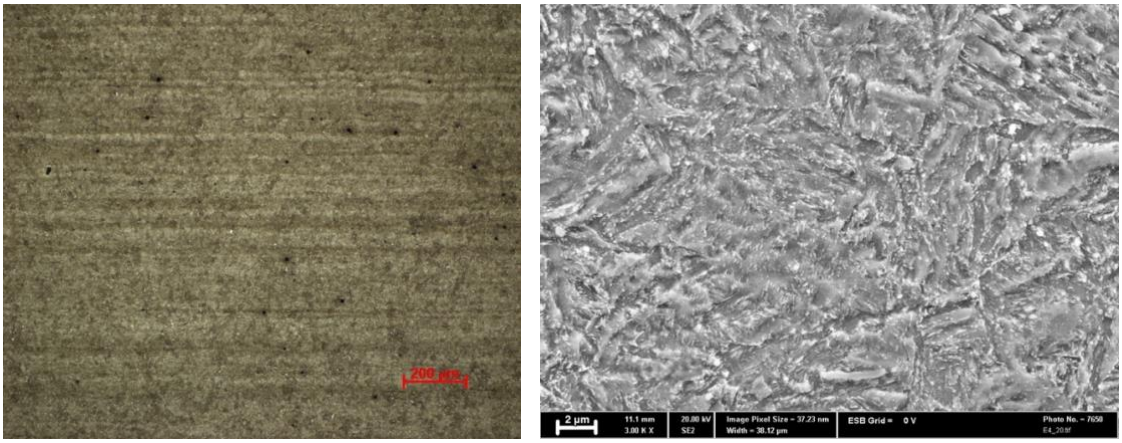


Obr. 15 : *Experimentální materiál*

Tab. 2 : *Výsledek spektrální analýzy (hm. %)*

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0,41	0,69	0,25	0,007	0,015	1,04	0,08	0,20	0,11
Al	**Ti**	**Co**	**Sn**					
0,037	0,01	0,01	0,01					

Z důvodu potřeby definované výchozí struktury materiálu byly všechny tyče v kalírně Q.I.P. s.r.o. kaleny a popuštěny. Ohřev vsázky trval 60 minut, po kterém následovala 60 minutová výdrž na kalící teplotě 850 °C. Vsázka byla kalena do oleje o teplotě 75 °C. Popouštění probíhalo při teplotě 600 °C po dobu 180 minut z čehož výdrž na popouštěcí teplotě byla 120 min. Struktura po zušlechtění byla sorbitická, která je pro povrchové kalení optimální, protože nejrychleji transformuje na austenit. Sorbit vzniklý po popuštění na 600 °C je spíše hrubší, ale výsledná vnitřní napjatost je nižší, čímž je sníženo riziko vzniku kalících trhlin. Vzniklá výchozí mikrostruktura, která je na Obr. 16 měla zřetelnou texturu vzniklou tvářením polotovaru.



a) b)

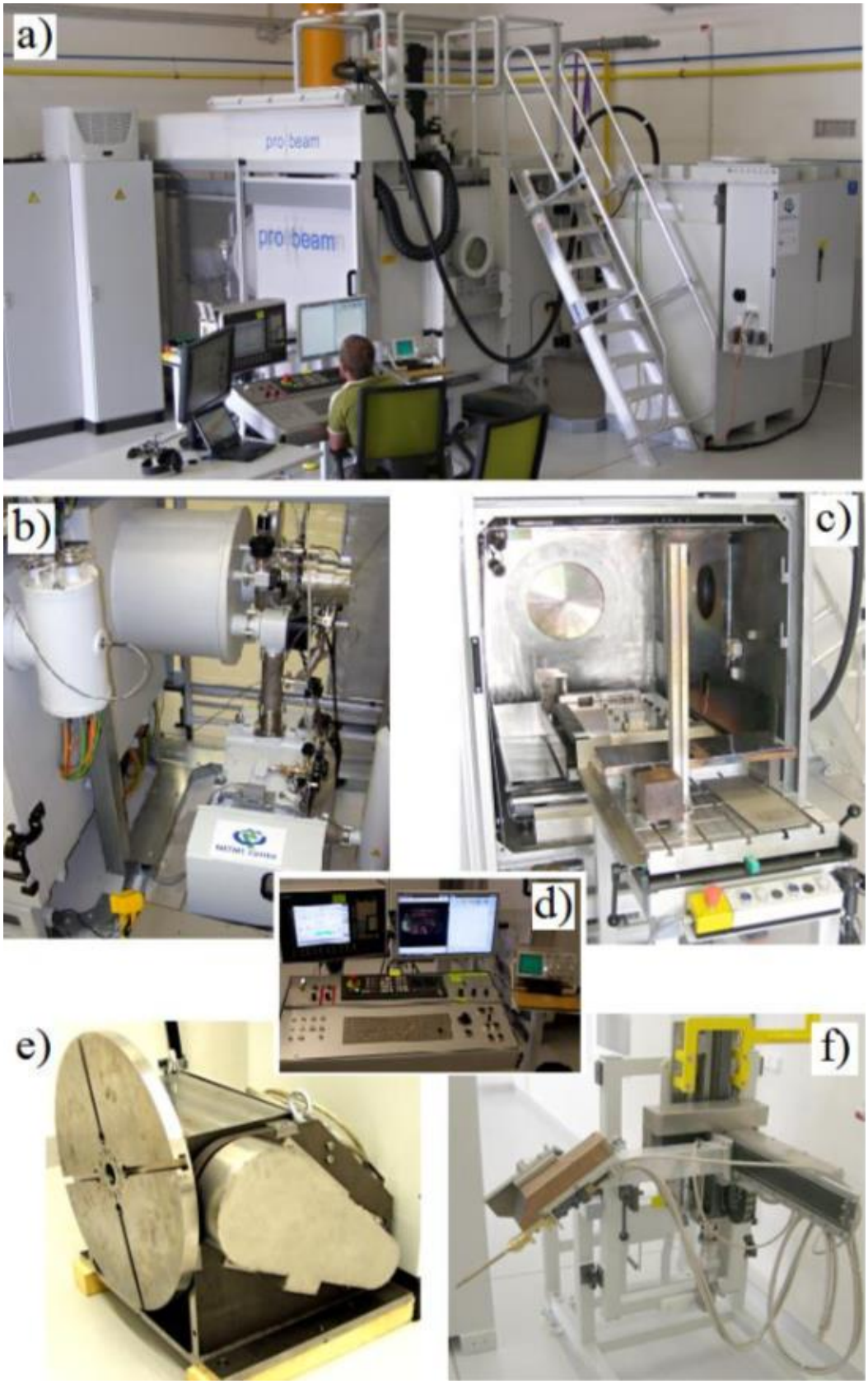
Obr. 16 : *Výchozí mikrostruktura a) SM B) SEM, sekundární elektrony*

3.2 Povrchové kalení

Cílem této práce je porovnání výsledků kalení elektronovým svazkem, laserem a pomocí elektromagnetické indukce se současným posouzením vlivu vychylovacích módů elektronového svazku. Kalení bylo tedy provedeno na šesti sériích vzorků, přičemž čtyři série byly kaleny elektronovým svazkem, jedna laserem a jedna pomocí elektromagnetické indukce. Pro danou sérii byla vždy použita daná kalící technologie, ale byly voleny různé technologické parametry. Výjimku tvoří série vzorků kalených elektronovým svazkem s částečným natavením povrchu, která zahrnuje více kalících obrazců. K povrchovému kalení elektronovým svazkem bylo použito zařízení od firmy Probeam. Konktrétně se jednalo o typ PROBEAM K26. Zařízení je nainstalováno v NETME centre a je v působnosti Ústavu materiálových věd a inženýrství fakulty strojního inženýrství VUT Brno. Tento generátor elektronového svazku je vybaven motorizovaným pracovním stolkem pohyblivým ve dvou osách a přídavným polohovacím zařízením, které lze na stolek instalovat. Toto přídavné zařízení umožňuje náklon obrobku až o 90 ° a také rotaci kolem osy kolmé na osu náklonu s rychlostí otáčení dosahující 100 $ot \cdot min^{-1}$. Pohyby jsou programovány v jazyce Sinumerik. Mezi další výbavu generátoru patří podavač drátu, kterého je využíváno při svařování a legování. Generátor PROBEAM K26 umožňuje všechny běžné technologické aplikace elektronového svazku s výjimkou vrtání. Přehled základních technických dat generátoru je uveden níže v Tab. 3. Do pracovní komory je možné také zavádět procesní a inertní plyny. Výhodou tohoto generátoru je možnost umístění elektronového tubusu jak do polohy vertikální, tak do polohy horizontální z boku vakuové komory. Fotodokumentace generátoru je na Obr. 17. [22]

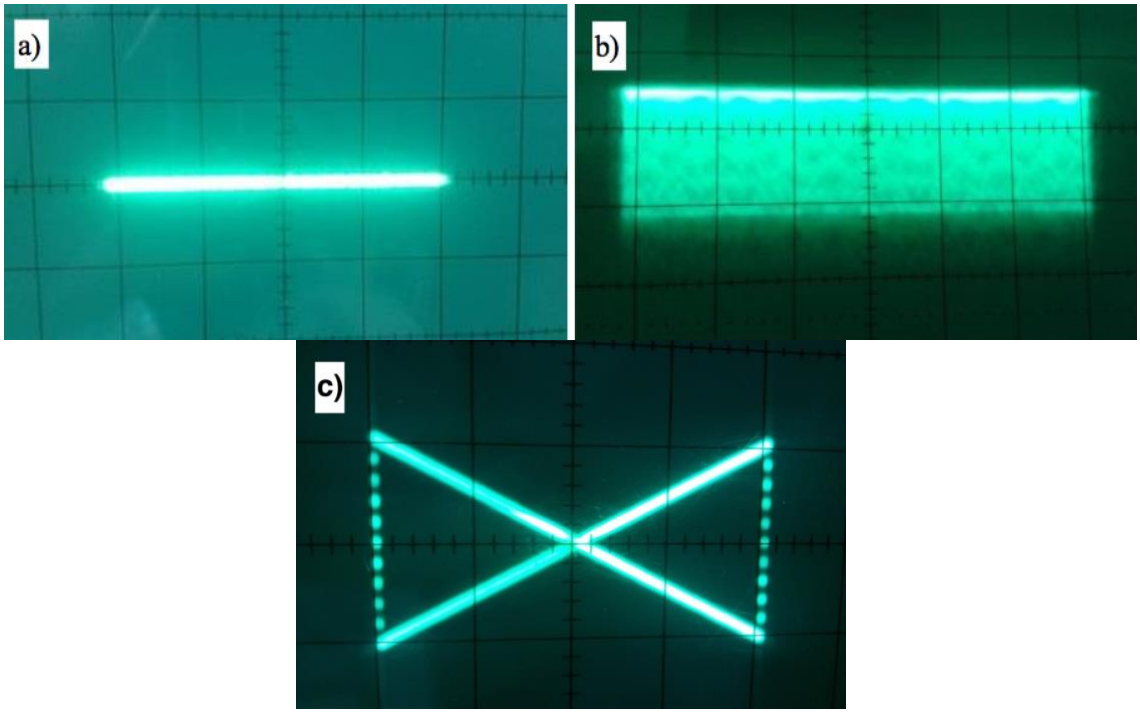
Tab. 3 : *Základní technická data zařízení PROBEAM K26* [22]

Objem komory	2,6 m^3
Rozměry pracovního stolku	500x800 mm
Maximální výška	700 mm
Maximální výkon svazku	15 kW
Urychlovací napětí	60 až 150 kV
Úroveň vakua	0,1 Pa
Doba provozního vyčerpání komory	15 min



Obr. 17 : *Generátor elektronového svazku a) celkový pohled, b) vakuový systém, c) motorizovaný stolek, d) pult operátora, e) polohovací zařízení, f) podavač drátu* [17]

Pro kalení elektronovým svazkem byly zvoleny tři typy obrazců, které svazek při vychylování vytváří – linka, pole, meandry. Tyto termíny objasňují naši představu o pohybu svazku po vzorku. Na Obr. 18 jsou fotografie uvedených obrazců zobrazených na osciloskopu generátoru elektronového svazku. Obrazec uvedený na Obr. 18c sice ilustruje pohyb elektronového svazku, ale nikoli reálnou dráhu svazku po vzorku. Pohyb vzorku kompenzuje sklon zobrazených linií a výsledkem jsou rovnoběžné přejezdy, jak bylo již ukázáno na Obr. 13. Těmito třemi postupy byly povrchově zakaleny vzorky s přetavením části povrchu i bez přetavení.

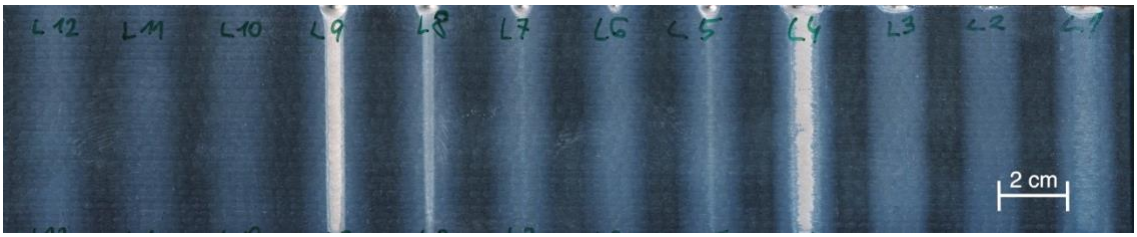


Obr. 18 : *Obrazce vychylování el. svazku na osciloskopu a) linka, b) pole, c) mendr* [23]

Trajektorie linky je ve skutečnosti tvořena tisíci body, mezi kterými svazek osciluje a které jsou rozprostřeny po námi zvolené délce. V našem případě je délka přímky 10 mm a vzdálenost mezi body je tedy 0,01 mm. Pro vzor pole byla taktéž zvolena šířka 10 mm, přičemž délka pole byla proměnlivá, podle rychlosti posuvu. Zjednodušeně lze ale říci, že délka pole se přibližně rovná rychlosti posuvu vzorku. Tato trajektorie byla naprogramována s gradientem plošné hustoty energie tak, že na začátku pole byl materiál intenzivně ohříván, a poté byl na této teplotě přibližně udržován. Toho bylo docíleno různou hustotou bodů, mezi kterými svazek rastroval. Na začátku je tedy hustota bodů vysoká a poté je snížena. U trajektorie meandrů byla zvolena stejná šířka jako u trajektorií předchozích a jednotlivé přejezdy byly od sebe vzdáleny 0,5 mm.

Každá série vzorků bez přetavení vždy odpovídá jednomu rastrovacímu vzoru, ale každý vzorek je zakalen při jiných technologických parametrech. Proměnlivými parametry byly proud svazku, úroveň zaostření (offset) a rychlost posuvu vzorku. Úroveň zaostření je udávána v miliampérech, protože odpovídá hodnotě budícího proudu protékajícího fokusační cívkou. Urychlovací napětí bylo vždy 80 kV. Přehled vzorků kalených elektronovým paprskem bez přetavení je v Tab. 4. Vzorky, u nichž naopak došlo

při kalení k přetavení části povrchu, jsou seřazeny v Tab. 5. Těmito postupy vznikly zakalené stopy, které jsou zobrazeny na Obr. 19.



Obr. 19 : *Vzorek s kalenými stopami*

Tab. 4 : *Přehled vzorků kalených elektronovým paprskem*

označení vzorku	proud el. svazku [mA]	rychlost posuvu [mm/s]	rozostření [mA]
trajektorie linka			
L1	12	5	100
L2	13	7,5	100
L3	15	10	100
L4	18	12,5	100
L5	12	15	50
L6	19	15	100
L7	30	15	200
L8	48	15	300
L9	82	15	400
L10	22	20	100
L11	25	25	100
trajektorie pole			
P1	14	5	100
P2	23	10	100
P3	32	15	50
P4	37	15	100
P5	44	15	200
P6	64	15	300
P7	46	20	100
P8	66	25	100
trajektorie meandry			
M1	9	5	100
M2	13	10	100
M3	16	15	100
M4	32	15	200
M5	51	15	300
M6	19	20	100
M7	21	25	100

Tab. 5 : *Přehled vzorků kalených elektronovým svazkem s přetavením části povrchu*

označení vzorku	proud el. svazku [mA]	rychlost posuvu [mm/s]	rozostření [mA]
trajektorie linka			
R1	24	15	100
R2	29	15	100
R3*	24	15	100
R4	19	15	100
trajektorie meandry			
R5	20	15	100
R6	24	15	100
R7**	20	15	100
R8**	24	15	100
trajektorie pole			
R9	46	15	100
R10	56	15	100

* Vzorek R3 byl kalen s oscilační frekvencí 250 Hz, kdežto ostatní vzorky trajektorie linka s frekvencí 1000 Hz.
**Vzorky R7 a R8 byly kaleny se vzdáleností mezi přejezdy 0,25 mm.

Vzorky kalené pomocí laseru jsou uvedeny v Tab. 6. Kalení bylo provedeno pomocí šestiosého robota Motoman, vlnová délka použitého světla byla 1030 nm. Pro toto kalení byly zvoleny dva pracovní módy – kalení pomocí statického a oscilujícího paprsku. Od daného módu se tedy odvíjela šířka rastrované stopy na povrchu vzorku. Pro oscilující svazek byla zvolena stejná šířka stopy jako u výše uvedeného kalení el. svazkem, tedy 10 mm a pro statický byla stopa bodová. U obou pracovních módů byla měněna rychlost posuvu a dále úroveň rozostření paprsku. Tyto parametry patří mezi hlavní technologické parametry tohoto pochodu.

Tab. 6 : *Přehled vzorků kalených pomocí laserového paprsku*

označení vzorku	mód	šířka stopy [mm]	rychlost posuvu [mm/s]	rozostření
S1	oscilující	10	5	maximální
S2	oscilující	10	15	maximální
S3	oscilující	10	15	poloviční
S4	oscilující	10	5	poloviční
S5	statický	bod	5	maximální
S6	statický	bod	15	maximální
S7	oscilující	10	3	maximální

Pro kalení pomocí elektromagnetické indukce bylo použito zařízení pro indukční ohřev od firmy ZEZ Rychnov n. Nisou – typ GV80. Proměnlivým parametrem byl mřížkový proud. Ostatní parametry byly pro všechny vzorky identické.

Tab. 7 : *Přehled vzorků kalených pomocí elektromagnetické indukce*

označení vzorku	mřížkový proud [A]	anodové napětí [kV]
I1	2,6	7,5
I2	2,8	7,5
I3	2,9	7,5

3.3 Příprava vzorků

Pro účely hodnocení mikrostruktury byly z experimentálního materiálu připraveny standartními technikami metalografické výbrusy. Z tyčí byly jednotlivé stopy po kalení vyříznuty a poté byly rozřezány příčně vzhledem ke směru posuvu při kalení. Řezání bylo provedeno pomocí metalografické pily Struers Discotom-6. Poté byly vzorky zalisovány za tepla pomocí poloautomatického lisu Leco PR-4X a lisovací hmoty ClaroFast. Zalisované vzorky byly dále broušeny brusnými papíry se zrnitostí 120 až 4000, a poté leštěny pomocí plátna a past o zrnitostech 3 a 1 μm. Broušení a leštění bylo provedeno na zařízení Leco GPX 300. Takto připravené výbrusy byly naleptány leptadlem Nital 2 %. Výbrusy byly pozorovány pomocí světelného mikroskopu Axiovert od firmy Zeiss a pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu Zeiss Ultra Plus, kde byly k pozorování využity zpětně odražené i sekundární elektrony. Před pozorováním vzorků na rastrovacím elektronovém mikroskopu bylo provedeno povrchové nauhličení.

3.4 Měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti metodou podle Vickerse bylo provedeno na mikrotvrdoměru značky Leco. Indentor byl čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136 °. U všech zkoušek byla zvolena zátěžná síla F = 4,9 N a indentační čas byl t = 10 s. Touto metodou byly na zkušebních vzorcích měřeny průběhy hodnot tvrdosti od povrchu směrem do jádra.

3.5 Rentgenová difrakce

Fázová identifikace pomocí rentgenové difrakce byla prováděna na zařízení X‘pert od společnosti Philips instalovaném na Ústavu materiálových věd a inženýrství. Měření probíhalo s Bragg – Brentano geometrií pomocí Cu K_α záření.

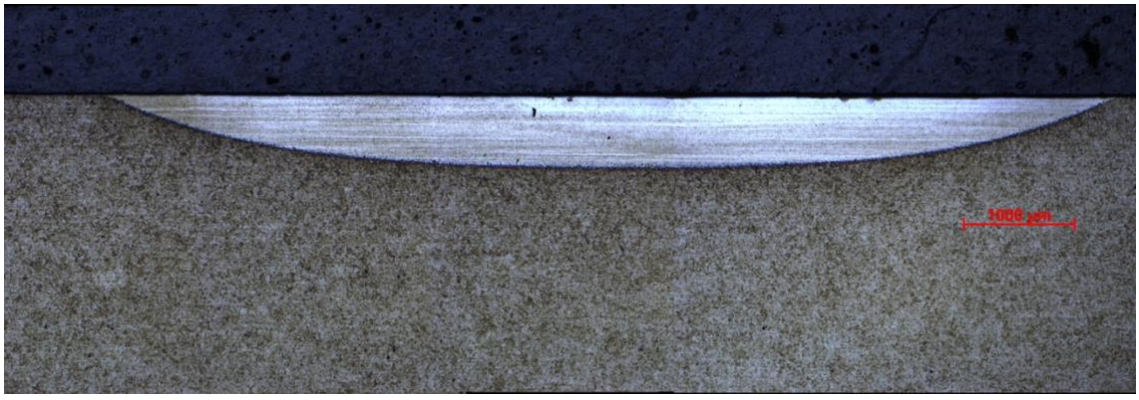
4 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY

4.1 Hodnocení mikrostruktury

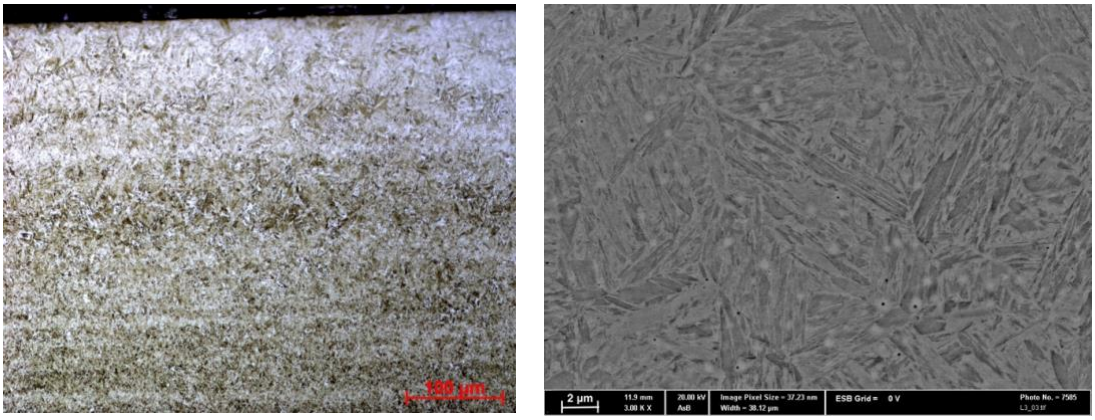
Kalení elektronovým svazkem – trajektorie linka

Na příčném výbrusu (Obr. 20) můžeme vidět, že stopa vzniklá po kalení elektronovým svazkem má tvar „čočky“. Vzorky v celé sérii kalené trajektorií linka vykazují velmi podobný tvar zakalené vrstvy s výjimkou vzorku L5, kde je vrstva výrazně tenčí, což je pravděpodobně důsledek nízkého rozostření a nízkého proudu svazku. Na vzniklé vrstvě je zachována textura výchozí struktury (viz Obr. 16). Textura byla zachována na všech vzorcích u všech trajektorií při kalení el. svazkem bez částečného natavení povrchu. Na Obr. 21 můžeme vidět, že zakalená vrstva je tvořena převážně laťkovým martenzitem. Stejně je tomu u všech vzorků v sérii. Na Obr. 22 je zachycena přechodová oblast mezi povrchově zakalenou vrstvou a základním materiálem. Oblasti základního materiálu jsou naleptány více než kalená vrstva, protože martenzit se leptá podstatně hůře než sorbit.

Na vzorku L6 byla provedena fázová analýza pomocí rentgenové difrakce (Obr. 23). Identifikovanými fázemi byly 1,9 % cementitu, α-ferit a 2,3 % zbytkového austenitu. Tetragonalita mřížky α-feritu byla pomocí daného zařízení neměřitelná, proto byla fáze označena jako α-ferit, i když se zjevně jedná o martenzit. Identifikace cementitu dokazuje, že austenitizace neproběhla dostatečně a že kalení bylo provedeno z heterogenní struktury obsahující austenit a nerozpuštěný cementit.

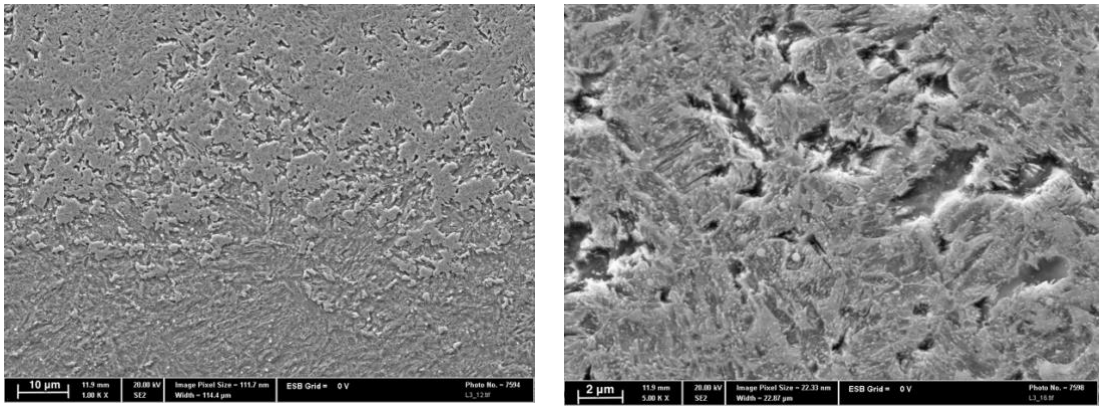


Obr. 20 : *Makrostruktura vzorku L6 na SM*



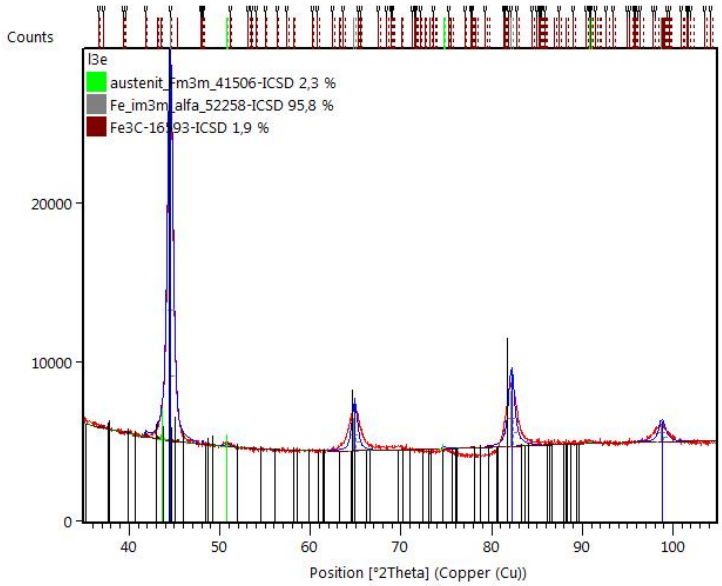
a) b)

Obr. 21 : *Mikrostruktura zakalené vrstvy vzorku L6 a) SM b) SEM zpětně odražené elektrony*



a) b)

Obr. 22 : *Mikrostruktura vzorku L6 – přechod mezi zakalenou vrstvou a zákl. mat. SEM, sekundární elektrony*

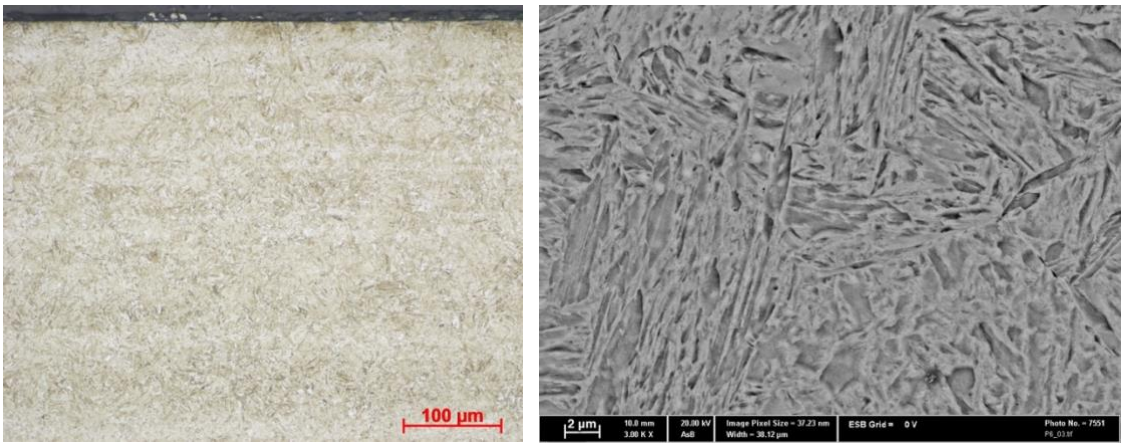


Obr. 23 : *Rentgenová difrakce – výsledné spektrum pro vzorek L6*

Kalení elektronovým svazkem – trajektorie pole

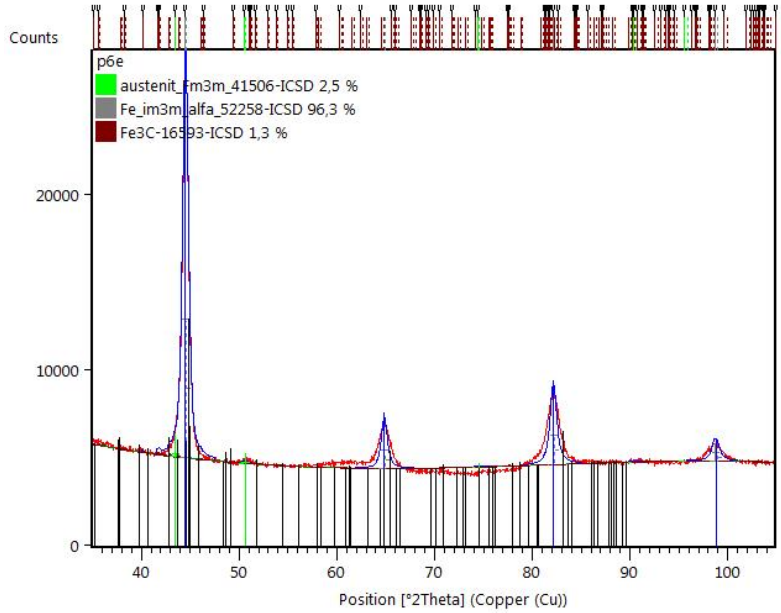
Vrstva vzniklá po povrchovém kalení s trajektorií kalícího pole zobrazená na Obr. 24 je celistvá a má pravidelný tvar. Na Obr. 25 vidíme detailní snímky kalné vrstvy, na nichž jsou viditelné laťky martenzitu. Rentgenovou difrakcí byla ve vzorku P4 prokázána přítomnost 2,5 % zbytkového austenitu 1,3 % cementitu a již zmíněného martenzitu - Obr. 26. Přítomnost cementitu opět dokládá nedostatečnou austenitizaci před samotným kalením. Podle fotografií z rastrovacího elektronového mikroskopu můžeme říci, že kalená vrstva má u všech vzorků v sérii podobnou makrostrukturní i mikrostrukturní morfologii.

Obr. 24 : *Makrostruktura vzorku P4 na SM*



a) b)

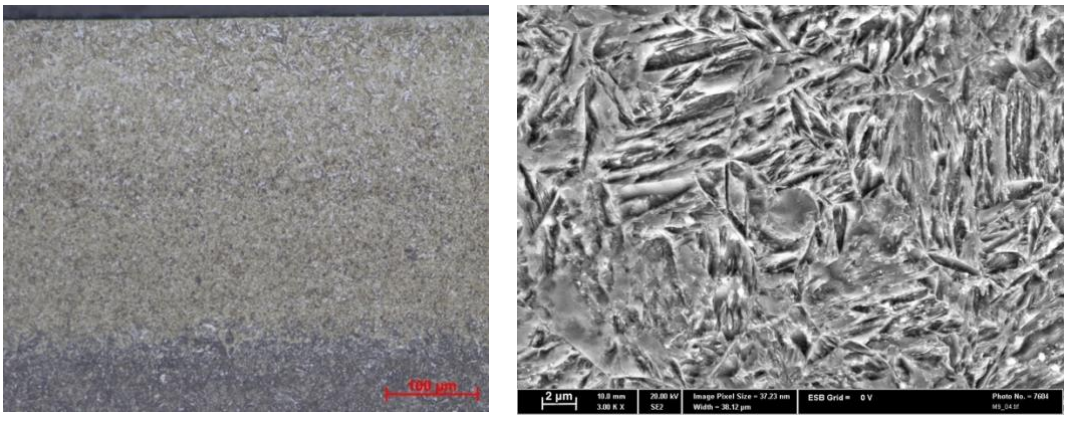
Obr. 25 : *Mikrostruktura zakalené vrstvy vzorku P4 a) SM b) SEM zpětně odražené elektrony*



Obr. 26 : *Rentgenová difrakce – výsledné spektrum pro vzorek P4*

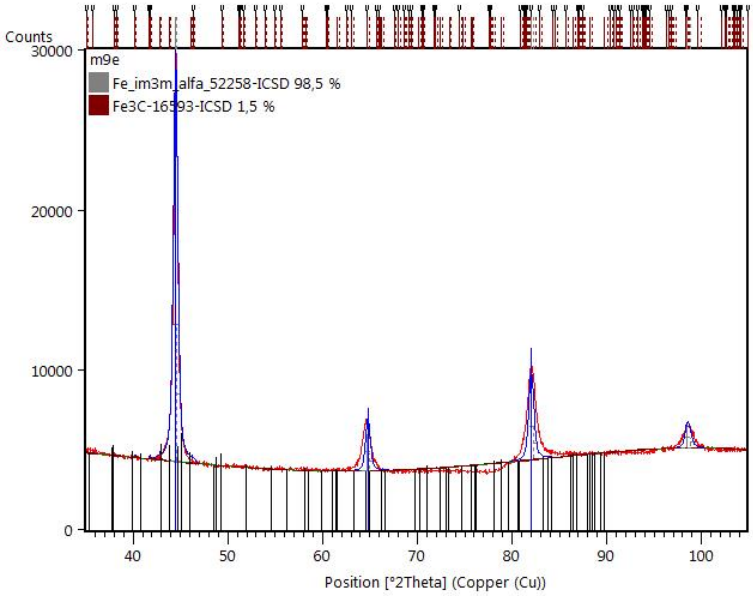
Kalení elektronovým svazkem – trajektorie meandry

Mikrostruktura vzniklá povrchovým kalením elektronovým svazkem a aplikovanou trajektorií meandrů nevykazuje oproti předešlým trajektoriím zásadní mikrostrukturní rozdíly. Na Obr. 27 je vidět, že mikrostruktura je i v tomto případě tvořena laťkovým martenzitem a jsou zde patrné i hranice původního austenitického zrna. Rentgenovou difrakcí provedenou na vzorku M3 byl identifikován pouze martenzit a 1,5 % cementitu – viz Obr. 28. Obsah zbytkového austenitu byl pod detekčním limitem přístroje.



a) b)

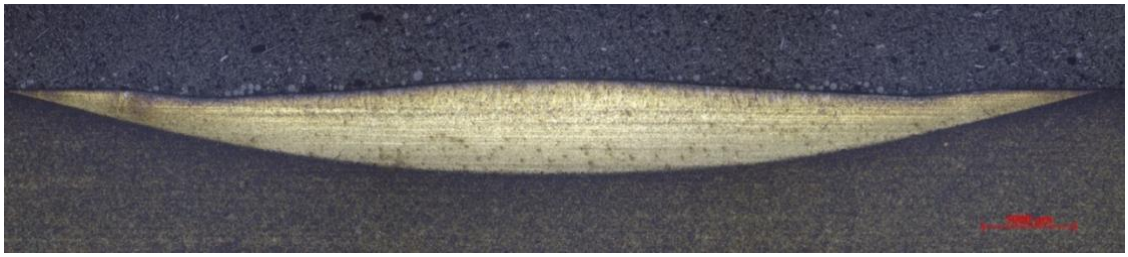
Obr. 27 : *Mikrostruktura zakalené vrstvy vzorku M3 a) SM b) SEM sekundární elektrony*



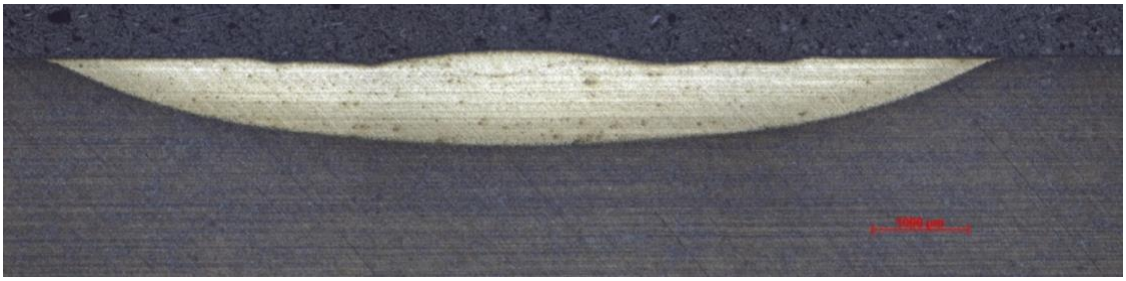
Obr. 28 : *Rentgenová difrakce – výsledné spektrum pro vzorek M3*

Kalení elektronovým svazkem s částečným natavením povrchu

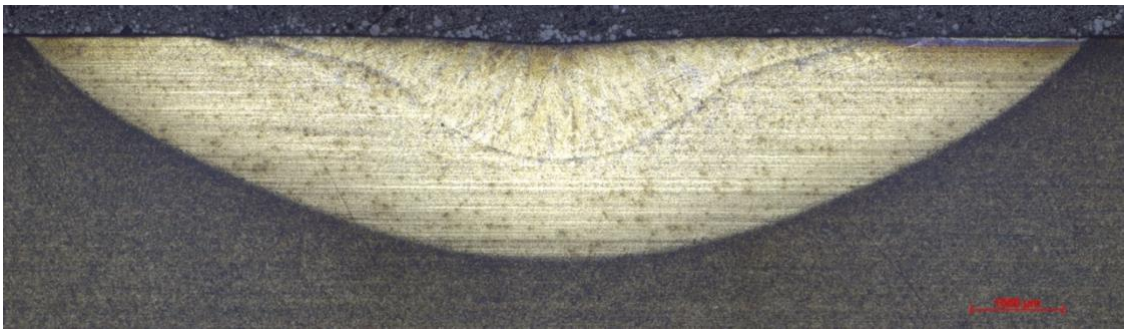
Při kalení s částečným natavením povrchu bylo použito vyšších proudů elektronového svazku. U vzorku R4 nedošlo k natavení povrchu, protože proud byl nedostatečný. U všech ostatních vzorků byl povrch částečně nataven a deformován. Na Obr. 29 můžeme vidět, že k částečnému natavení povrchu vzorku R6, který byl kalen trajektorií meandrů, došlo poměrně rovnoměrně. U vzorků kalených s trajektorií pole nebo linky bylo natavení naopak lokalizováno, což lze pozorovat na Obr. 30, kde je zachycen vzorek R1. Nejvýraznější natavení vykazoval vzorek R10 kalený trajektorií pole. Tento vzorek byl kalen s nejvyšším proudem svazku. Na Obr. 31 lze rozeznat rozdílnou morfologii makrostruktury nataveného a nenataveného materiálu. Natavená oblast je tvořena dendritickou strukturou, kdežto nenatavená oblast zachovává texturu výchozí struktury. Z mikrostrukturního hlediska jsou obě oblasti tvořeny laťkovým martenzitem. Přechod mezi těmito oblastmi je na Obr. 32. Fotografie na Obr. 33 nám poskytují detailnější pohled na morfologii struktury přetavené oblasti, která je řízena teplotním gradientem při tuhnutí a morfologii oblasti bez natavení.



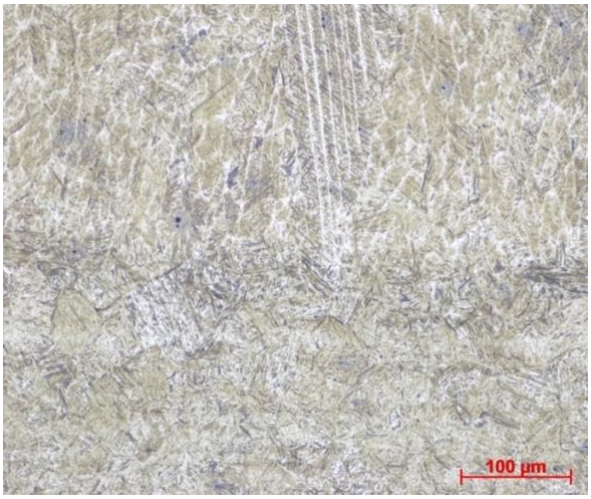
Obr. 29: *Makrostruktura vzorku R6 na SM*



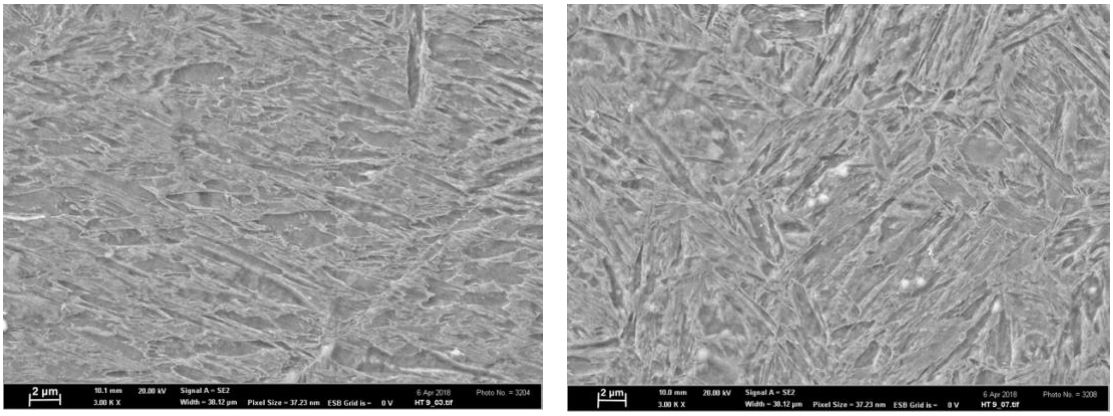
Obr. 30 : *Makrostruktura vzorku R1 na SM*



Obr. 31 : *Makrostruktura vzorku R10 na SM*



Obr. 32 : *Přechod mezi natavenou a nenatavenou oblastí, vzorek R10, SM*

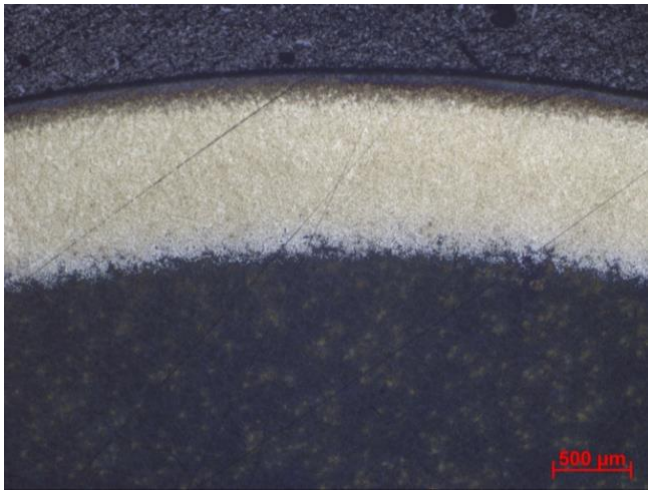


a) b)

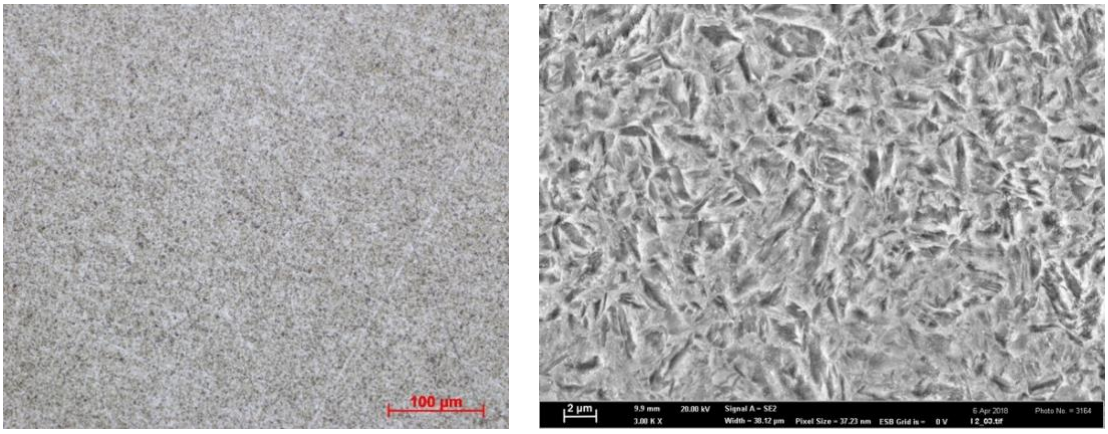
Obr. 33 : *Mikrostruktura vzorku R10, SEM, sekundární elektrony a) přetavená oblast b) zakalená oblast*

Indukční kalení

U všech tří indukčně kalených vzorků vznikla souvislá vrstva martenzitu. V těchto vrstvách nebyly pozorovány žádné kalící trhliny. Na Obr. 34 je makrostruktura a na Obr. 35 mikrostruktura vzorku I3. Pomocí rentgenové difrakce byla prokázána přítomnost martenzitu, 1,6 % cementitu a 3,3 % zbytkového austenitu (Obr. 36). Přítomnost cementitu dokládá, že ani pomocí elektromagnetické indukce nebylo při daných parametrech dosaženo dokonalé austenitizace.

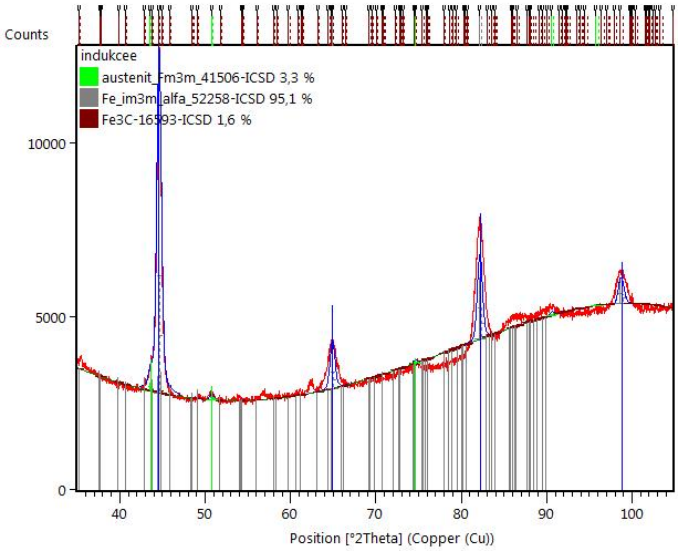


Obr. 34 : *Makrostruktura vzorku I3 na SM*



a) b)

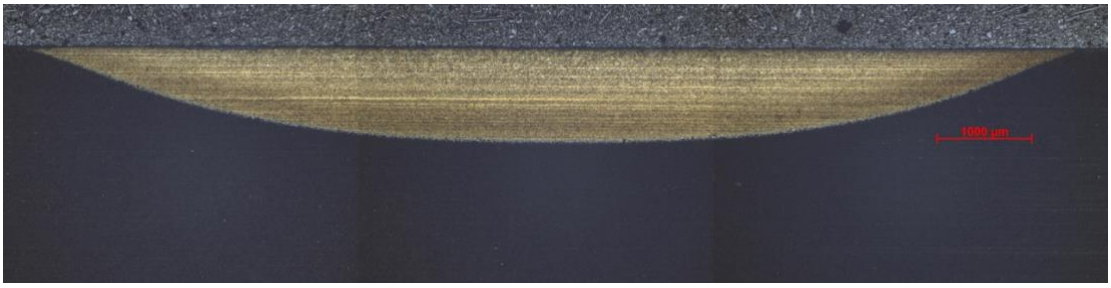
Obr. 35 : *Zakalená vrstva – vzorek I3, a) SM b) SEM sekundární elektrony*



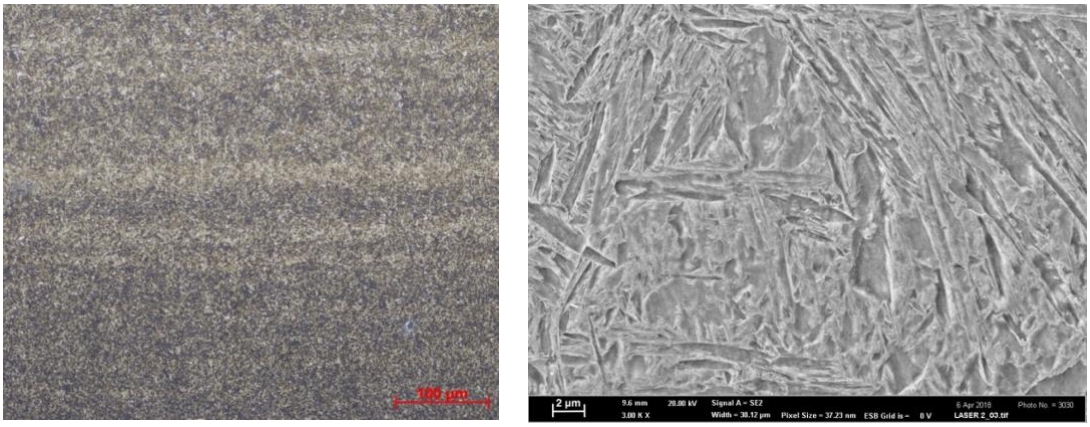
Obr. 36 : *Rentgenová difrakce – výsledné spektrum pro vzorek I3*

Kalení laserem

Všechny vzorky ze série kalené pomocí laseru mají při pohledu v příčném směru tvar kalené vrstvy shodný, jako tomu bylo u kalení elektronovým svazkem – tedy tvar „čočky“, viz makrostruktura Obr. 37. U všech vzorků je kalená vrstva tvořena martenzitem. Příkladem mikrostruktury po kalení laserem je vzorek S2 na Obr. 38. U vzorku S2 byla provedena také fázová analýza rentgenovou difrakcí. Na Obr. 39 můžeme vidět, že zbytkový austenit nebyl identifikován, jeho obsah je tedy pod detekčním limitem přístroje. Nicméně došlo k identifikaci 1,8 % cementitu a martenzitu. Vliv použitého módu laserového paprsku aplikovaného při kalení na výslednou strukturu nebyl pozorován.

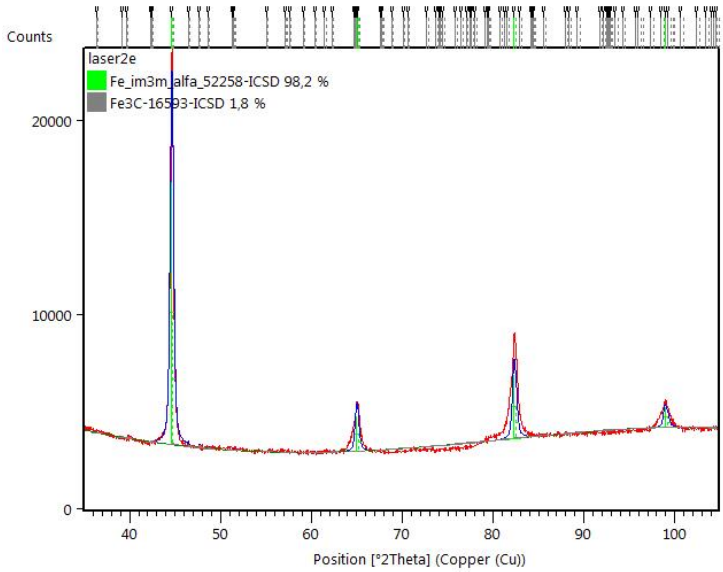


Obr. 37 : *Makrostruktura vzorku S2 na SM*



a) b)

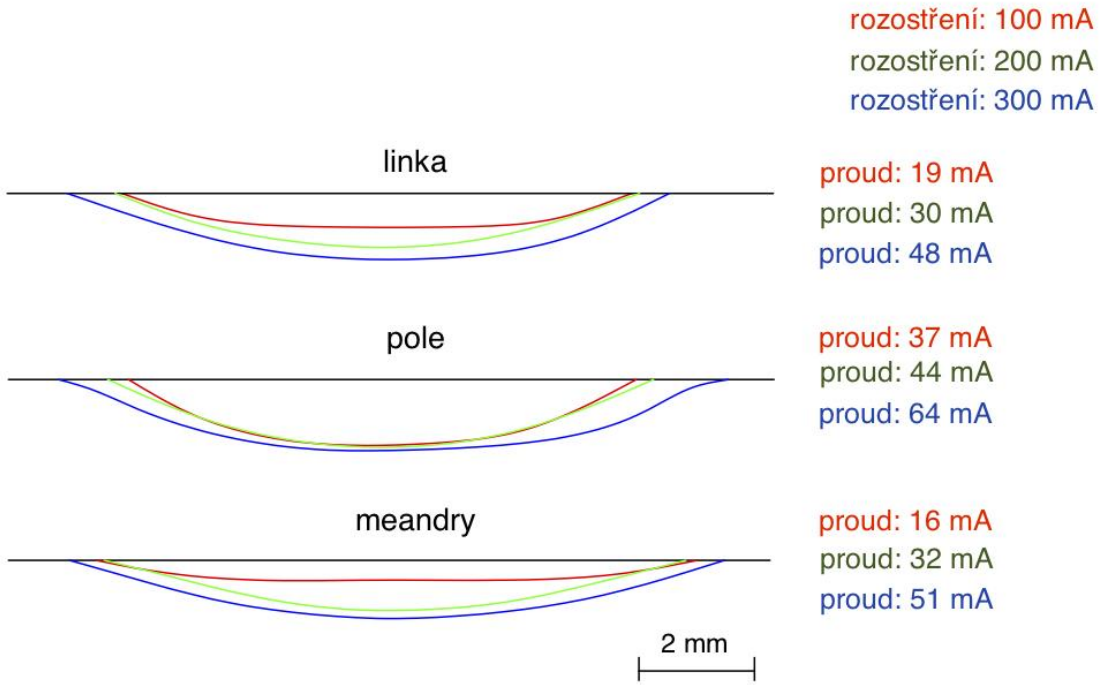
Obr. 38 : *Zakalená vrstva – vzorek S2 a) SM b) SEM sekundární elektrony*



Obr. 39 : *Rentgenová difrakce – výsledné spektrum pro vzorek S2*

4.2 Vliv trajektorie el. svazku a rozostření na profil zakalené vrstvy

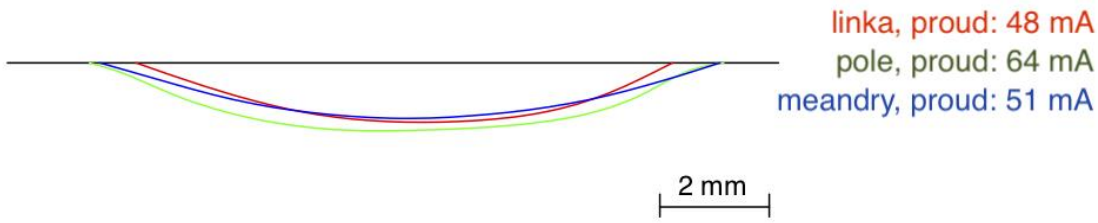
Pro posouzení vlivu trajektorie el. svazku a rozostření na příčný tvar (profil) kalené vrstvy byly vybrány vzorky, které byly kaleny s rychlostí posuvu 15 mm/s, rozostřeními 100, 200 a 300 mA a různými proudy elektronového svazku. Jednalo se o vzorky L6, L7 a L8 z trajektorie linky, P4, P5 a P6 z trajektorie pole a M3, M4, M5 z trajektorie meandry. Na Obr. 40 můžeme vidět, že s rostoucím rozostřením (a současně i proudem svazku) roste prokalená hloubka i šířka stopy, a to u všech použitých trajektorií. Profily vzniklých vrstev jsou pro všechny posuzované trajektorie podobné. Z výsledků lze také konstatovat, že trajektorie pole dosahuje vzhledem k ostatním trajektoriím poměrně vysokých hloubek prokalení při nízké úrovni rozostření. Při zvyšování rozostření se dále hloubka prokalení výrazně nemění. Můžeme tedy říci, že trajektorie pole je méně citlivá na zvolené rozostření než ostatní trajektorie.



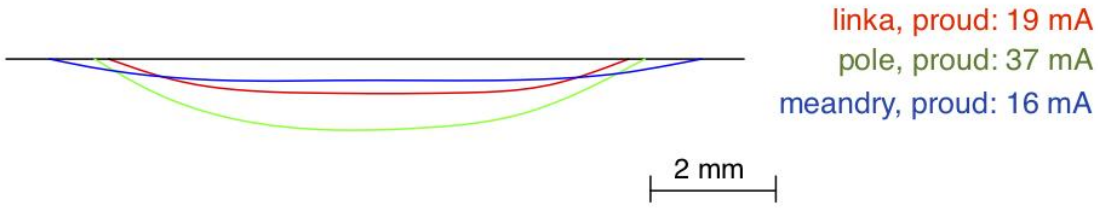
Obr. 40 : *Vliv technologických parametrů el. svazku na profily kalených vrstev*

Obr. 41 srovnává tvar profilů kalených stop při různých trajektoriích a proudech, ale při stejné úrovni rozostření. Z každé trajektorie byl k porovnání použit vzorek, který byl kalen s rychlostí posuvu 15 mm/s a rozostřením 300 mA. Z obrázku je patrné, že při použití rozostření 300 mA dosahují posuzované trajektorie velmi podobných výsledků, i přes to, že byly použity různé proudy svazku. Rozostření už je patrně dostatečné na to, aby byl potlačen geometrický vliv jednotlivých trajektorií. Nicméně trajektorie pole dosahuje nejvyšší hloubky. Při použití menších rozostření je tento efekt potlačen a výsledky se pro jednotlivé trajektorie s různými proudy různí. – viz Obr. 42. V tomto případě je šířka stopy pro trajektorii linky a pole stejná, ale pro trajektorii meandrů větší. To je patrně způsobeno nedostatečným ohřevem okrajů stopy u trajektorií pole a linky

z důvodu velkého množství rastrovaných bodů. Čas strávený ohříváním jednoho bodu je poté nedostatečný pro to, aby byly dostatečně ohřáty okraje stopy.



Obr. 41 : *Srovnání profilů stopy různých trajektorií při rozostření 300 mA*



Obr. 42 : *Srovnání profilů stopy různých trajektorií při rozostření 100 mA*

4.3 Měření mikrotvrdosti

Na Obr. 43 můžeme vidět průběhy tvrdosti naměřené na vzorcích kalených elektronovým svazkem s trajektorií linky. Pro měření prokalené hloubky byl okraj kalené vrstvy definován poklesem tvrdosti o 10 %. Největší tloušťky kalené vrstvy bylo dosaženo na vzorku L9 a to 1,25 mm. Naopak nejmenší tloušťka byla 0,34 mm na vzorku L5. Ostatní tloušťky vrstev se nacházely mezi těmito hodnotami. Tvrdosti všech vrstev se pohybovaly přibližně mezi 600 a 700 HV0,5. Nejvyšší tvrdost byla naměřena na vzorku L1, která dosahovala hodnoty 737 HV0,5.

Tloušťka kalených vrstev na vzorcích kalených s použitím trajektorie pole dosahovala hodnot 0,79 až 1,12 mm. Rozptyl tloušťky byl tedy výrazně nižší než u série s trajektorií linka. Nejvyšší tloušťka kalené vrstvy byla naměřena na vzorku P6. Nejnižších hodnot tvrdosti jednoznačně dosáhl vzorek P7, který měl na povrchu tvrdost 500 HV0,5. Důvodem je, že tento vzorek byl kalen s nejvyšší rychlostí posuvu v sérii. Naopak nejvyšší hodnota byla naměřena na vzorku P5, který dosahoval tvrdosti 723 HV0,5. Průběhy tvrdosti všech vzorků můžeme vidět na Obr. 44. Rozdíly mezi povrchovými tvrdostmi jednotlivých vzorků v této sérii byly až 200 HV0,5.

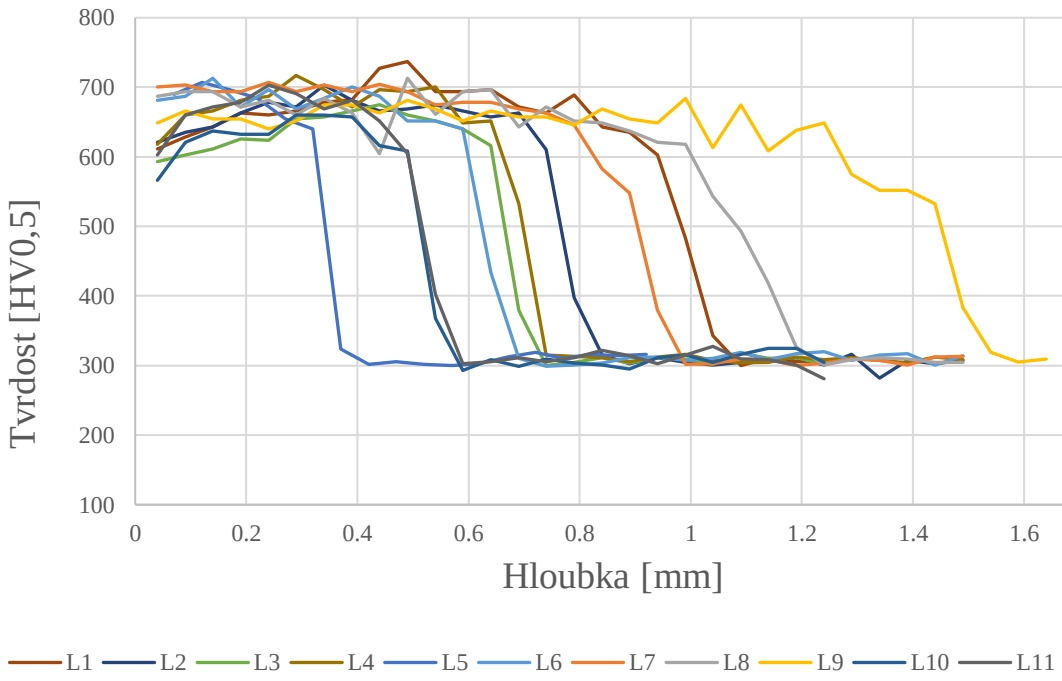
Na Obr. 45 lze vidět, že nejnižší tloušťka kalené vrstvy byla naměřena na vzorku M6, bylo to 0,18 mm. Nejvyšší tloušťky 0,89 mm dosahoval vzorek M5. Vzorek M4 dosahoval tloušťky podobné jako M5, ostatní vzorky dosahovaly tlouštěk výrazně nižších. Nejvyšší tvrdost vrstvy byla naměřena na vzorku M1 – 733 HV0,5.

Obr. 46 ukazuje dosažené hodnoty tvrdosti pro vzorky, u nichž došlo při kalení k částečnému natavení povrchu. Nejnižší tloušťka vzniklé vrstvy byla 0,6 mm na vzorku R7. Nejvyšší tloušťka, která byla naměřena na vzorku R10, byla 2,05 mm. Vzorek R9

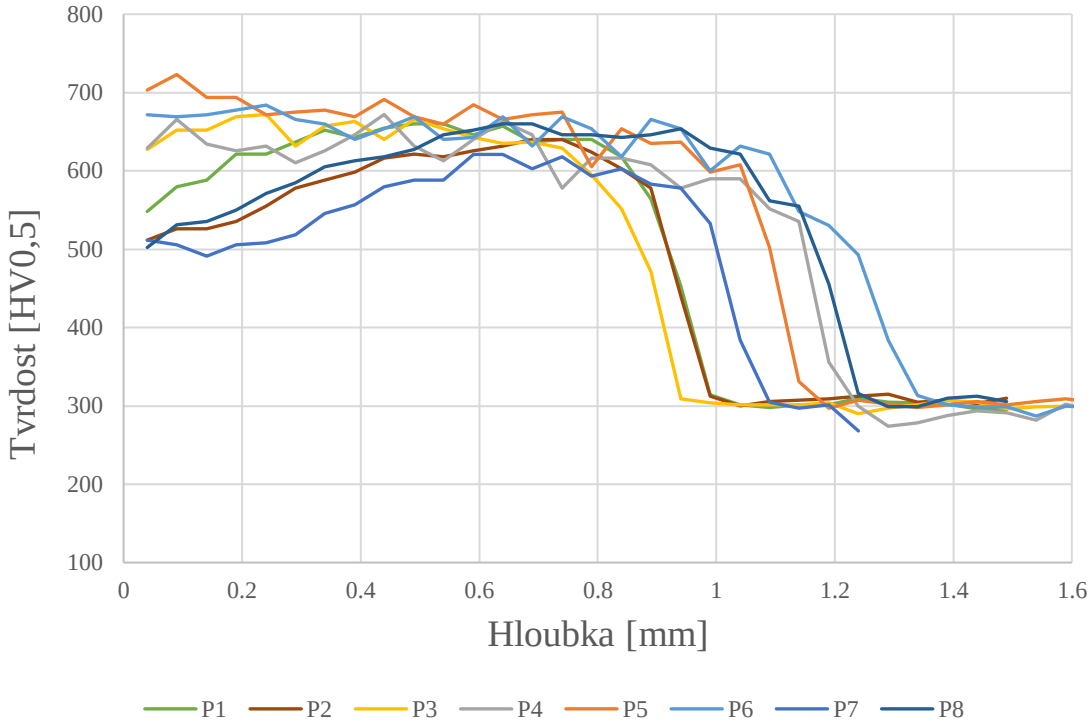
sice vykazoval druhou největší hloubku prokalení v sérii, ale dosáhl hodnoty tvrdosti 758 HV0,5, což je nejvíce ze všech vzorků kalených elektronovým paprskem. Všechny vzorky v sérii byly z hlediska tvrdosti relativně heterogenní.

U vzorků kalených pomocí laseru se pohybovala dosažená tloušťka kalené vrstvy mezi hodnotami 0,54 a 1,34 mm. Průběhy hodnot tvrdostí všech vzorků série jsou zobrazeny na Obr. 47. Hodnoty tvrdosti se u jednotlivých vzorků pohybovaly mezi 500 a 700 HV0,5. Výjimkou je vzorek S7, který sice dosáhl nejvyšší tloušťky vzniklé vrstvy v sérii, ale jeho povrchová tvrdost byla mírně pod 500 HV0,5. Nejvyšší naměřenou hodnotou tvrdosti bylo 687 HV0,5 na vzorku S1.

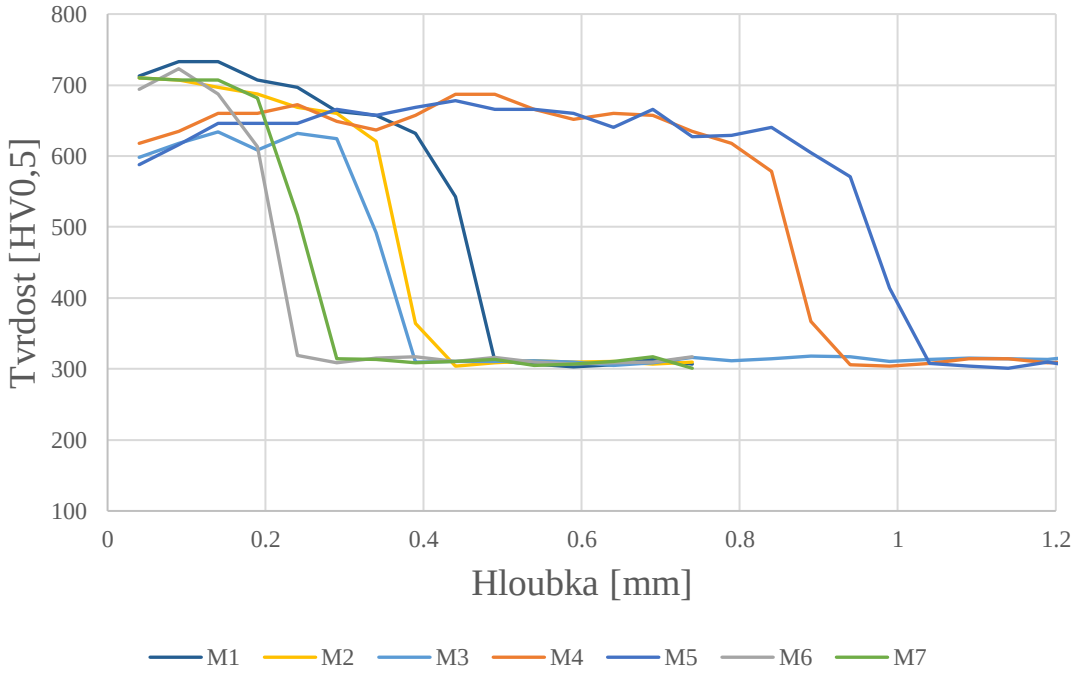
Na Obr. 48 můžeme vidět tvrdosti naměřené na vzorcích série kalené pomocí elektromagnetické indukce. Tloušťka kalené vrstvy převyšovala na všech vzorcích hodnotu 1,1 mm a u vzorku I3 dosahovala hodnoty 1,4 mm. Tvrdost vrstvy na vzorcích I2 a I3 se pohybovala kolem 700 HV0,5, přičemž nejvyšší hodnotou bylo 730 HV0,5 naměřených na vzorku I2. Průběh hodnot tvrdosti vzorku I3 se pohyboval o něco níže, než tomu bylo u ostatních vzorků v sérii.



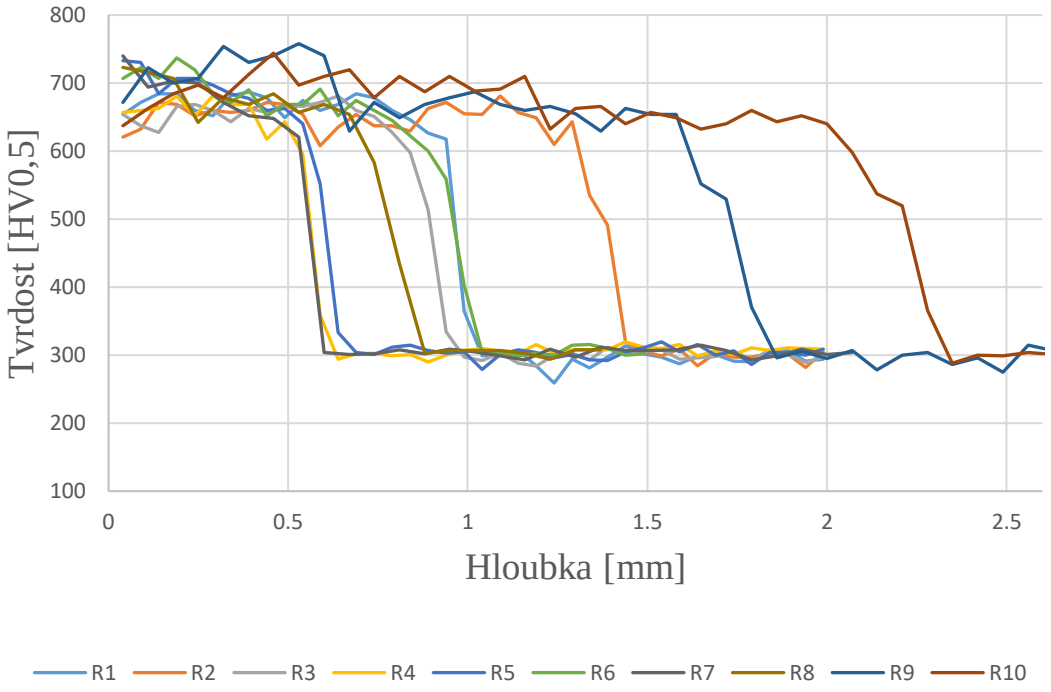
Obr. 43 : *Průběhy tvrdosti série el. svazek – linka*



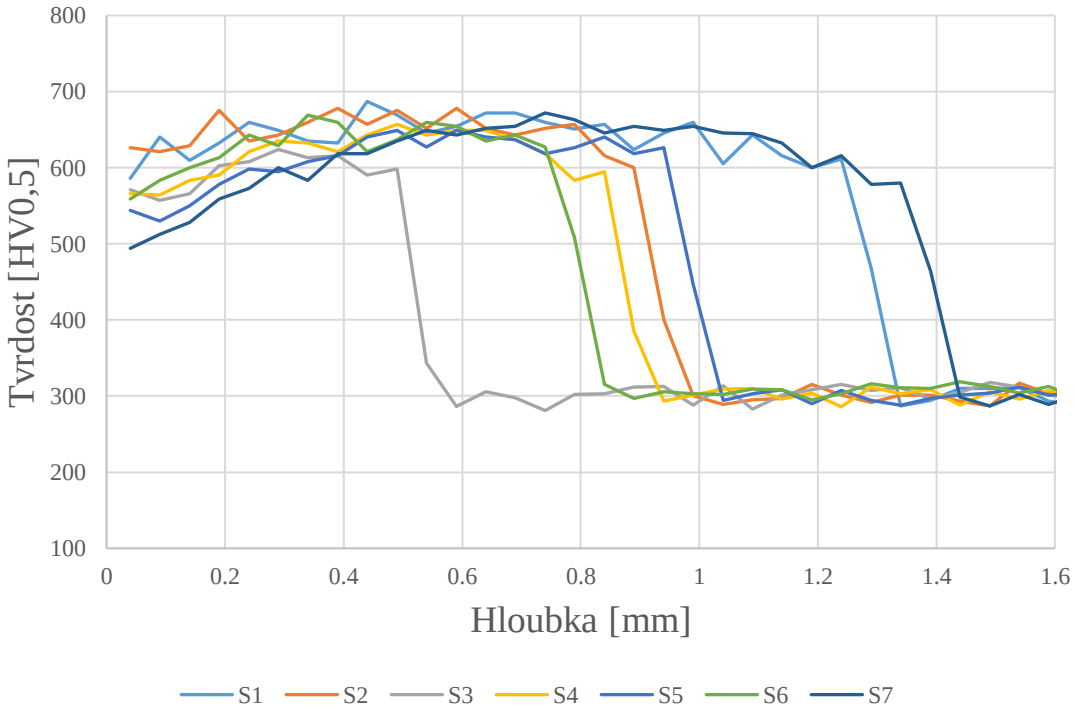
Obr. 44 : *Průběhy tvrdosti série el. svazek – pole*



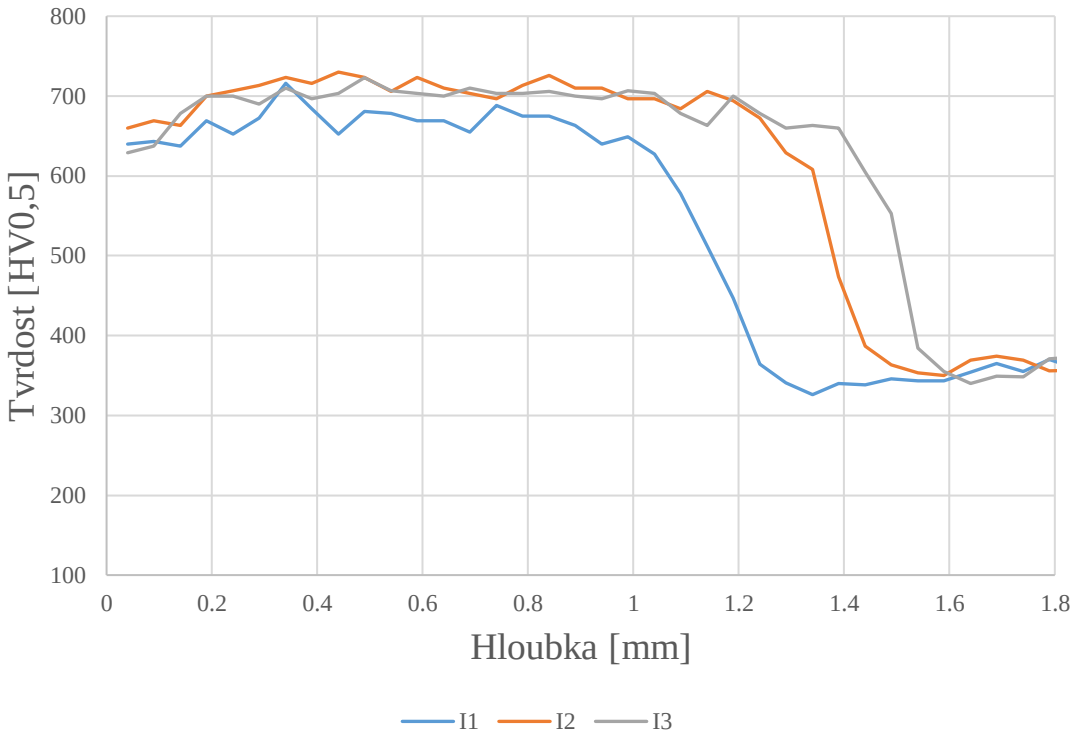
Obr. 45 : *Průběhy tvrdosti série el. svazek – meandry*



Obr. 46 : *Průběhy tvrdosti série el. svazek s částečným přetavením povrchu*



Obr. 47 : *Průběhy tvrdosti série kalené laserem*

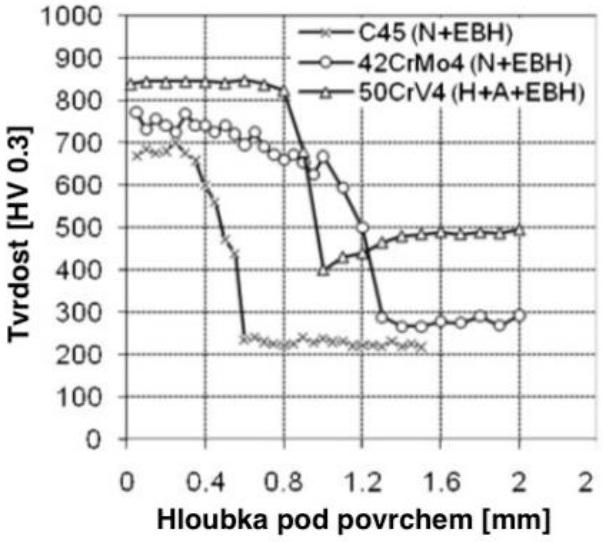


Obr. 48 : *Průběhy tvrdosti série kalené indukčně*

5 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Zenker [24] uvádí, že při povrchovém kalení slitin železa elektronovým svazkem obvykle není hloubka prokalení větší než 1,5 až 2 mm. Experimenty provedené v rámci této práce jsou v souladu s výsledky v literatuře, protože těchto hodnot nebylo při kalení bez natavení povrchu dosaženo žádnou s použitých trajektorií při daných parametrech. Při použití vyšších výkonů elektronového svazku s částečným natavením povrchu již došlo k překročení této hodnoty. Hodnoty tvrdosti byly zvýšeny zejména v oblastech, kde došlo ke vzniku taveniny. V těchto oblastech byl rozpuštěn cementit a výchozí strukturou pro kalení byl homogenní austenit. Kalením pomocí elektromagnetické indukce ani pomocí laseru nebylo dosaženo prokalené hloubky 1,5 mm. Dále Zenker [24] uvádí, že nárůst tvrdosti ve vzniklých vrstvách je mimo jiné důsledkem vzniku velmi jemné mikrostruktury, která je podle něj srovnatelná, nebo jemnější než mikrostruktura vzniklá po kalení elektromagnetickou indukcí, ale také konstatuje, že tvrdosti dosažené kalením elektronovým svazkem bývají zřídkakdy vyšší než po konvenčním indukčním kalení. Strukturní analýza kalených povrchů v této práci potvrdila vznik velmi jemné mikrostruktury. Jemná mikrostruktura vznikala v důsledku vysoké rychlosti ohřevu a ochlazení a také díky nedostatečnému rozpuštění cementitu při austenitizaci. Tyto zbytky cementitu zabránily zhrubnutí zrna. Jak bylo ukázáno na Obr. 21, Obr. 25 a Obr. 27, tak ke srovnatelné mikrostruktuře vedly všechny použité trajektorie elektronového svazku. Z námi naměřených výsledků tvrdosti lze rovněž konstatovat, že tvrdosti dosažené elektronovým svazkem byly jen výjimečně vyšší než u laseru nebo elektromagnetické indukce. Fakt, že rozpuštění cementitu při austenitizaci bylo nedostatečné k tomuto stavu také přispěl.

Zenker [25] publikoval, že při kalení oceli 42CrMo4 elektronovým svazkem s následnou nitridací dosáhl tvrdosti přibližně 750 HV0,3 – viz Obr. 49. Tato hodnota je přibližně o 50 až 100 HV vyšší než u námi prováděných experimentů, ale nelze přesně říci o kolik zvýšila tvrdost povrchu provedená nitridace.



Obr. 49 : *Výsledky kalení elektronovým svazkem publikované Zenkerem* [25]

Na Obr. 43 - Obr. 45 je patrné, že na povrchu vzniklých kalených vrstev došlo k poklesu tvrdosti. Tento jev se týká všech použitých trajektorií. Důvodem je rozdílná absorpce energie elektronového svazku v závislosti na hloubce penetrace publikovaná Kraussem [21] – viz Obr. 11. K největšímu předání kinetické energie elektronu dochází v určité hloubce pod povrchem, proto je tam zahřívání materiálu intenzivnější. Dojde tedy k většímu rozpuštění cementitu a výsledná tvrdost po kalení je vyšší než na povrchu.

Pro jednoznačnou interpretaci hodnot tvrdosti vzhledem k použitým technologickým parametrům – tedy proudu, urychlovacímu napětí el. svazku a rychlosti posuvu byla pro všechny vzorky vypočtena tzv. „měrná“ energie. Energie byla vypočtena podle následujícího vztahu a výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 8.

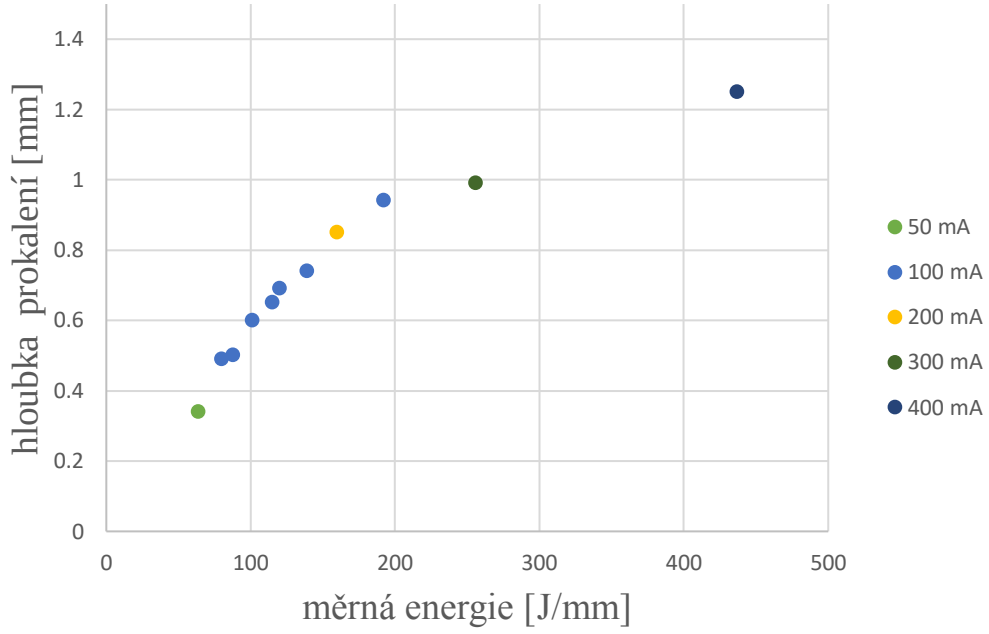
$$E = \frac{I \cdot U}{v} \tag{5.1}$$

Měrná energie E [J/mm] je přímo úměrná elektrickému proudu I [A], urychlovacímu napětí U [V] a nepřímo úměrná rychlosti posuvu v [mm/s].

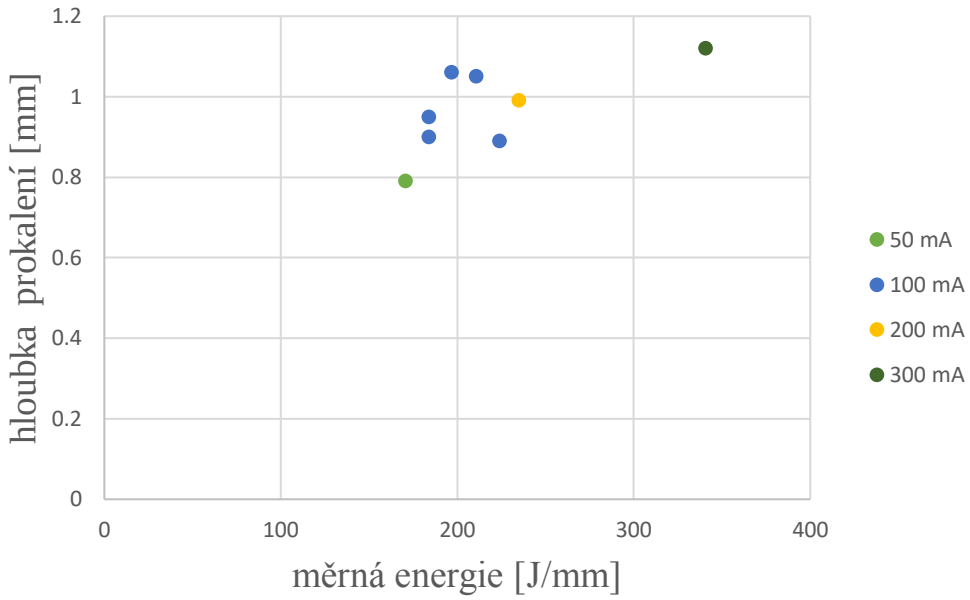
Tab. 8 : *Hodnoty „měrné“ energie a rozostření při kalení el. svazkem bez natavení*

označení vzorku	„měrná“ energie [J/mm]	rozostření [mA]
trajektorie linka		
L1	192	100
L2	139	100
L3	120	100
L4	115	100
L5	64	50
L6	101	100
L7	160	200
L8	256	300
L9	437	400
L10	88	100
L11	80	100
trajektorie pole		
P1	224	100
P2	184	100
P3	171	50
P4	197	100
P5	235	200
P6	341	300
P7	184	100
P8	211	100
trajektorie meandry		
M1	144	100
M2	104	100
M3	85	100
M4	171	200
M5	272	300
M6	76	100
M7	67	100

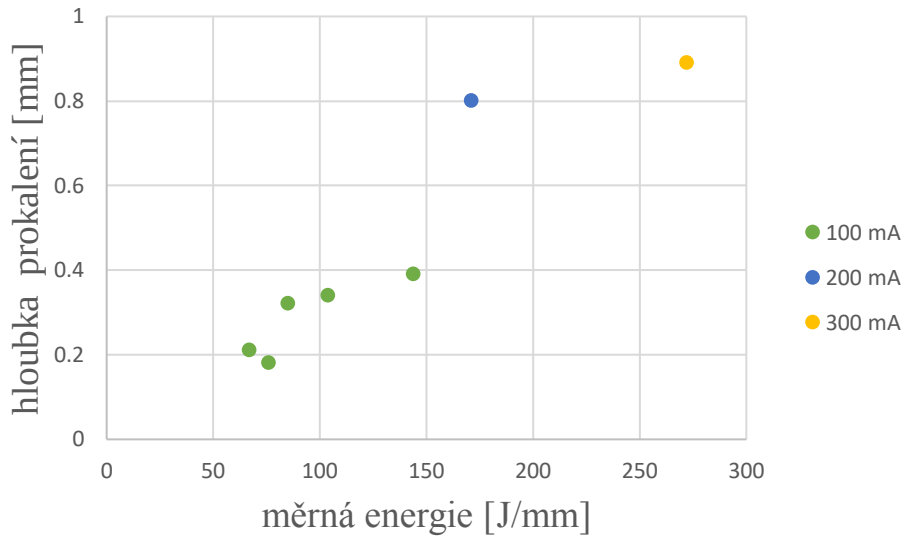
Na Obr. 50 byla zkonstruována závislost prokalené hloubky na „měrné“ energii při kalení el. svazkem a použité trajektorii linka. Je zde jasný trend, že s rostoucí energií roste i prokalená hloubka. Při použití většího rozostření (větší budící proud do fokusační cívky) bylo využito vyššího výkonu, protože svazek po povrchu vzorku rastruje větší plochu. Proto prokalená hloubka i „měrná“ energie s vyšším rozostřením rostou. Na Obr. 51 je vynesen tentýž graf pro trajektorii pole. Zde je tentýž trend, ale je méně patrný, protože mezi hodnotami „měrné“ energie v sérii kalené pomocí pole nejsou tak velké rozdíly jako v případě linky. Stejná závislost platí i pro trajektorii meandrů – viz Obr. 52. Jednotlivé hodnoty rozostření jsou barevně odlišeny. Dále byly výše uvedené grafy porovnány. Na Obr. 53 je vidět, že při nízkých hodnotách „měrné“ energie dosahuje trajektorie linka vyšších hloubek prokalení než trajektorie meandrů. Trajektorie pole při nízkých energiích nebyla aplikována, ale podle směrnice přímky z lineární regresní analýzy lze předpokládat, že by dosahovala nejvyšších hloubek prokalení. Při použití vyšších „měrných“ energií se rozdíly v prokalených hloubkách snižují a od hodnot přibližně 250 J/mm jsou minimální. Tento jev je důsledkem růstu nejen „měrné“ energie ale i rozostření, čímž dojde k potlačení geometrických rozdílů mezi trajektoriemi.



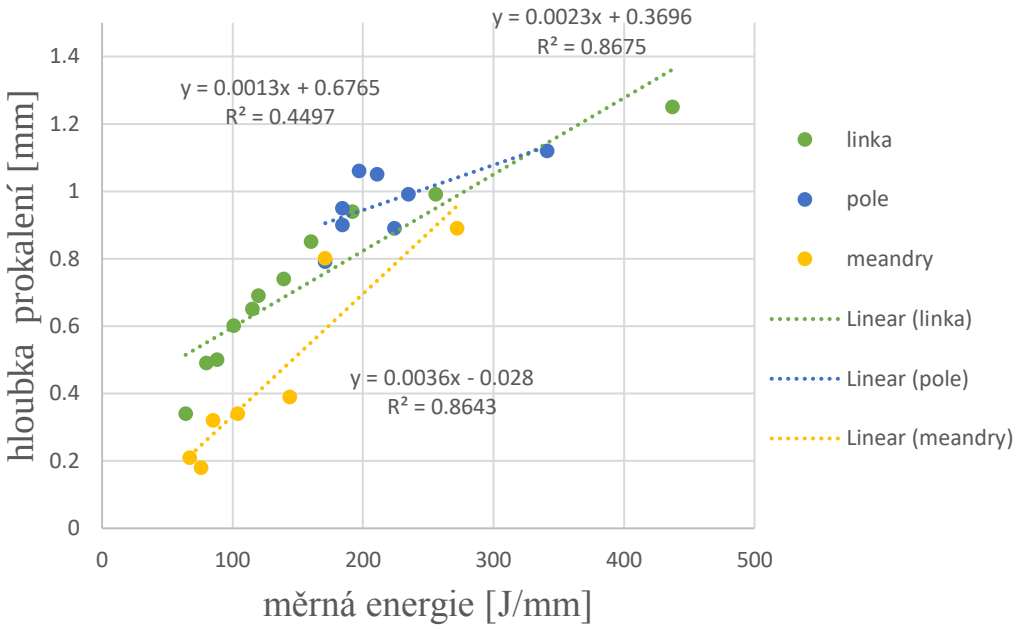
Obr. 50 : *Závislost prokalené hloubky na „měrné“ energii pro trajektorii linka*



Obr. 51 : *Závislost prokalené hloubky na „měrné“ energii pro trajektorii pole*



Obr. 52 : *Závislost prokalené hloubky na „měrné“ energii pro trajektorii meandry*



Obr. 53 : *Závislost prokalené hloubky na „měrné“ energii všech trajektorií*

6 ZÁVĚR

Vzorky z oceli 42CrMo4 byly povrchově kaleny pomocí elektronového svazku s trajektoriemi linka, pole a meandry. Takto byly kaleny také s částečným natavením povrchu. Tatáž ocel byla pro srovnání kalena také laserem a elektromagnetickou indukcí. Na výsledných vzorcích byla hodnocena mikrostruktura, makrostruktura a tvrdost. Z hodnocení výsledků lze vyvodit závěry:

- Srovnatelných hloubek prokalení lze dosáhnout všemi studovanými trajektoriemi za předpokladu nalezení vhodných technologických parametrů. Pokud je to možné, je vhodné zvolit vyšší hodnotu rozostření, aby bylo možné aplikovat vyšší výkon.

- Při nízkých hodnotách „měrné“ energie dosahuje trajektorie linka vyšších hloubek prokalení než trajektorie meandrů. Od hodnoty přibližně 250 J/mm jsou mezi všemi posuzovanými trajektoriemi z hlediska hloubky prokalení minimální rozdíly.

- Při dostatečné „měrné“ energii (při vhodném poměr proudu el. svazku a rychlosti posuvu) bylo všemi studovanými trajektoriemi dosaženo srovnatelných hodnot tvrdosti – přibližně 680 HV0,5.

- Povrchy kalené elektronovým svazkem dosahovaly mírně nižších až srovnatelných tvrdostí a hloubek než povrchy kalené elektromagnetickou indukcí a laserem.

- U žádné z použitých kalících metod nedošlo k dokonalé austenitizaci materiálu. Ve výsledné struktuře se vždy nacházel nerozpuštěný cementit. Nejmenší množství nerozpuštěného cementitu se nacházelo ve struktuře kalené elektronovým svazkem s trajektorií pole.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] PTÁČEK, Luděk a kol. Nauka o materiálu II. Brno: CERN, s.r.o., 2002. 395 s. ISBN 80-7204-248-3.

[2] JECH, Jaroslav. Tepelné zpracování ocelí: Metalografická příručka. 4. dopl. vyd. Praha: SNTL, 1983. 392 s.

[3] STRACHOTA, A., M. HAVLÍČEK a V. TYKAL. Povrchové kalení plamenem v praxi. Praha: SNTL, 1960. 172 s.

[4] Indukční kalení. Rajmont [online]. © 2005-2015 [cit. 2017-10-07]. Dostupné z: http://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-kaleni/

[5] Introductoheat Europe: Induktionshärten. [online]. [cit. 2017-10-07]. Dostupné z: http://www.hwg-inductoheat.de/

[6] DAĎOUREK, Karel. Povrchové kalení: Teorie tepelného zpracování. Technická univerzita v Liberci: Katedra materiálů [online]. 2007 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/02povrkal.pdf

[7] Flame Treating Systems. Flame hardening [online]. [cit. 2017-10-07]. Dostupné z: http://www.flametreatingsystems.com

[8] DAĎOUREK, Karel. Povrchové kalení [online]. [cit. 2017-10-07]. Dostupné z: http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf

[9] Laserové kalení. KSK: Precise motion [online]. © 1996–2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: http://www.ks-kurim.cz/laserove-kaleni/

[10] BULLING, Dieter. Tribotechnika: Laserové kalení proces s velkým potenciálem [online]. 2012. [cit. 2017-10-07]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22012/laserove-kaleni-proces-s-velkym-potencialem.html

[11] ZENKER, R., A. BUCHWALDER a H.J. SPIES. New electron beam technologies for surface treatment. s. 202–209.

[12] ZENKER, Rolf a Anja BUCHWALDER. Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung: Inovative Technologienfür höchste industrielle Ansprüche. 2. vyd. Germany: pro-beam AG&Co. KGaA, 2010.

[13] Electron beam machining (EBM) principles. Basicmechanicalengineering.com [online]. © 2018 [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: https://basicmechanicalengineering.com/electron-beam-machining-ebm-principles/

[14] MELEKA, A. H. Electron-beam welding: Principles and Practice. Berkshire: McGRAW-HILL, 1971. ISBN 07-094218-8.

[15] ZOBAČ, M. Řízení a diagnostika elektronového svazku pro pokročilé technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 158 s. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.

[16] LENC Michal a Bohumila LENCOVÁ. Optické prvky elektronových mikroskopů. ISBN 80-200-0329-0.

[17] MATLÁK, J. Povrchové zpracování vybraných ocelí pomocí elektronového svazku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miloslav Kouřil, CSc.

[18] LIGAS, A. Studium beta fáze v Al-Mg-Si slitinách pomocí nekonvenčních metod elektronové mikroskopie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Mgr. Šarka Mikmeková, Ph.D..

[19] DUPÁK, L. Mikroobrábění nekovových materiálů elektronovým svazkem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. s. 101. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.

[20] FRANKE, R., I. HAASE, M. KLEMM a R. ZENKER. Friction and wear behaviour of electron beam surface treated aluminium alloys AlSi10Mg(Cu) and AlSi35. Wear [online]. 2010, 269(11-12), 921-929 [cit. 2018-01-18]. DOI: 10.1016/j.wear.2010.08.002. ISSN 00431648. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164810002711

[21] KRAUSS, George. Steels: processing, structure, and performance. Second edition. Materials Park, Ohio: ASM International, 2015. ISBN 1-62708-083-x.

[22] VÁLKA, L. FSI, VUT Brno. Stroj pro svařování a povrchové tepelné zpracování s pomocí elektronového svazku PROBEAM K26. Brno, 2013.

[23] ADAM, O. Charakterizace a optimalizace přípravy tvrdé vrstvy na grafitické litině pomocí přetavení povrchu elektronovým paprskem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 47 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vít Jan, Ph.D..

[24] ZENKER, R. Structure and Properties as a Result of Electron Beam Surface Treatment. Advanced Engineering Materials [online]. 2004, 6(7), 581-588 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1002/adem.200400416. ISSN 1438-1656. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/adem.200400416

[25] ZENKER, R. IFHTSE Global 21: heat treatment and surface engineering in the twenty-first century Part 15 – Progress in surface heat treatment using electron beam surface hardening. International Heat Treatment and Surface Engineering [online]. 2013, 5(2), 50-56 [cit. 2018-05-10]. DOI: 10.1179/174951411X12956207253465.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

hm. %	hmotnostní procenta
SM	světelný mikroskop
SEM	skenovací elektronový mikroskop