



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

**POVRCHOVÉ ZPRACOVÁNÍ VYBRANÝCH
OCELÍ POMOCÍ ELEKTRONOVÉHO SVAZKU**

SURFACE TREATMENT OF SELECTED STEELS USING ELECTRON BEAM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Oríšek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miloslav Kouřil, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	Bc. Petr Oríšek
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Veřejná práce:	Ing. Miloslav Kouřil, CSc.
Akademický rok:	2015/16

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

Povrchové zpracování vybraných ocelí pomocí elektronového svazku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Elektronový paprsek představuje perspektivní technologii zpracování materiálů, ať již v poloze spojování obtížně svařitelných materiálů nebo v podobě povrchového zpracování. Technologii elektronového paprsku umožňující svařování různorodých materiálů, řízenou modifikaci jejich povrchu, speciální přesné obrábění, lze v současnosti nalézt zejména u vybraných aplikací v zahraničním kosmickém, leteckém, automobilovém a kolejovém průmyslu. Podrobnější popis současného a budoucího aplikačního potenciálu a technologických možností této metody v souvislostech k využívaným materiálům bude úkolem pro vypracování literární rešerše na dané téma. V rámci experimentální části bude provedeno povrchové zpracování uhlíkové, konstrukční nízkolegované a nástrojové oceli s cílem vytvořit co nejhlubší vrstvu bez natavení povrchu.

Cíle diplomové práce:

1. Literární rešerše v oblasti použití elektronového svazku pro povrchové zpracování
2. Rozbor vybraných aplikací elektronového svazku při zpracování materiálů
3. Návrh a realizace povrchového zpracování u vybraných ocelí
4. Vyhodnocení mikrostruktur získaných vrstev

Seznam literatury:

- Zenker, R., Buchwalder, A.: Elektronenstrahl - Randschichtbehandlung, 2nd. ed., Germany 2010.
- Dobeneck, D.: Electronbeamwelding A Key Technology to Construct Vehicles for Road, Rail, Sea, Air and Space, 1st ed.; Germany, 2007.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 2. 12. 2015



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katoický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na povrchové zpracování materiálů elektronovým svazkem. V práci je zahrnuta literární rešerše popisující fyzikální princip a vlastnosti elektronového paprsku. Tato rešerše dále uvádí možná ovlivňování paprsku a popisuje konstrukci zařízení pro jeho generování. Ve druhé části teoretického pojednání jsou pak uvedeny různé aplikace elektronového svazku při zpracování materiálů. V rámci této práce byl proveden experiment s tepelným zpracováním povrchu oceli elektronovým paprskem. Jeho cílem bylo vytvořit co nejhlubší vrstvu bez natavení povrchu. Výsledkům experimentu a jejich hodnocení je věnována experimentální část práce. V experimentální části je rovněž věnována pozornost vybraným procesním parametrům.

ABSTRACT

The thesis aims for the surface treatment of materials using electron beam. It includes a literary research describing physical principle and properties of the electron beam. This research also presents possible influencing of the beam and describes the construction of the device that generates the beam. Various applications of the electron beam for the material treatment are presented in the second part of the paper. Within this thesis an experiment with the heat treatment of the steel surface by the electron beam has been realized. The experiment was aimed at creating a layer as deep as possible without melting the surface. The results and their evaluation are presented in the experimental part of the thesis. The attention is also paid to selected process parameters.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektronový svazek, povrchové zpracování, tepelné zpracování, povrchové kalení, nástrojová ocel, ocel 19 552

KEYWORDS

electron beam, surface treatment, heat treatment, surface hardening, tool steel, steel 19 552

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ORÍŠEK, P. *Povrchové zpracování vybraných ocelí pomocí elektronového svazku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miloslav Kouřil, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího práce a s použitím literárních zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne 22. 5. 2016



.....
Bc. Petr Oríšek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Miloslavu Kouřilovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. et Ing. Jiřímu Matlákovi a dalším zaměstnancům FSI, kteří mi pomohli svými odbornými radami a cennými připomínkami.

Obsah:

1 Úvod	2
2 Problematika elektronového svazku	2
2.1 Historie	3
2.2 Fyzikální princip	5
2.3 Generátor elektronového svazku	7
2.4 Zdroj elektronů	7
2.5 Hlavní prvky elektronové optiky	9
2.6 Pracovní komora	10
2.7 Interakce elektronů s materiálem	11
2.8 Tepelný účinek svazku	13
3 Aplikace elektronového svazku	16
3.1 Základní rozdělení	16
3.2 Srovnání elektronového svazku a laseru	17
3.3 Svařování	18
3.4 Žihání	20
3.5 Kalení	20
3.6 Přetavování	21
3.7 Legování	22
3.8 Vrtání	23
3.9 Gravírování	24
3.10 Další aplikace	24
4 Experimentální část	25
4.1 Experimentální materiály	25
4.2 Zařízení použité pro experimenty	26
4.3 Předchozí experimenty s rozdílnými oceli	28
4.3.1 Uhlíková ocel	28
4.3.2 Konstrukční nízkolegovaná ocel	31
4.3.3 Nástrojová ocel	33
4.3.4 Nastavené parametry	35
4.3.5 Průběh experimentu	36
4.3.6 Zhodnocení výsledků	37
4.4 Předchozí experiment s nástrojovou ocelí 19 552	43
4.4.1 Nástrojová ocel 19 552	43
4.4.2 Průběh experimentu a zhodnocení výsledků	44
4.5 Aktuální experiment s nástrojovou ocelí 19 552	59
4.5.1 Průběh experimentu a nastavené parametry	59
5 Výsledky experimentů a diskuse	62
5.1 Rozbor výsledků	62
5.2 Rozbor míry zakalení vzorků	71
5.3 Rozbor vlivu parametrů	71
6 Závěr	72
7 Seznam použité literatury	73
8 Seznam použitých symbolů a zkratk	75

1 Úvod

Nositelem energie při elektronovém ohřevu je svazek elektronů o vysoké rychlosti dopadající na povrch zpracovávaného materiálu. Zde se kinetická energie elektronů přemění v teplo a v místě dopadu dochází k velmi rychlému ohřevu povrchu. Rychlost elektronů může být v závislosti na urychlovacím napětí vyšší než 1/2 rychlosti světla. Technologie elektronového svazku předpokládá práci ve vakuu. Potřeba vakua je dána především snahou zamezit srážkám elektronů s molekulami vzduchu a oslabení či pohlcení paprsku. Práce ve vakuu je však zároveň i výhodou, protože díky němu zcela odpadají problémy s oxidací, vodíkovým zkřehnutím, vnášením nečistot a vznikem trhlin. Nejběžnější technologií s využitím elektronového svazku je v současné době svařování, které se provádí již po řadu desetiletí v kosmickém, leteckém, automobilovém ale i spotřebním průmyslu. Povrchové tepelné zpracování, popřípadě postupy spojené s přetavením povrchu se rozvíjejí až v poslední době, tak jak se zdokonalují metody řízení pohybu a energie svazku s ohledem na reliéf zpracovávaného povrchu.

Výhodou elektronového svazku je možnost jeho zpracování elektromagnetickým polem, neboli jeho fokusace do malého bodu nebo naopak rozostření do určité plochy, ale též jeho vychylování a skenování plochy s vysokou frekvencí; Skenování je zpravidla spojeno s řízenou změnou proudu svazku, neboli s řízením dodávky energie v závislosti na konkrétním místě povrchu. Názorně lze pokrytí určité plochy energií svazku demonstrovat na vakuové televizní obrazovce, kde energie svazku je funkcí plošných souřadnic a času s danou frekvencí skenování. Díky efektivnímu řízení tak můžeme získat přesně definované kalené plochy a detaily i s proměnnými parametry kalené vrstvy. Proces je velmi rychlý, takže tepelné ovlivnění okolí je minimální. Přesné a velmi rychlé soustředění energie vede mj. k tomu, že při svařování touto technologií lze dosáhnout velmi velké hloubky průvaru vzhledem k šířce svaru. Hraniční schopností elektronového svazku je protavit se velmi rychle jakýmkoliv elektricky vodivým materiálem, včetně kovů o vysokém bodu tavení.

Z výše uvedeného plyne výčet technologií, které lze s pomocí elektronového svazku realizovat: Jedná se zejména o svařování a přetavování těžko tavitelných kovů, vrtání děr, gravírování a celou řadu povrchových metod, z nichž jednou je i povrchové kalení, na které se zaměřuje tato práce. Technologické aplikace elektronového svazku využívají velké výkony v rozmezí od stovek W až po jednotky MW.

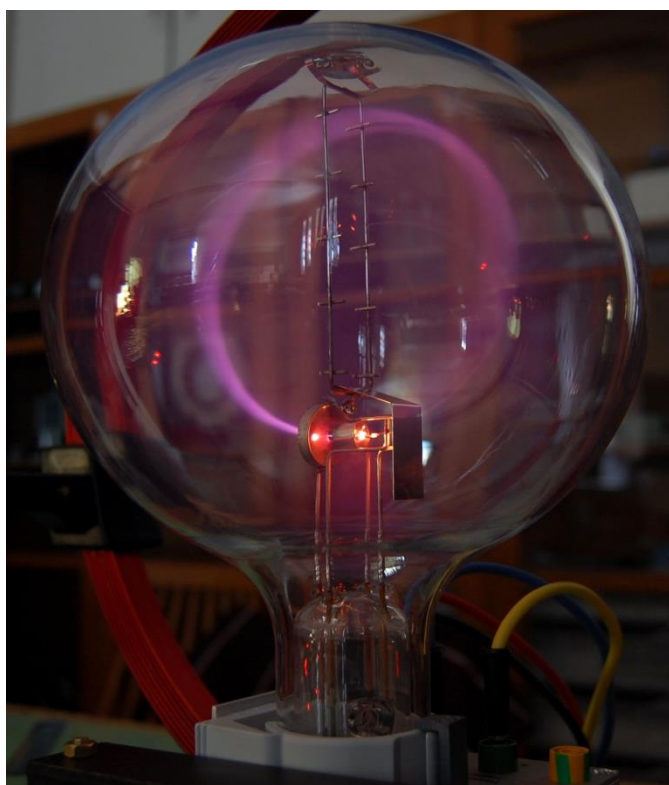
Úkolem této práce je aplikace technologie elektronového svazku při renovaci kovacích zápustek z nástrojové oceli 19 552, v podobě povrchového kalení exponovaných ploch v zakaleném stavu po třískovém obrábění. Experiment se zaměřuje na získání vhodných parametrů elektronového ohřevu pro vytvoření povrchových vrstev s určitou strukturou, tloušťkou a tvrdostí, včetně případu tvarových detailů zápustky.

2 Problematika elektronového svazku

Tepelné zpracování technologií elektronového paprsku (EB - Electron Beam) patří mezi progresivní metody ve strojírenství. Hlavním principem je využití kinetické energie urychlených elektronů, která se při srážce se zpracovávaným materiálem přemění v tepelnou energii. Intenzita přenosu tepla je velmi vysoká, rychlost ohřevu v tenké vrstvě na teplotu taveniny může být v řádu desítek tisíc K/s. Rozdělení výkonu může být efektivně řízeno, čímž lze dosáhnout optimálního přizpůsobení parametrů ohřevu druhu materiálu a geometrii zpracovávaného dílu.

2.1 Historie

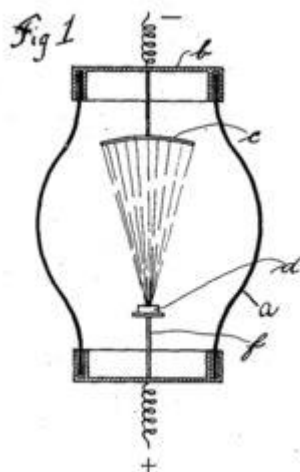
Počátky technologie elektronové svazku sahají až do druhé poloviny 19. Století, kdy byly zformulovány základní myšlenky, ze kterých tato technologie vychází. Na počátku stál německý fyzik Johann Wilhelm Hittorf, který roku 1869 zkoumal emisi elektronů z katody. Proud rychle se pohybujících elektronů, které v té době ještě nebyly objeveny, vnímal Hittorf jako souvislý paprsek. Roku 1876 Eugen Goldstein poprvé použil pojmenování katodové paprsky. Experimenty s těmito paprsky v prostředí zředěných plynů prováděl rovněž William Crookes. Velmi brzy bylo vědci zpozorováno, že paprsek při dopadu na povrch pevné hmoty předává materiálu při interakci většinu své kinetické energie ve formě tepla. Roku 1879 byl proveden experiment s využitím katodového paprsku pro tavení kovu. K zásadnímu objevu došlo v roce 1897, kdy britský fyzik Joseph John Thomson objevil novou částici. Při Thomsonově experimentu byly částice emitovány z rozžhavené katody a poté procházely elektrickým a magnetickým polem, ve kterých byly vychylovány. Ukázka je na obr. 1 [3]. Bylo zjištěno, že katodové paprsky jsou ve skutečnosti tvořeny těmito částicemi, jejichž hmotnost je oproti hmotnosti atomu vodíku více než tisíckrát menší. Jednalo se o objev první subatomární částice, která byla později pojmenována elektron. Na základě těchto poznatků vznikl název elektronový paprsek. Touto problematikou se zabývali také Wilhelm Conrad Röntgen a Robert Andrews Millikan, kteří rovněž dospěli k závěru, paprsek je tvořen proudem částic, velmi rychle se pohybujících elektronů. [1] [2]



Obr. 1 Katodový paprsek ohnutý do kruhu magnetickým polem, plyn v trubici umožňuje viditelnost paprsku [3]

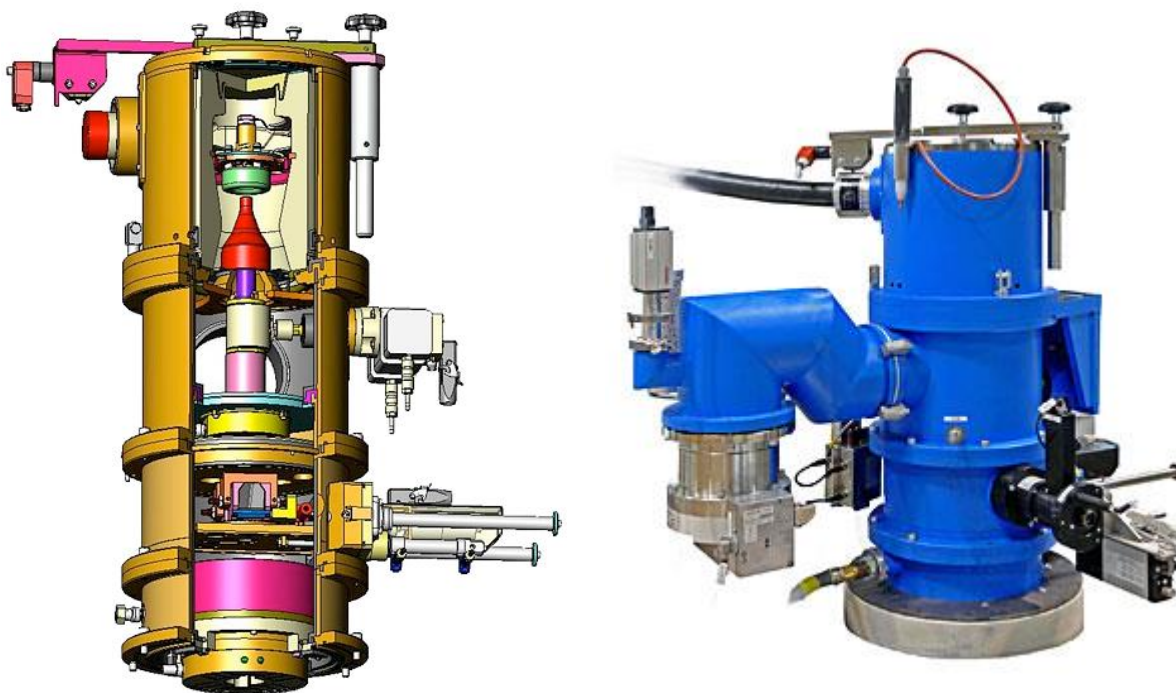
V roce 1905 došlo k prvnímu úspěšnému pokusu o tavení tantalu ve formě prášku s využitím elektronového paprsku. Tento experiment zahrnující použití vakuové komory provedl Marcel Stefan Pirani, který si princip patentoval (viz obr. 2 [4]). Ve 30. letech 20. století byl elektronový paprsek využíván primárně pro účely elektronové mikroskopie a jeho další výzkum byl prováděn především za účelem zdokonalování elektronových mikroskopů. V první polovině 20. století probíhaly různé experimenty, jejichž cílem bylo nalezení nových

možností využití elektronového paprsku. Jednou z nových možných aplikací bylo vrtání děr. V roce 1942 byl von Borrisem obdržen patent na elektronově-optický vrtací přístroj. První průmyslově využitelná vrtací zařízení se objevila o deset let později. K významnému posunu došlo zejména v 50. letech 20. století, a to díky německému fyzikovi Karlu Heinzovi Steigerwaldovi. Tento vědec objevil roku 1958 princip hlubokého svařování a v tom samém roce zkonstruoval první svařovací stroj vyžívající elektronový paprsek. V tomto období sehrála významnou roli firma Zeiss, která se zabývala konstrukcí svařovacích strojů. [1] [2]



Obr. 2 Zařízení pro tavení kovů elektronovým svazkem, detail z americké patentové přihlášky M. S. Piraniho [4]

Další rozvoj technologií využívajících elektronový paprsek pokračoval v 60. letech. Po roce 1964 vzniklo až 70 firem, které využívaly technologii svařování elektronovým paprskem. Aplikace jako gravírování či tepelné zpracování, které byly objeveny již dříve, procházely dalším zdokonalováním. Především v 70. letech, kdy mimo jiné vznikla firma Pro-beam, došlo k velkému rozvoji technologie tepelného zpracování elektronovým paprskem. V současnosti je po celém světě asi 20 výrobců EB technologie a přibližně 100 firem tuto technologii využívá pro komerční účely. Ukázka zařízení paprsku je na obr. 3 [5] [6]. [2] [4]



Obr. 3 Ukázka elektronového děla a) zevnitř, b) zvnějšku [5] [6]

2.2 Fyzikální princip

Elektrony jsou záporně nabitě elementární částice, které tvoří obal každého atomu. Tyto částice mají elektrický náboj o velikosti $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C a hmotnost $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ kg. Poloměr elektronů je $r_e = 2,82 \cdot 10^{-15}$ m. Jejich hmotnost je o tři řády nižší než hmotnost kladně nabitých protonů a elektricky neutrálních neutronů, které dohromady tvoří jádro atomu. V jádře se tedy soustřeďuje většina hmotnosti atomu, zatímco elektronový obal tvoří většinu objemu atomu. Pro elektrony pohybující se rychlostí v , jsou ovlivňovány elektromagnetickým polem, která na ně působí silou označovanou jako Lorentzova síla:

$$\mathbf{F}_L = q_e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (2.1)$$

kde \mathbf{E} je intenzita elektrického pole a \mathbf{B} je magnetická indukce pole. Tento poznatek nám umožňuje měnit pomocí elektromagnetických polí jak velikost rychlosti elektronu, tak i její směr. [2] [7]

Elektron pohybující se v elektromagnetickém poli může ztratit či získat kinetickou energii, která je dána vztahem:

$$E_k = |q_e U| = \frac{1}{2} m_e v^2, \quad (2.2)$$

kde U je urychlovací napětí. Jako jednotka energie se většinou používá Joule (J). V částicové fyzice se však používá spíše jednotka elektronvolt (eV), přičemž platí, že $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J. Dle rovnice (2.2) tedy platí, že kinetická energie elektronu je dána jeho rychlostí a hmotností. Z uvedené rovnice můžeme snadno vyjádřit vztah, kterým je definována rychlost elektronu urychleného z klidového stavu:

$$v = \sqrt{2 \frac{|q_e U|}{m_e}} \quad (2.3)$$

Další důležitou veličinou je vlnová délka elektronů. Vlnová délka je dána vztahem Louise de Broglieho:

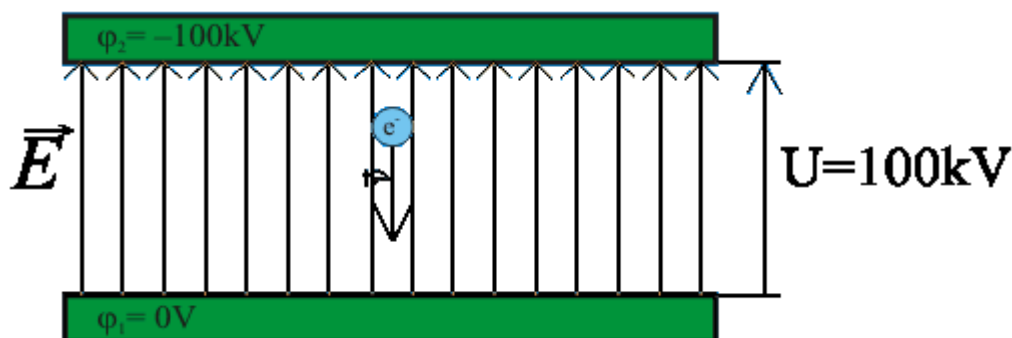
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 m_e q_e U}}, \quad (2.4)$$

kde h je Planckova konstanta, jejíž hodnota je $4,135667662 \cdot 10^{-15}$ eV.s. [2] [8]

Uvedené vztahy pro kinetickou energii, rychlost a vlnovou délku elektronu platí v rámci nerelativistické fyziky. Je však potřeba brát v potaz, že pro energie používané při svařování nebo obrábění (tj. od 10^4 až do 10^5 eV) již dosahují elektrony tzv. relativistických rychlostí. Tedy například rychlosti o velikosti $v = 1,24 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, což je asi 0,4 rychlosti světla, dosáhnou elektrony již při urychlovacím napětí $U = 50$ kV. S tímto je potřeba počítat při výpočtech, protože nerelativistický model udává hodnotu $v = 1,33 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$. Obecně platí, že se zvyšující se rychlostí elektronů roste hloubka průniku do materiálu. [2] [8]

Rychlost elektronu je tedy určena elektrickým polem o intenzitě E , které jej jako záporně nabitou částici urychluje. Elektrické pole je dáno rozdílem potenciálů mezi katodou a anodou. Tento rozdíl odpovídá urychlovacímu napětí (viz obr. 4 [9]). Urychlovací napětí lze tedy považovat za jeden ze základních parametrů technologie elektronového paprsku. Pokud

změníme velikost napětí elektrického pole, změníme velikost rychlosti elektronu, pohybujícího se od katody, ze které je emitován k anodě, kterou je přitahován. [8] [10]



Obr. 4 Elektron procházející elektrickým polem je urychlován směrem k anodě, při urychlovacím napětí 100 kV již je potřeba počítat s relativistickými hodnotami [9]

Vliv magnetického pole je analogický. Na elektron pohybující se ve směru rovnoběžném se směrem magnetických indukčních siločar nepůsobí žádná síla a pohybuje se počáteční rychlostí. Velikost magnetické síly je naopak maximální v případě, že vektor rychlosti elektronu a směr indukčních siločar svírají úhel 90°. Při pohybu elektronu v magnetickém poli na něj tedy působí magnetická síla, která vychyluje jeho dráhu a tím mění jeho směr rychlosti. Tento fakt je využíván pro fokusaci elektronového svazku a jeho přesné řízení. [8] [10]

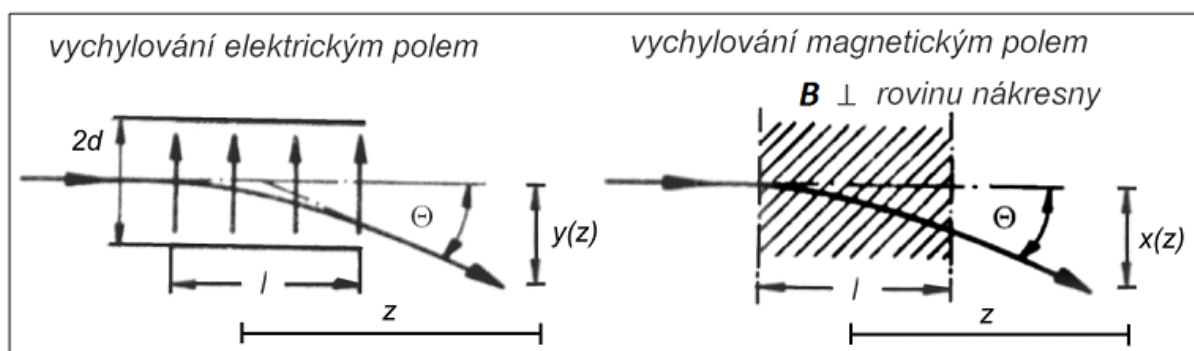
Pro homogenní elektrostatické pole platí následující. Částice se pohybují mezi dvěma deskami kondenzátoru, které mají napětí U_V a délku l . Vzdálenost desek je $2d$. Platí, že velikost výchylky od osy ve vzdálenosti z od středu vychylování je dána vztahem:

$$y(z) = - \left(\frac{l}{d} \right) \left(\frac{q_e U_V}{m v^2} \right) \cdot z, \quad (2.5)$$

pro $z > l/2$. Pro homogenní elektromagnetické pole, které působí mezi dvěma pólovými nástavci ve vzdálenosti $2d$ majícími napětí NI platí, že velikost výchylky od osy ve vzdálenosti z od středu vychylování je dána vztahem:

$$x(z) = \frac{l}{R} \cdot z, \quad R = - \frac{m v}{q_e B} = \frac{\sqrt{2 m q_e U} \cdot d}{q_e \mu_0 N I}, \quad (2.6)$$

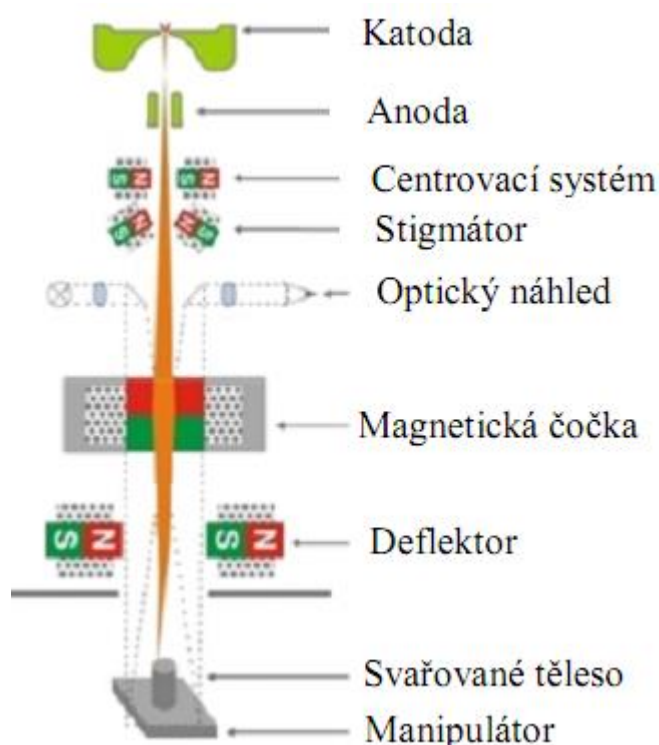
platí pro $l/R < 1$ a $z > l/2$, kde μ_0 je permeabilita vakua a B je magnetická indukce v oblasti pólových nástavců. Vychylování paprsku oběma typy polí je na obr. 5 [8]. [8]



Obr. 5 Vychylování elektronového svazku pomocí elektrického a magnetického pole [8]

2.3 Generátor elektronového svazku

Zařízení nazývané elektronové dělo je tvořeno mnoha součástmi plnícími různé funkce. Mezi základní a nejdůležitější součásti elektronového děla patří: zdroj elektronů, centrovací systém, stigmátor, magnetická čočka, deflektor (vychylovací systém) a další (viz obr. 6 [11]).

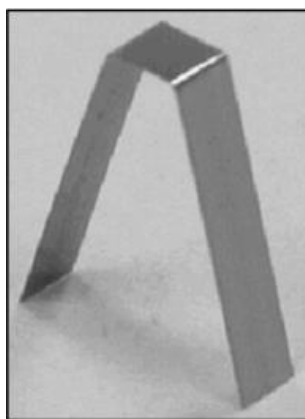


Obr. 6 Schéma elektronového děla [11]

Důležitou komponentou je rovněž vakuová soustava. Udržení potřebné úrovně vakua je základním předpokladem pro provádění jakékoliv operace s elektronovým svazkem. Většinou se za dostatečnou hodnotu považuje tlak menší než $1 \cdot 10^{-2}$ Pa [8]. Dále je zapotřebí chladicí soustava, která odvádí teplo vzniklé při provozu. Na elektronové dělo musí být připojen generátor vysokého napětí, které slouží k urychlování elektronů a samozřejmě řídicí systém.

2.4 Zdroj elektronů

Zdrojem elektronů je katoda. Pro získávání elektronů můžeme využít jevů známých jako termoemise nebo autoemise. V případě autoemise je potřeba vytvořit silné elektrické pole, jehož působení vede k uvolňování elektronů z katody. Problém s využitím autoemise však spočívá především v tom, že je zapotřebí vytvořit ultravakuum (hodnota tlaku v rozmezí 10^{-5} až 10^{-10} Pa) a dále je také problematické dosáhnout vysokých hodnot celkového výkonu. Z tohoto důvodu se autoemise využívá hlavně u elektronových mikroskopů, které mají nízké výkony. Pokud tedy využíváme elektronový svazek pro technologické aplikace je jednoznačně vhodnější využití termoemise. Jedná se o jev, při kterém z kovu emitují elektrony v důsledku jeho ohřátí na vysokou teplotu. Pouze při dostatečně vysoké teplotě mohou elektrony překonat potenciálovou bariéru na povrchu kovu. Pro dosažení emise elektronů je tedy nutné dodat určité množství energie, které označujeme jako výstupní práce kovu. Tato energie se pohybuje řádově v elektronvoltech (eV) a je závislá na použitém materiálu. Z tohoto důvodu je důležité vybrat takový materiál, který má co nejnižší hodnotu energetické bariéry a přitom bude mít vysokou teplotu tavení. Tyto předpoklady splňují nejlépe wolfram nebo tantal. [12] [13]

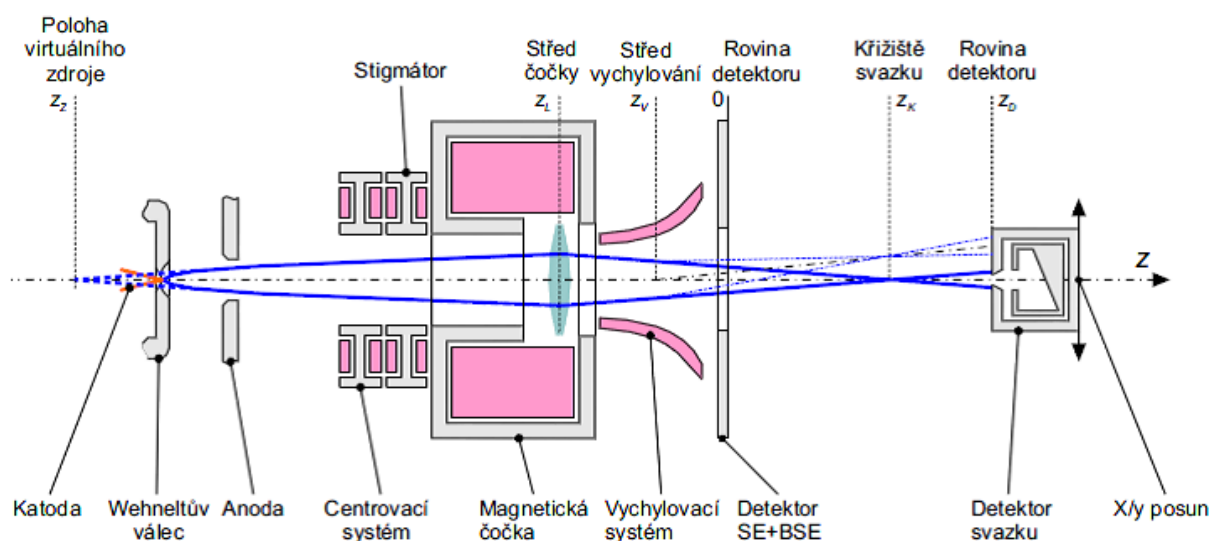


Obr. 7 Wolframový pásek [14]

Katoda z čistého wolframu či tantalu, může mít tvar pásku nebo drátu (viz obr. 7 [14]). Když je katoda žhavana při teplotě okolo 2500 K, dochází k emisi elektronů. V souvislosti s tímto jevem mluvíme o hustotě emisního proudu elektronů j_s (jednotka $A \cdot cm^{-2}$). Hustota emisního proudu je dána vztahem, který označujeme jako Richardsonův zákon:

$$j_s = AT^2 \exp\left(\frac{-e\Phi}{kT}\right), \quad (2.7)$$

zde je A konstanta emise, která je závislá na emitujícím povrchu, T je absolutní teplota katody, $e\Phi$ je výstupní práce kovu a k je Boltzmanova konstanta. Elektronů, které z katody emitují mají poměrně malou energii a nejsou usměrněny. Naším cílem je získat elektrony o vysoké kinetické energii, aby mohly při svém kontaktu s povrchem materiálu předat velké množství tepla a vyvolat tavení či odpaření. Urychlení elektronů na dostatečnou úroveň je dosaženo následujícím způsobem. Připojíme vysokonapěťový zdroj, a zatímco na katodu přivedeme záporný potenciál, anoda má potenciál nulový. Mezi katodou a anodou vzniká elektrické pole, které je schopno urychlit elektrony směrem k anodě a to až na rychlost dosahující 0,75 rychlosti světla. Urychlovací napětí se pohybuje v rozmezí 25 až 200 kV. Tomuto napětí je úměrná kinetická energie podle rovnice (2.2). Důležitou roli zde sehrává prvek, který nazýváme Wehneltův válec. Jedná se o řídicí elektrodu, která odtahuje elektrony od katody a s jejíž pomocí můžeme regulovat množství elektronů opouštějících katodu změnou předpětí. Tyto tři elektrody tedy společně tvoří jednu systém, který je první částí elektronového děla. Schéma elektronové optiky je na obr. 8 [2]. [8] [16]

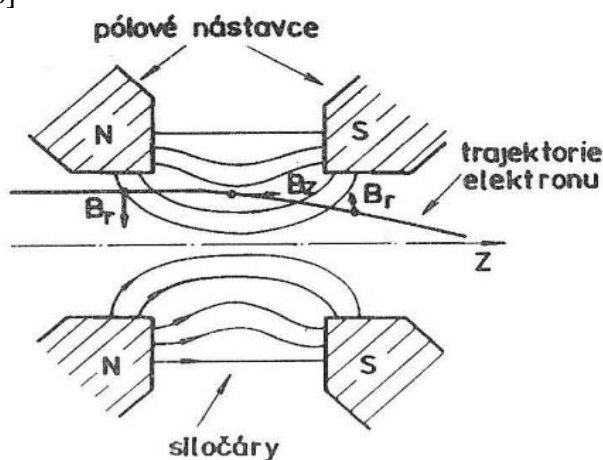


Obr. 8 Schéma elektronové optiky [2]

2.5 Hlavní prvky elektronové optiky

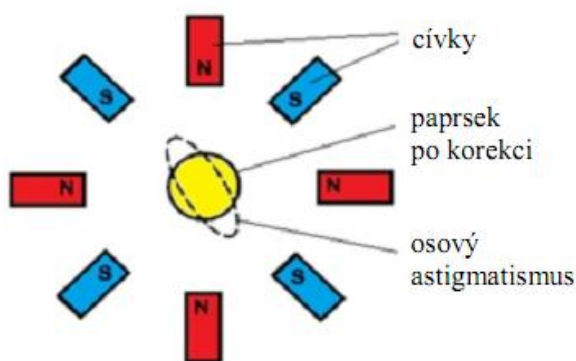
Když pomocí soustavy katoda, anoda a Wehneltův válec získáme elektronový svazek, je potřeba jej zaostřit a přesně navést k požadovanému místu. Toto zajišťují takové součásti jako centrovací systém, magnetická čočka a deflektor. Jedná se o hlavní prvky elektronové optiky, které slouží k homogenizaci, fokusaci a řízení směru elektronového paprsku. [16]

Mezi nejdůležitější prvky elektronové optiky patří magnetická čočka (viz obr. 9 [15]). Základem je válcová budicí cívka, kterou prochází elektrický proud. Tímto je generováno fokusační magnetické pole, jehož působení mění směr pohybu elektronů, avšak nijak neovlivňuje jejich rychlost. Magnetické pole způsobí takové změny trajektorií elektronů, že se tyto protínají v určitém bodě na ose rotační symetrie paprsku. Tomuto bodu se říká křížiště. Dochází tedy k zúžení průměru elektronového svazku a zvýšení hustoty energie, čemuž říkáme fokusace. [8] [16]



Obr. 9 Princip magnetické čočky [15]

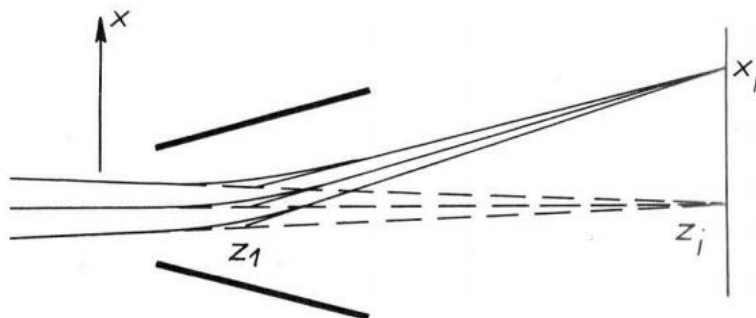
Centrovací systém je prvek, jehož účelem je korigovat odchylky svazku od fokusační osy. K tomu využívá homogenní magnetické pole. Systém je tvořen centrovacími cívkami, mezi kterými se nachází elektronový paprsek. Odchylky elektronů korigujeme změnami proudů v cívkách. Za centrovacími cívkami se nachází stigmátor (viz obr. 10 [17]), který můžeme využívat pro korekci optické vady zvané astigmatismus. [8] [16]



Obr. 10 Stigmátor [17]

Další významnou součástí je deflektor (viz obr. 11 [8]). Tento prvek slouží k vychylování elektronového svazku do požadovaného místa. Je to elektromagnetické zařízení, které je tvořeno dvěma páry cívek. Tyto cívky jsou uspořádány tak, aby byla vytvořena dvě navzájem kolmá, téměř homogenní magnetická pole. Díky tomu pak můžeme paprsek vychylovat ve

dvou směrech do různých úhlů a nasměrovat ho do libovolného místa. Změnami napájecích proudů lze pohybující se paprsek přesně vést po vymezené trajektorii. Právě možnost přesného řízení a tepelného ovlivnění pouze potřebných ploch patří k velkým přednostem elektronového svazku. [8] [16]



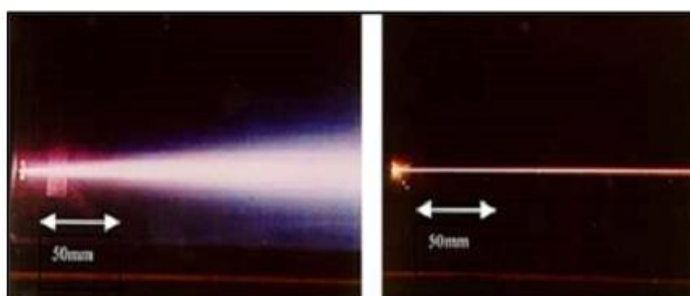
Obr. 11 Princip deflektoru [8]

Využití prvků elektronové optiky závisí samozřejmě na tom, jak vysoké požadavky máme na kvalitu. Kromě zmíněných můžeme využívat i další prvky, které redukuje různé vady elektronové optiky. Tyto vady jsou jedním z omezujících faktorů, které brání dosažení optimálních vlastností elektronového svazku jako je hustota výkonu. Mezi obvyklé vady patří především sférická vada, chromatická vada a osový astigmatismus. [16] [18]

V případě sférické vady dochází k tomu, že čočka není schopna fokusace paprsku do jednoho bodu. Velikost této vady se zvětšuje s rostoucí ohniskovou vzdáleností čočky. Vadu můžeme potlačit pomocí odstiňující clony. Chromatická vada se projevuje vznikem spektra ohnisek. Je to zapříčiněno tím, že pomalejší elektrony jsou fokusovány do jiných bodů než elektrony s vyšší rychlostí. Velikost vady lze snížit pouze pomocí stabilizace napětí. Osový astigmatismus bývá většinou způsoben nedokonalostmi čoček, případně nečistotami. Projevem vady je různá fokusace v různých rovinách a eliptický profil elektronového svazku. Jak již bylo zmíněno dříve, tuto vadu koriguje prvek zvaný stigmátor pomocí magnetického pole. [16] [18]

2.6 Pracovní komora

Pro správný průběh všech technologických operací zahrnujících elektronový svazek je nutné použití speciální pracovní komory s potřebnou úrovní vakua a pohyblivým stolem, který slouží také jako manipulátor. Pracovní stůl by měl umožňovat pohyb materiálu nahoru a dolů, naklánění materiálu ve všech osách a rotaci. Velikost pracovní komory může být různá a závisí na potřebách uživatele. Některé komory mají objem v řádu stovek metrů krychlových, zatímco ty nejmenší mají objem v řádu litrů. Při všech procesech je mimořádně důležité udržení dostatečného vakua, abychom zabránili rozptylu elektronového svazku kvůli srážkám s molekulami vzduchu. Na obr. 12 [21] je zobrazen rozdíl mezi svazkem vstupujícím do prostředí s tlakem blízkým se atmosférickému tlaku a do vakua. [11] [19]



Obr. 12 Elektronový svazek a) v prostředí s téměř atmosférickým tlakem, b) ve vakuu [21]

Pro běžné materiály jako ocel, hliník či měď lze vakuum uvnitř pracovní komory považovat za dostatečné při hodnotě tlaku pod $1 \cdot 10^{-1}$ Pa. V tubusu elektronového děla je však zapotřebí mnohem vyšší vakuum. Hodnota tlaku by zde měla být menší než $1 \cdot 10^{-3}$ Pa. Vakuum je zajišťováno pomocí vývěvy, která odčerpává vzduch. S ohledem na to, jak vysoké vakuum potřebujeme, rozlišujeme tři typy vývěv. Je to jednak rotační vývěva určená pro dosažení jemného vakua ($1 \cdot 10^{-1}$ Pa), dále pak difuzní vývěva zajišťující vysoké vakuum (až $1 \cdot 10^{-5}$ Pa) a nakonec turbomolekulární vývěva potřebná pro dosažení ultravysokého vakua ($1 \cdot 10^{-10}$ Pa). U vysokovakuového stroje, který je používán pro reaktivní materiály jako je titan, niob nebo zirkonium by se hodnota tlaku v pracovní komoře měla blížit hodnotě tlaku v tubusu elektronového děla. Jednotlivé funkce pracovní komory jako odčerpávání vzduchu nebo pohyb pracovního stolu jsou řízeny z ovládacího panelu. Z bezpečnostních důvodů jsou vnitřní stěny pracovní komory schopny odstínění nebezpečného záření a sklo průzoru by mělo být vyrobeno z olovnatého skla. Ukázka pracovní komory je na obr. 13 [20]. [11] [19]



Obr. 13 Pracovní komora K6000-1 firmy Pro-Beam s objemem 640 m^3 [20]

2.7 Interakce elektronů s materiálem

Ve chvíli, kdy elektronový paprsek vstupuje do pracovní komory a dopadá na zpracovávaný materiál, dochází k tomu, že elektrony pronikají do materiálu a předávají mu svou kinetickou energii ve formě tepla. Mluvíme o interakci elektronů s materiálem. Při vstupu elektronů do materiálu uvažujeme dva typy srážek. Může to být buď srážka elektronu s jádrem atomu, nebo srážka s elektronem z vnějšího obalu. První případ je velmi málo pravděpodobnou pružnou srážkou, při které dochází jen k minimálnímu přenosu energie. Naopak druhý případ je podstatně pravděpodobnější srážka, při níž je předána mnohem větší energie. Dále je energie přenášena na krystalickou mřížku. Toto vede k vibraci mřížky v důsledku předávání energie mřížkovým fononům. Jedná se o vibrační kvantum, které se postupně šíří krystalickou mřížkou. Energie atomů v mřížce se zvyšuje. Tento proces vede k přeměně kinetické energie na energii tepelnou a výsledkem je zvýšení teploty materiálu. [8]

Elektrony, které pronikají do materiálu, jsou podle experimentálních zjištění schopny předat svou kinetickou energii jen na velmi malou vzdálenost a to maximálně v řádu desetin milimetrů. Následující vztah vyjadřuje hloubku průniku elektronů:

$$R = 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{U^2}{\rho}, \quad (2.8)$$

kde U je urychlovací napětí a ρ je hustota materiálu. Hodnoty hloubky průniku v μm pro různé materiály jsou uvedeny v tab. 1. [22]. [2]

Tab. 1 Hloubka průniku elektronů do materiálu [22]

Materiál	Hustota [kg.m ⁻³]	Urychlovací napětí [kV]			
		60	100	120	150
Wolfram	19 263	3,9	10,9	15,7	24,5
Tantal	16 654	4,5	12,6	18,2	28,4
Molybden	10 218	7,4	20,6	29,6	46,2
Hliník	2 699	28	77,8	112	175,1
Měď	8 960	8,4	23,4	33,8	52,7
Olovo	11 340	6,7	18,5	26,7	41,7
Uhlíková ocel 12 050	7 870	9,6	26,7	38,4	60
Konstrukční nízkolegovaná ocel 15 142	7 850	9,6	26,8	38,5	60,2
Nástrojová ocel 19 436	7 710	9,8	27,2	39,2	61,3

Dobu τ [s] potřebnou pro transfer energie z vnějších (vodivostních) elektronů na krystalickou mřížku lze určit podle vztahu vycházejícího z teorie vodivosti:

$$\tau = 2\kappa \cdot \frac{m_e}{q_e^2} \cdot \frac{1}{n}, \quad (2.9)$$

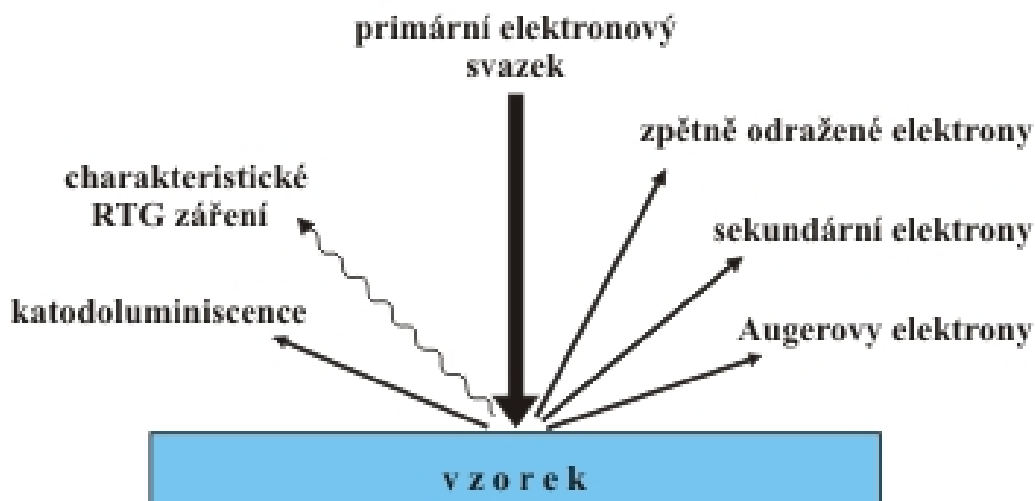
kde κ je elektrická vodivost a n je objemová hustota vodivostních elektronů. [8]

Při převodu kinetické energie elektronů na teplo je třeba počítat s určitými ztrátami. Tyto ztráty jsou zaviněny tím, že část primárních elektronů tvořících elektronový paprsek je pružně odražena zpět nebo je emitována. Rozlišujeme několik skupin elektronů. Jednou z nich jsou zpětně rozptýlené elektrony, které sice pronikají pod povrch materiálu, ale zde předají jen velmi málo energie a pružnými srážkami jsou vráceny zpět na povrch. Tyto elektrony jsou označovány zkratkou BSE (backscattered electron). [8] [16]

Dále jsou to sekundární elektrony. Jedná se o elektrony, které jsou vyraženy z orbitalu atomu a uvolňují se z materiálu. Označují se zkratkou SE. [8] [16]

Dalším typem jsou Augerovy elektrony, jejichž výskyt je založen na tzv. Augerově jevu. Podstatou tohoto jevu je vyražení elektronu z vnitřních vrstev atomového obalu primárním elektronem. Na volné místo se přesune elektron z vnějších vrstev. Uvolněná přebývající energie pak může být absorbována jiným elektronem, který opustí svou polohu v atomu, pokud je pro to jeho energie dostatečně velká. Elektron je pak materiálem emitován. Augerovy elektrony se značí zkratkou AE. [8] [16]

Při interakci elektronů s povrchem materiálu (viz obr. 14 [23]) dochází také k vyzáření rentgenového záření (RTG) o vlnové délce 10^{-9} až 10^{-12} m. Dále pak může být vyzářeno tepelné záření a světelné záření s odlišnou vlnovou délkou než má záření rentgenové. Jelikož intenzita a energie rentgenového záření rychle rostou v závislosti na zvyšujícím se urychlovacím napětí, je potřeba brát v potaz možné nebezpečí radiace. Pracovní komora by měla být vybavena speciálními skly a její stěny by měly být schopny odstínění. [8] [16]



Obr. 14 Interakce elektronového paprsku s povrchem materiálu [23]

2.8 Tepelný účinek svazku

Elektrony interagující s materiálem dopadají ve velmi vysokém počtu. Jedná se o přibližně $6 \cdot 10^{11}$ elektronů při pulsu trvajícím 1 ms a proudu o hodnotě 0,1 mA. Pokud se chceme zabývat souhrnnými tepelnými účinky elektronového svazku na materiál, je vhodnější zaměřit pozornost na celkový účinek paprsku a nikoliv jen na interakce jednotlivých elektronů. Především při velkých průměrech svazku v řádu stovek mikrometrů je tento náhled výhodný. Uvažujeme tedy celkový výkon elektronového svazku jako součin urychlovacího napětí a proudu ve svazku [8]:

$$P_0 = U \cdot I \quad (2.10)$$

Další důležitou veličinou je hustota výkonu, která je dána jako podíl celkového výkonu svazku a objemu tělesa [8]:

$$p_A = \frac{P_0}{V} \quad (2.11)$$

Vedle hustoty výkonu je významnou veličinou také hustota proudu. Prostorový náboj q_v , který je vytvářen elektronovým svazkem se pohybuje střední rychlostí v a vytváří elektrický proud. Hustota tohoto proudu je dána vztahem [8]:

$$\mathbf{J}(x,y,z) = q_v(x,y,z) \cdot v \quad (2.12)$$

Užívání hustoty výkonu je v praxi vhodnější než použití hustoty proudu. Pro tepelný účinek elektronového paprsku na zpracovávaný materiál je totiž rozhodující právě hustota výkonu. Hustoty výkonu pro různé aplikace jsou uvedeny v tab. 2. [8]. [8]

Tab. 2 Hustoty výkonu pro různé aplikace [8]

Hustota výkonu [W/mm ²]	Aplikace
$10^{-1} - 1$	Vytvrzování
$1 - 10$	Žihání
$10 - 10^3$	Tavení
$10^2 - 10^5$	Napařování
$10^4 - 10^6$	Svařování
$10^5 - 10^7$	Obrábění

Nejvyšší dosažitelná hodnota hustoty výkonu u elektronového svazku je přibližně 10^9 W/cm². Z používaných technologií dosahuje vyšší hustoty výkonu jen laser. Nejmenší dosažitelný průměr elektronového svazku je 3 až 20 μ m v závislosti na elektronové optice. [8] [10]

Z místa dopadu paprsku, kde dochází ke zvýšení teploty, je teplo odváděno do okolí vedením a zářením. Abychom stanovili ohřev v určité hloubce pod povrchem materiálu, musíme vycházet z diferenciální rovnice pro vedení tepla [8]:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{Q(x,t)}{c \cdot \rho} \quad \text{pro } x > 0, t > 0 \quad (2.13)$$

V rovnici (2.13) je T teplota prostředí v Kelvinech, x je vzdálenost od povrchu materiálu, t je čas od počátku působení elektronového paprsku, a je koeficient tepelné vodivosti, c je měrná tepelná kapacita a Q je množství dodaného tepla na jednotku objemu. [8] [10]

Dále pro počáteční a okrajové podmínky platí následující:

$$T(x,0) = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = 0 \quad \text{pro } x = 0 \quad (2.15)$$

Řešením diferenciální rovnice (2.13) můžeme stanovit ohřev. Ve vztahu pro výpočet ohřevu figurují veličiny jako r , což je vzdálenost od bodového zdroje a E_0 , což je dopadající energie v bodě $r = 0$ a čase $t = 0$. [8]

Vztah pro výpočet ohřevu:

$$T(r,t) = \frac{E_0}{\rho c (4\pi a t)^{\frac{3}{2}}} q_e^{-\left(\frac{r^2}{4at}\right)}, \quad (2.16)$$

Dále můžeme z rovnice (2.16) určit tzv. relaxační čas, což je doba, za kterou se rozšíří rozložení teploty v místě dopadu svazku. [8]

Vycházíme z následujících vztahů:

$$\tau_R = \frac{R^2}{4a}, \quad (2.17)$$

$$\text{resp. } \tau_d = \frac{d^2}{16a}, \text{ kde } a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (2.18)$$

Platí, že a je tepelná difuzivita (součinitel teplotní vodivosti) a λ je koeficient tepelné vodivosti. Tepelná difuzivita je veličina vyjadřující schopnost látky vyrovnávat teplotní rozdíly při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí. Pokud je doba t podstatně kratší než časy τ_R a τ_d ($t \ll \tau_R, \tau_d$), není odvod tepla do okolí významný a ohřev lze považovat za kvazi-adiabatický. [8] [10]

V takovém případě platí následující vztah pro lokální zvýšení teploty za čas t :

$$T(z,r,t) = \frac{p_A(z,r) \cdot t}{\rho c}, \quad (2.19)$$

kde p_A je hodnota absorpce výkonu na jednotku objemu. Pro případ, že dojde k fázové přeměně, nabývá vztah tento tvar:

$$T(z,r,t) = \frac{p_A(z,r) \cdot t}{\bar{\rho} \bar{c}} - \frac{\sum \varepsilon_F}{\bar{c}}, \quad (2.20)$$

kde $\bar{\rho}$ je střední hodnota hustoty a \bar{c} je střední hodnota tepelné kapacity v daném rozsahu teplot a ε_F je celkové teplo fázových přeměn. Pokud dojde k tomu, že doba t převyší časy τ_R a τ_d , je odvod tepla do okolí naopak značný a ohřev nelze považovat za kvazi-adiabatický. V tomto případě pak platí vztah [8]:

$$T_{\max}(t) = \frac{p_{A\max}}{\bar{\rho} \bar{c}} t^n, \text{ pro } n < 1, \quad (2.21)$$

Teplota se zvyšuje v lineární závislosti na čase. Své maximální hodnoty dosáhne v čase $t \gg \tau_R, \tau_d$. [8] [10]

Rozložení teploty je pak závislé už jen na výkonu svazku a tepelné vodivosti materiálu [8]:

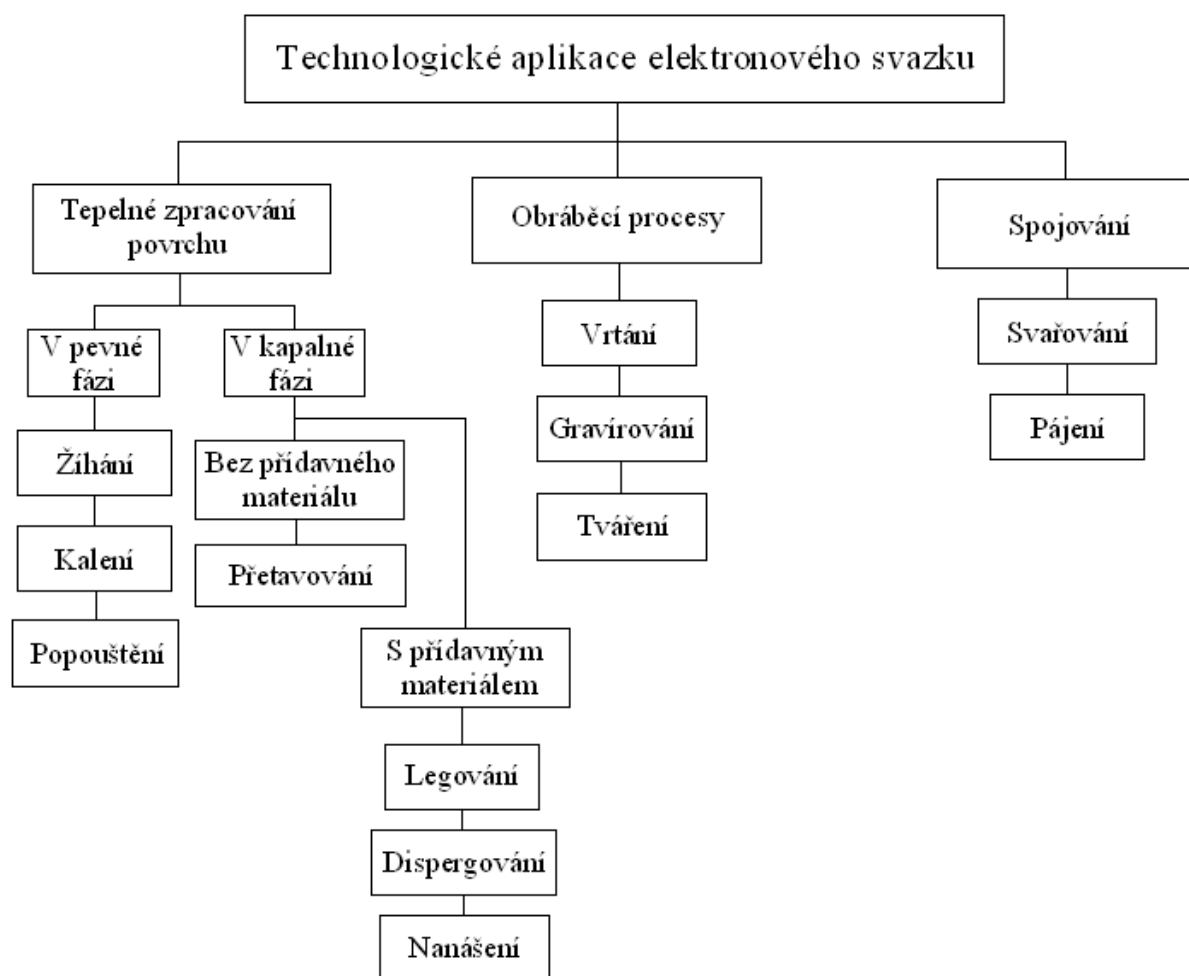
$$T(r) \approx \frac{P_0}{2\pi\lambda r} \quad (2.22)$$

3 Aplikace elektronového svazku

Elektronový svazek má v současnosti široký okruh využití. Možné aplikace zahrnují např. svařování, vrtání, gravírování, žíhání, kalení či přetavování. Významné je samozřejmě také využití svazku v elektronové mikroskopii. Aplikace v oblasti tepelného zpracování povrchů materiálů je založena právě na přeměně kinetické energie v teplo při dopadu proudu elektronů. Jak již bylo dříve uvedeno, ohřev dané plochy na povrchu materiálu je velmi rychlý. Jedná se až o 37 000 K/s pro ohřev na teplotu 1400°C. Rychlost ochlazení daného místa je rovněž velmi vysoká a to díky rychlému odvodu tepla do zbývajícího objemu materiálu. Tepelné ovlivnění okolní oblasti působení svazku je minimální. [16] [24]

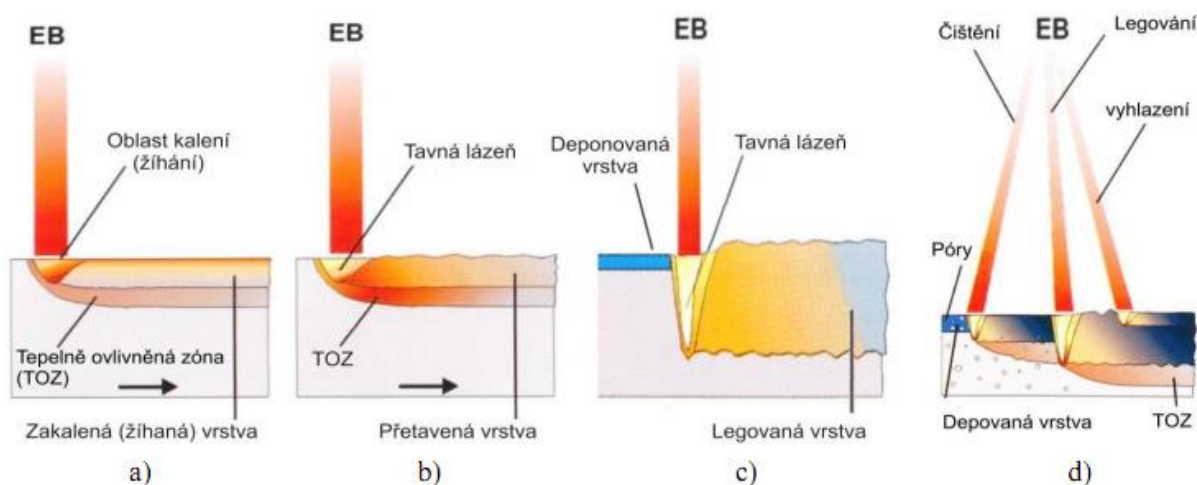
3.1 Základní rozdělení

Podle výše teploty, které dosáhneme, rozlišujeme jednotlivé procesy. Pokud plochu ohřejeme pod teplotu taveniny, při zachování pevné fáze, hovoříme o takových procesech jako žíhání, kalení či popouštění. V případě, že při ohřevu přesáhneme teplotu tání, jedná se o procesy v kapalně fázi, kterými jsou přetavování, legování, dispergování nebo nanášení. Při ohřevu na teplotu varu dochází k vypařování materiálu, které probíhá při procesech obrábění či spojování. Obrábění zahrnuje vrtání, gravírování a tváření. Spojování se dělí především na hluboké svařování a pájení. Přehledné základní rozdělení možných aplikací elektronového svazku je uvedeno na obr. 15. [16]



Obr. 15 Přehled technologických aplikací elektronového svazku

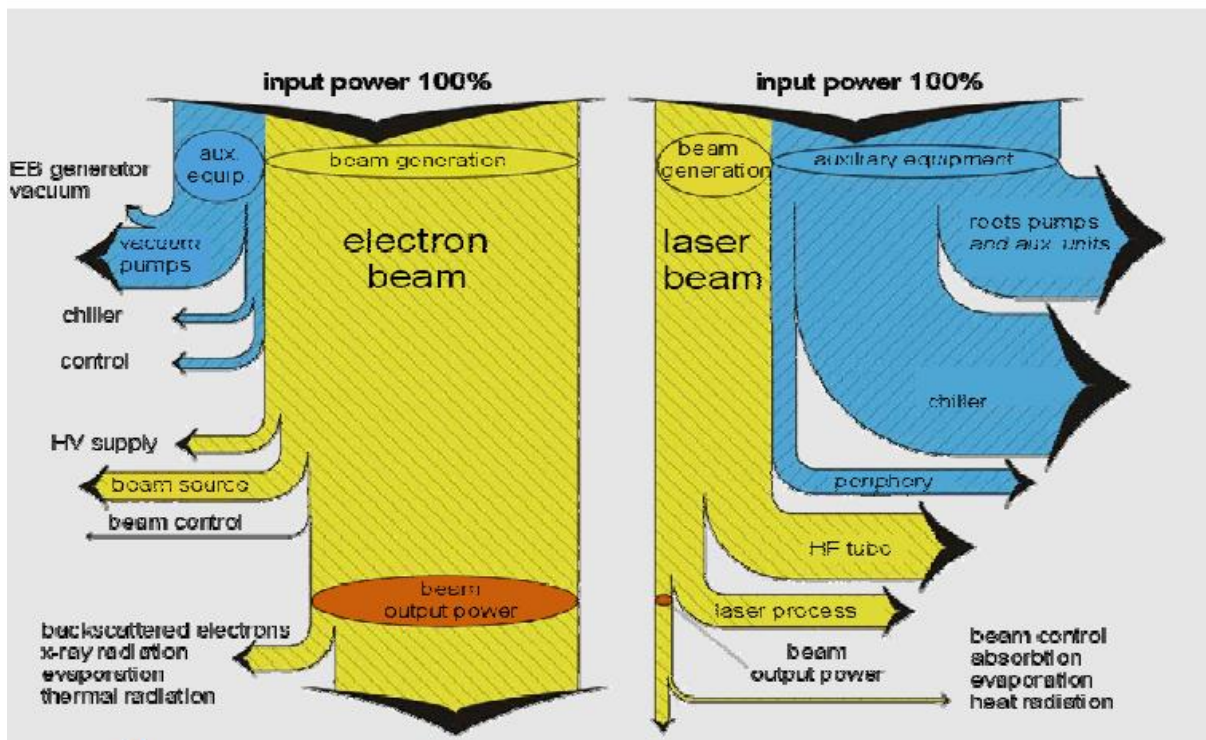
Pokud provádíme hluboké svařování, kdy dochází k intenzivnímu vypařování materiálu, v tavné lázni vzniká plynová kapilára. Poté, co je ohřev v daném místě ukončen, následuje okamžité ochlazení a utvoření tuhé vrstvy, která je mnohem tlustší než při tavení bez plynové kapiláry. Tento rozdíl je patrný na obr. 16. [24]. [24]



Obr. 16 a) Kalení, žihání, b) tavení bez plynové kapiláry - přetavení, c) tavení s plynovou kapilárou – legování, d) kombinovaný proces [24]

3.2 Srovnání elektronového svazku a laseru

Pro některé operace je možno zaměnit technologie elektronového paprsku a laseru, např. svařování, kalení, řezání, vrtání atd. Pro operace jako vrtání či řezání se využívá častěji spíše laser, zatímco elektronový svazek je vhodnější především pro operace, kdy je potřeba rychle vyvrtat velké množství děr. Porovnání energetické účinnosti je na obr. 17 [20]. [16] [24]



Obr. 17 Porovnání energetické účinnosti elektronového svazku a laseru [20]

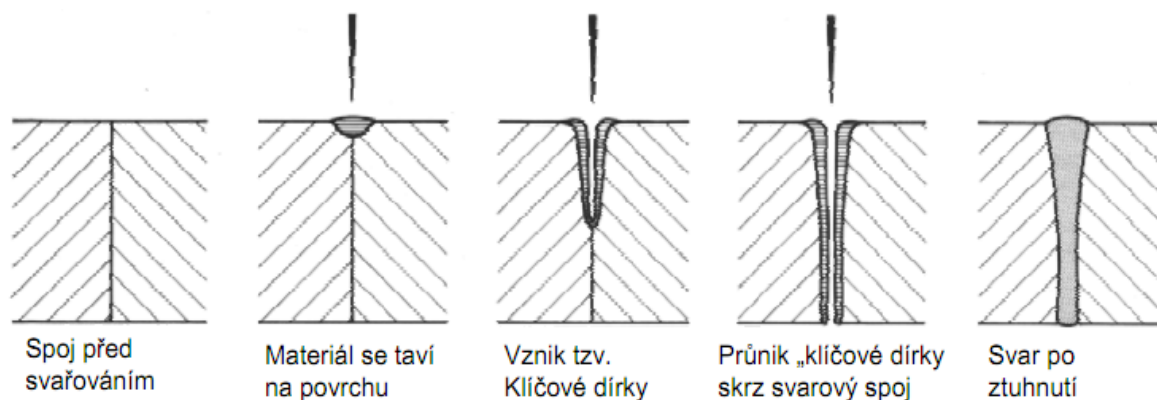
Elektronový svazek má oproti laseru nižší hustotu energie. Ta v případě elektronového svazku činí 10^6 J/cm^3 , zatímco u laseru je to 10^{12} J/cm^3 . Rovněž hustota výkonu dosahuje u laserového svazku vyšších hodnot. Na druhou stranu, technologie využívající elektronový svazek mají oproti laserovým větší účinnost. Rozdíl činí 5% oproti CO_2 laseru, přibližně 10 až 20% oproti polovodičovému laseru a dokonce 50% oproti diskovému laseru. Energie elektronového svazku ztrácí ze své původní hodnoty 5 až 15% v důsledku tepelného záření a vypařování, přibližně 1 až 5% v důsledku zpětně vyzářených elektronů, zhruba 1% při vedení paprsku a necelé procento při vyzáření rentgenového záření, tepelného záření a při vyzáření sekundárních elektronů. Užitečná energie svazku činí 80 až 90%. Tato energetická bilance poukazuje na vysokou účinnost elektronového paprsku. [16] [24]

Další výhodou elektronového svazku je nižší spotřeba elektrické energie při provozu zařízení. Nutnost vakua při použití elektronového svazku by se mohla jevit jako nevýhoda, avšak v konečném důsledku jde spíše o jeho přednost. Vakuum slouží jako ochranná atmosféra a při svařování reaktivních kovů již tedy není zapotřebí plynů jako Ar a N_2 . To znamená snížení nákladů. [16] [24]

3.3 Svařování

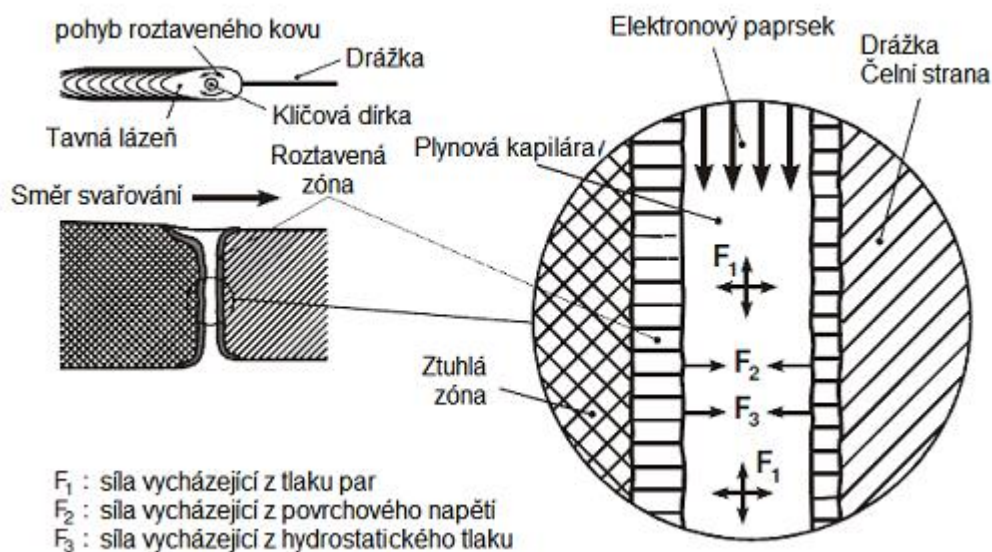
Svařování je pravděpodobně vůbec nejpoužívanější a nejznámější aplikací elektronového svazku. Plochy obou svařovaných materiálů jsou na rozhraní ohřívány nad teplotu tání. Většinou není zapotřebí žádný další přídavný materiál, oba materiály se promísí a po ochlazení vzniká svarový spoj. Rychlost svařování je velmi vysoká, proces je dobře říditelný a monitorovatelný. Výhodou je rovněž možnost kombinovat velmi rozdílné materiály a malý vstup tepla, což znamená omezení deformací, smršťování a tepelně ovlivněných oblastí. Svařování elektronovým svazkem se vyplatí tím více, čím je větší tloušťka materiálu, jeho cena a délka svaru. [16] [24]

V souvislosti se svařováním elektronovým svazkem je důležitý především tzv. hloubkový efekt. Když ohřejeme materiál na teplotu vypařování, vzniká pára, která vytlačuje taveninu do stran. Vzniká plynová kapilára, která bývá také označována jako klíčová dírka. Tato kapilára umožňuje průnik svazku do velkých hloubek. Můžeme tak vytvořit hluboké průvary mající až 300 mm. Tepelně ovlivněná oblast je při hlubokém svařování velmi úzká, což nám umožňuje vytvářet svary v blízkosti tepelně citlivých částí. Průběh tvorby svarového spoje je zobrazen na obr. 18 [20]. [16] [24]



Obr. 18 Průběh procesu svařování [20]

Funkční princip hlubokého svařování, vznik kapiláry a silové působení uvnitř kapiláry je zobrazeno na obr. 19. [25]



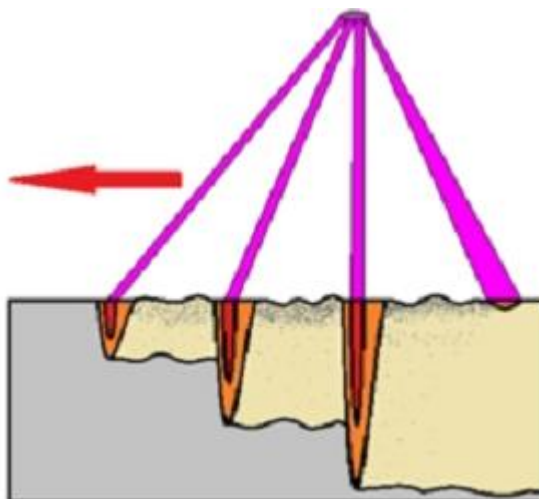
Obr. 19 Funkční princip hlubokého svařování díky vzniku plynové kapiláry [25]

Jak již bylo řečeno, při svařování pomocí elektronového svazku máme možnost spojovat materiály s velmi rozdílnými vlastnostmi, které žádným jiným konvenčním způsobem svařit nelze z důvodu vzniku křehkých intermetalických fází. Svařovat můžeme např. ocel a hliník nebo ocel a wolfram. Jednou z novějších technologií svařování je např. vícebodové svařování (multipool welding) (viz obr. 20 [11]). Jak již název napovídá, tato technologie nám umožňuje vytvářet více svarových spojů najednou. Proces je proveditelný díky možnosti vychýlit elektronový paprsek mezi několik bodů ve velmi krátkém časovém intervalu. Důležitý je hlavně rychlý návrat paprsku do dané klíčové dírky, aby se zabránilo jejímu kolapsu. Vychylovací rychlost je až $2,2 \cdot 10^6$ °/s. Velkou výhodou vícebodového svařování je kromě značné časové úspory také zmenšení tepelných deformací a dosažení rovnoměrného rozložení napětí. Tento způsob se využívá hlavně při axiálním svařování. [2] [16] [24]



Obr. 20 Vícebodové svařování [11]

Další možnou variantou je multiprocesní svařování (viz obr. 21 [11]). Tento způsob je principiálně podobný vícebodovému svařování, avšak s tím rozdílem, že tvorba svarů neprobíhá paralelně, nýbrž za sebou ve stejné výšce. [16] [26]



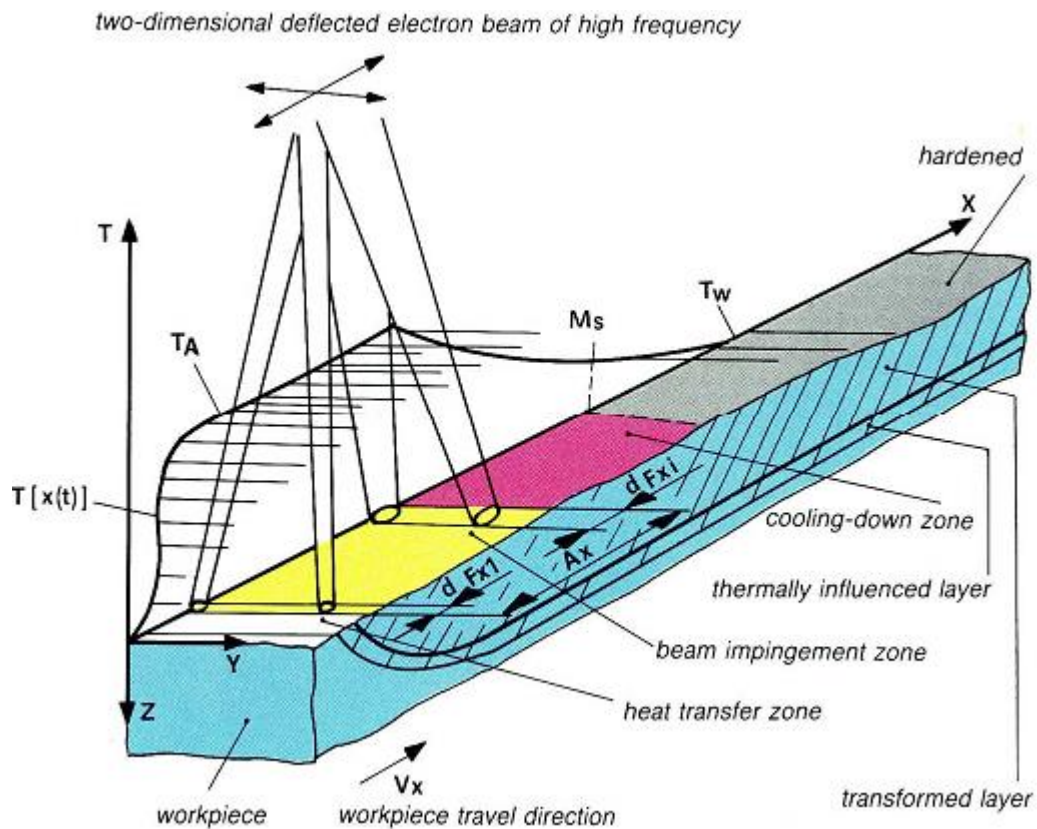
Obr. 21 Multiprocesní svařování [11]

3.4 Žihání

Jednou z možností využití elektronového svazku v oblasti tepelného zpracování materiálu je žihání. Provádíme jej obecně za účelem zlepšení některých vlastností povrchu materiálu. Většinou je naším cílem získání jemnozrné rekrytalizované struktury. Proces probíhá v pevné fázi stejně jako kalení a popouštění. Ohřev je velmi rychlý, nesmí však překročit potřebnou teplotu, protože by došlo ke zhrubnutí zrna a při pokračujícím ohřívání by mohlo dojít i k tavení materiálu. Je tedy potřeba ohřát materiál přibližně na teplotu do $0,4 \cdot T_t$. Při ochlazování nepotřebujeme žádné chladicí médium. Ochlazení je umožněno rychlým odvedením tepla do zbývajících objemu materiálu. Výhodou je možnost zajistit požadovaný teplotní profil a zahřát jen požadované místo na povrchu součásti. Průběh procesu je monitorován pyrometrickými měřeními nebo kamerou. Můžeme také kontrolovat všechny procesní parametry. Žihání elektronovým svazkem je vhodnějším spíše pro menší objemy zpracovávaného materiálu. [16] [24]

3.5 Kalení

Kalení je jedním ze základních postupů tepelného zpracování, jehož hlavním cílem obecně je zvýšení tvrdosti materiálu. V případě povrchového kalení se pak jedná o získání tvrdé povrchové vrstvy s martenzitickou strukturou při zachování houževnatého jádra. Povrchové kalení je nejrozšířenější způsob tepelného zpracování v pevné fázi s využitím elektronového svazku. Základem procesu je ohřev na teplotu pod T_t (kalicí teplota), výdrž na této teplotě a velmi rychlé ochlazení. Konvenční způsoby zahrnují ochlazování např. ve vodních či olejových lázních. Právě při této fázi dochází nejvíce k chybám vedoucím k nesprávnému zakalení součásti. Při použití elektronového svazku nepotřebujeme žádné ochlazovací médium, protože materiál je stejně jako v případě žihání ochlazen odvedením tepla do zbývajících objemu. Toto ochlazení může probíhat s rychlostí 10^4 K/s. Hloubka prokalení bývá 0,1 až 2 mm. Zakalené povrchy, které byly vytvořeny pomocí elektronového svazku, dosahují mnohem vyšších tvrdostí než povrchy zakalené konvenčními technologiemi. Z ocelí vhodných pro kalení elektronovým svazkem jsou to ty s obsahem uhlíku vyšším než 0,18%. Kromě kovových materiálů může elektronovým paprskem modifikovat také povrchy polymerů zvyšováním modulu pružnosti. Průběh ohřevu je na obr. 22 [20]. [16] [24]



Obr. 22 Průběh ohřevu elektronovým paprskem [20]

Při kalení hraje důležitou roli úhel dopadu paprsku na povrch materiálu. Pokud je úhel dopadu např. 60° , může docházet k 50% energetickým ztrátám a snižuje se hloubka prokalení. Tyto ztráty lze zmenšit korekcí. Korigovat můžeme buď ozařované pole, nebo také můžeme provádět korekci nakláněním součástí. Díky těmto korekcím můžeme velmi výrazně zvýšit hloubku zakalené vrstvy. Na obr. 23 [20] je ukázka zakalené oceli. [8] [16]



Obr. 23 Ocel 12061, kalená hloubka 1 mm, tvrdost 58 HRC [20]

3.6 Přetavování

K dalším možným způsobům tepelného zpracování patří přetavování. Na rozdíl od žíhání, kalení či popouštění dochází u přetavování k ohřevu materiálu nad teplotu tání a proces probíhá v kapalně fázi. Po rychlém ohřevu a natavení následuje krátká výdrž na teplotě a rychlé ochlazení umožněné odvedením tepla do zbylého objemu materiálu. Výsledkem je přetavená vrstva s velice jemnozrnnou strukturou o vyšší tvrdosti. Ke zvýšení tvrdosti dochází u valné většiny kovových materiálů a slitin včetně grafitických litin. V některých případech se však tvrdost může snižovat a to např. u vytvrzených hliníkových slitin. Přetavená vrstva je

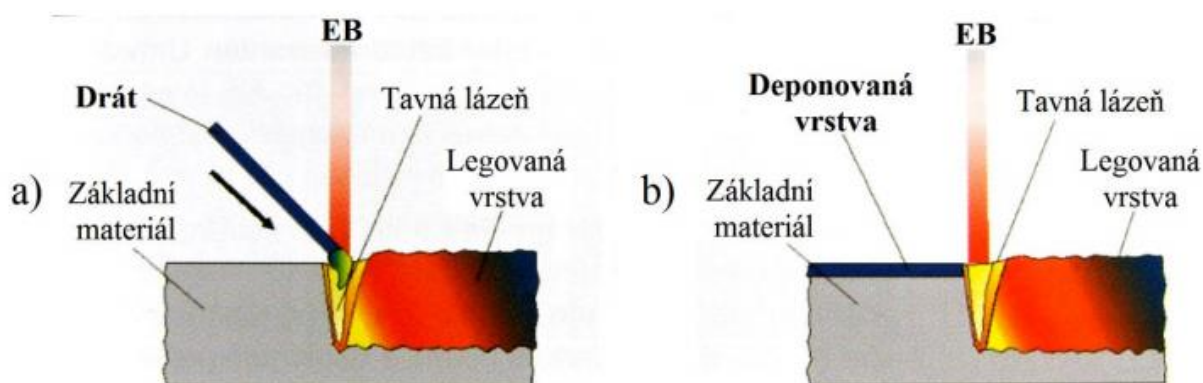
také více odolná proti korozi. Hloubka přetavení může být od 0,1 až do 10 mm. Výhodou přetavování elektronovým svazkem je možnost tepelně zpracovávat kovy a slitiny, které jsou obtížně tavitelné a chovají se vysoce reaktivně. Kromě ztuhnutí povrchů můžeme přetavováním dosáhnout také odstranění pórovitosti mikrostruktury zpracovávaného povrchu. To je možné díky vakuu a tavné lázni v okolí plynové kapiláry. Přetavování je možno kombinovat s jinými postupy tepelného zpracování. Přetavená litina je na obr. 24 [20]. [8] [16] [24]



Obr. 24 Šedá litina 422425, přetavená hloubka 1 mm, povrchová tvrdost 60 HRC [20]

3.7 Legování

Tepelné zpracování v kapalně fázi může probíhat buď bez přídavného materiálu jako v případě přetavování nebo s využitím přídavného materiálu a v takovém případě se jedná o legování, nanášení či dispergování. Podobně jako u přetavování probíhá jako první ohřev nad teplotu tání. Legování zahrnuje přidání legur do taveniny ať už ve formě drátu nebo vrstvy nanesené před natavením povrchu. V prvním případě se jedná o jedноступňovou depozici a ve druhém případě pak o dvoustupňovou depozici. Dvoustupňová depozice se volí především při zpracování velkých ploch, nebo pokud přídavný materiál není dostupný ve formě příslušného drátu. Jednostupňová a dvoustupňová depozice jsou zobrazeny na obr. 25 [24]. Při tavení povrchu dochází k promíšení základního a přídavného materiálu. Po následném ochlazení pak získáme povrchovou vrstvu s odlišným chemickým složením než na počátku. Množství možných materiálových kombinací je poměrně velké a je tedy možno vhodně přizpůsobit povrchové vlastnosti součásti pro daný účel. [8] [16] [24]



Obr. 25 a) Jednostupňová depozice s použitím přídavného materiálu ve formě drátu,
b) dvoustupňová depozice s předem nanesenou vrstvou přídavného materiálu [24]

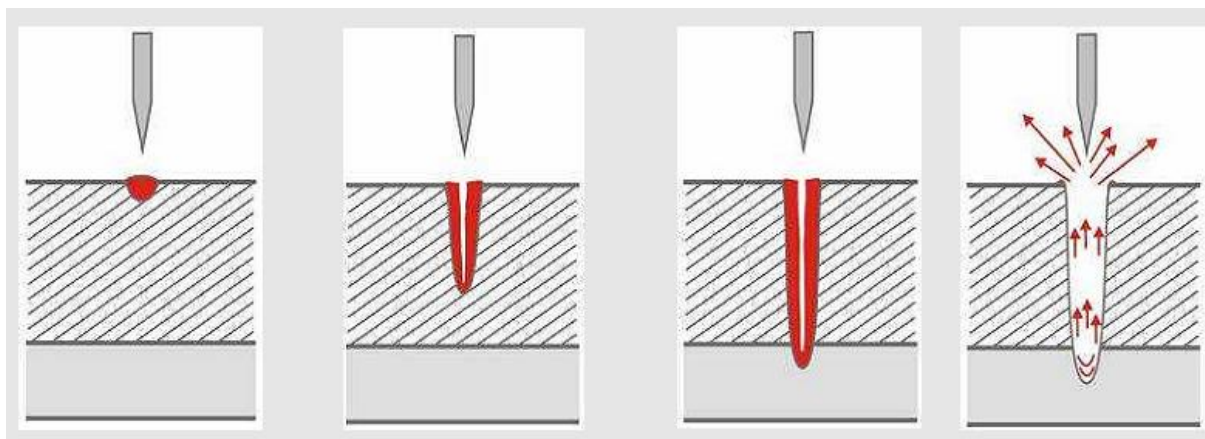
Při dispergování vnášíme do taveniny původně houževnatého materiálu drobná tvrdá zrna a po přetavení získáme vysoce tvrdý a otěruvzdorný povrch v kombinaci s houževnatým

jádrem. Přidavným materiálem při dispergování bývají většinou tvrdé částice karbidů. V případě nanášení je výsledkem procesu povrchová vrstva tvořená téměř výhradně přidavným materiálem. K promíchání základního a přidavného materiálu v kapalně fázi dochází na jejich rozhraní při natavení. Hloubka nataveného pásma je však poměrně malá a pohybuje se v rozmezí od 0,05 do 0,25 mm. Přidavný materiál může být nanášen buď ve formě drátu, nebo prášku. [16]

3.8 Vrtání

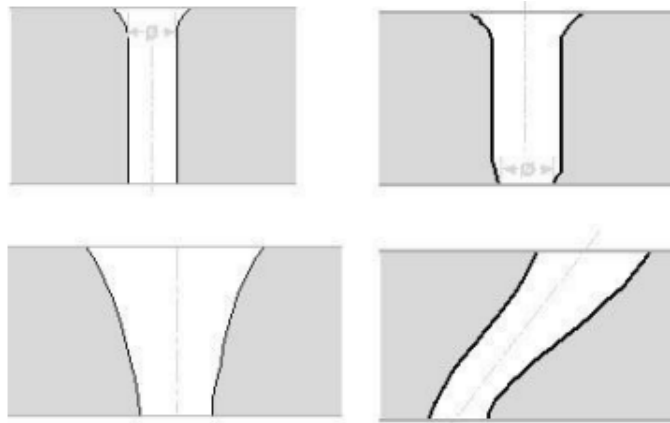
Vrtání je jednou z možností obrábění elektronovým svazkem. Jedná se o ekonomicky výhodnou technologii pro potřebu výroby mnoha malých děr do tlustého a houževnatého materiálu. Technologie je vhodná pro všechny kovové materiály. Jednou z jejích největších předností je možnost vyvrtat až 3000 děr za 1 sekundu. Produktivita je tedy značně vysoká. Další výhodou je vysoká reprodukovatelnost tvaru děr od válcových po kuželové, včetně děr se šikmou osou vůči povrchu, pro poměr mezi hloubkou díry a jejím průměrem do 25:1. Průměr díry může být v rozmezí 0,08 až 2 mm. Ve valné většině případů vytváříme vrtáním průchozí díry, avšak je možno vyvrtat i slepé otvory či drážky. Velikost tepelně ovlivněné oblasti lze zmenšit pomocí pulzního režimu provozu, kdy je mezi jednotlivými pulzy teplo odváděno do objemu materiálu. Jednou z podmínek pro tuto technologii je nutná rotační symetrie daného dílu. Dále je také zapotřebí umístit pod obráběnou plochu podpurný materiál. Vrtání elektronovým svazkem by mělo být zvoleno v případě, že je požadováno vytvoření více než 3000 děr na jedno upnutí. [16] [20] [24]

Při vrtání děr elektronovým paprskem nejprve dochází k penetraci elektronů do materiálu. Poté vzniká tavicí kanál, který postupně roste do hloubky materiálu a vytvoří se klíčová dírka. Když paprsek pronikne skrz materiál, dopadne na podklad ze speciálního druhu pryže. Podkladový materiál se odpaří a tlakem par explozivně vyvrhne roztavený kov ze vzniklého otvoru. Postup vrtání děr je na obr. 26 [20]. [16] [24]



Obr. 26 Postup vrtání děr elektronovým svazkem [20]

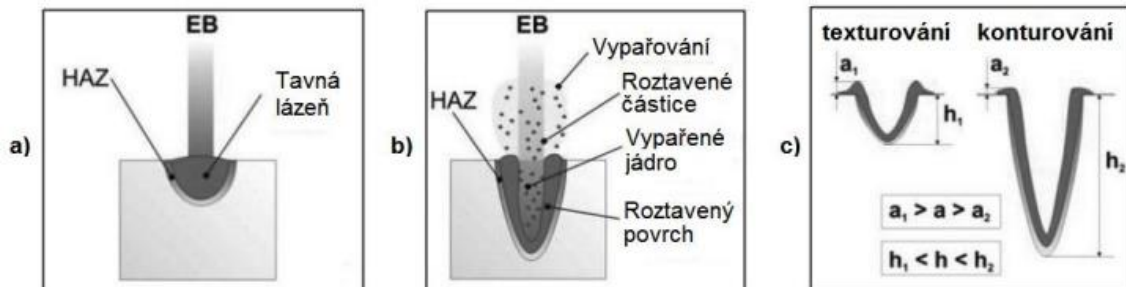
Zajímavou metodou vrtání děr je tzv. vrtání za letu (drill on fly). Při této metodě se obráběná součást pohybuje a elektronový svazek přesně kopíruje její pohyb. Během celého jednoho pulzu dopadá pořád na stejné místo, čímž vytváří kruhový otvor. Naopak při proměnlivém místě dopadu vzniká otvor nekruhového tvaru. Pomocí přesného navádění elektronového svazku tedy můžeme vytvořit tvarově složitější otvory jako např. elipsy nebo křížky. Otvory různých profilů jsou vyobrazeny na obr. 27 [20]. [8] [16] [24]



Obr. 27 Otvory různých profilů [20]

3.9 Gravírování

Gravírování (viz obr. 28 [26]) patří mezi způsoby obrábění elektronovým svazkem. Při tomto procesu je natevna úzká plocha na povrchu materiálu a po dalším zvyšování teploty se část materiálu zcela vypaří a část vystřikuje na povrch. Výsledkem je tvorba textury na povrchu. Touto technologií můžeme vytvářet prohlubně či výstupky. Úpravu povrchu gravírováním využívá metoda Surfi-SculptTM od společnosti TWI. Podstatou této metody je přesun roztaveného materiálu pohybujícím se elektronovým svazkem. Pohyb svazku se opakuje, čímž jsou na povrchu materiálu vytvářeny výstupky a prohlubně. Složitější struktury jako např. hroty můžeme získat přesným řízením dráhy svazku. Gravírování slouží například ke zvětšení stykové plochy tělesa nebo ke zlepšení jeho tribologických vlastností. [8] [16] [26]



Obr. 28 Gravírování, a) natevnutí úzké plochy na povrchu, b) vznik plynové kapiláry, c) můžeme vytvářet prohlubně či výstupky [26]

3.10 Další aplikace

Technologie 3D tisku elektronovým svazkem umožňuje vyrobit trojrozměrnou kovovou součást na základě virtuálního modelu v počítači. V nádobě s pohyblivým dnem je umístěn kovový prášek, ze kterého vytváříme součást, vrstvu po vrstvě. Prášek je taven elektronovým svazkem, který přetaví oblast odpovídající řezu daného objektu v příslušné rovině. Po vytvoření první vrstvy je dno nádoby sníženo a dochází k roztavení dalšího prášku a jeho propojení s předchozí vrstvou. Vrstvy vytváříme tak dlouho, dokud není kompletně hotový celý objem součásti. Pro tuto technologii se jako materiály používají zejména titan a jeho slitiny, dále pak slitiny kobaltu, chromu a molybdenu. Uplatnění nachází především v lékařství. [4]

4 Experimentální část

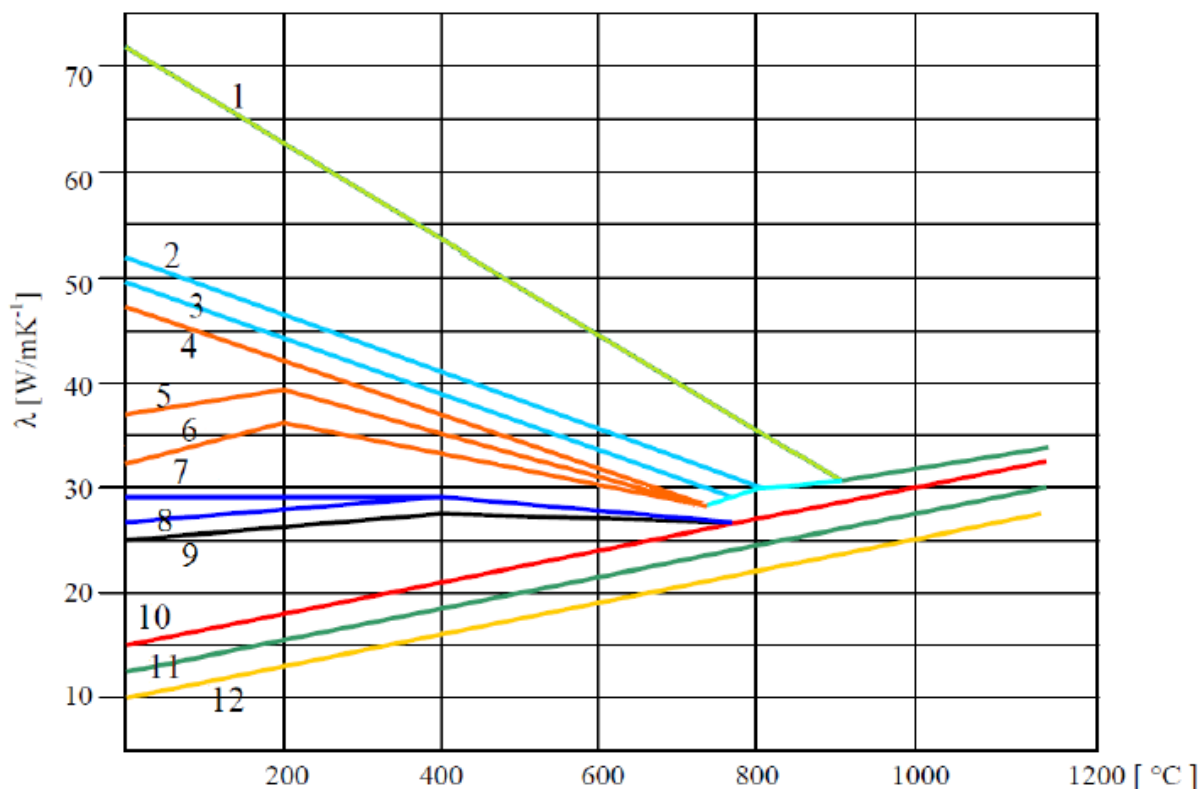
4.1 Experimentální materiály

Pro povrchové kalení elektronovým svazkem jsou vhodné pouze určité materiály, přičemž rozhodujícím kritériem jsou jejich vlastnosti. V této kapitole se tedy zaměříme na takové materiálové vlastnosti, které jsou důležité z hlediska možnosti tepelného zpracování svazkem elektronů. Velmi významnou roli zde hraje především obsah uhlíku. V případě nelegovaných ocelí musí být jeho obsah minimálně 0,2%, aby bylo kalení oceli možné. Ocel pak můžeme považovat za dobře kalitelnou, pokud má obsah uhlíku nad 0,35%. Pokud uvažujeme legované oceli, bývá minimální potřebná hodnota množství uhlíku pro kalení nižší a to v důsledku ovlivnění jeho pohyblivosti. V takovém případě je pak legovaná ocel dobře kalitelná i při nižším obsahu než 0,35%. K dalším důležitým charakteristikám patří tepelná vodivost materiálu. Je to zejména z důvodu rychlého ochlazování materiálu, které je zprostředkováno odvodem tepla do zbývajícího objemu kalené součásti. Materiál tedy musí mít dobrou tepelnou vodivost, což závisí na jeho chemickém složení. V souvislosti s tím je třeba brát na zřetel množství legujících prvků, jelikož s jejich zvyšujícím se obsahem dochází k poklesu tepelné vodivosti. Velký vliv má také teplota. Pro čisté kovy nebo slitiny s nízkým obsahem legujících prvků platí, že s rostoucí teplotou tepelná vodivost klesá. U ocelí vysoko-legovaných však platí opak a tepelná vodivost se zvyšující se teplotou roste. Tab. 3 [27] zobrazuje tepelné vodivosti pro různé materiály s rozdílnými obsahy legujících prvků. [16]

Tab. 3 Tepelná vodivost pro různé materiály za pokojové teploty (20°C) [27]

Číslo	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	W [%]	V [%]	λ [W.m ⁻¹ K ⁻¹]	Materiál
1	-	-	-	-	-	-	-	-	72	Čisté železo
2	0,23	0,11	0,63	-	-	-	-	-	52,5	Uhlíkové oceli
3	0,43	0,20	0,69	-	-	-	-	-	50	Uhlíkové oceli
4	0,31	0,20	0,69	1,09	-	-	-	-	48	Nízkolegované oceli
5	0,32	0,18	0,55	0,78	3,50	-	-	-	37	Nízkolegované oceli
6	0,34	0,27	0,55	0,78	3,50	0,39	-	-	33	Nízkolegované oceli
7	0,13	0,17	0,25	13	0,14	-	-	-	27,5	Korozivzdorné oceli
8	1,27	0,18	0,28	13,7	0,2	-	0,25	-	25,5	Korozivzdorné oceli
9	0,71	-	0,25	4,3	-	-	18,4	1,1	24	Rychlořezné oceli
10	0,08	0,68	0,37	19,1	8,1	-	0,6	-	16	Korozivzdorné oceli
11	1,22	0,22	13	-	-	-	-	-	13	Hadfieldova ocel
12	0,46	1,3	1,2	15,2	26,9	-	2,8	-	10	Žárovzdorné oceli

Závislost tepelné vodivosti na teplotě pro materiály uvedené v tab. 3 [27] je graficky vyobrazena na obr. 29 [27].



Obr. 29 Závislost tepelné vodivosti materiálů na teplotě [27]

K důležitým parametrům patří také teplota kalení a prokalitelnost daného materiálu. Teplota kalení, tedy teplota, na kterou je potřeba kalený materiál ohřát se v případě rychlého ohřevu elektronovým svazkem zvyšuje. Prokalitelnost, která udává hloubku, do níž při daných technologických podmínkách sahá zakalená vrstva, je závislá na chemickém složení materiálu. [16]

V rámci nejnovějšího experimentu popisovaného v této práci byla použita nástrojová středně legovaná Cr-Mo-V ocel 19 552. V případě předchozích experimentů s tepelným zpracováním povrchů elektronovým svazkem, které zde budou uvedeny, byla použita jednak již zmíněná nástrojová ocel 19 552, dále pak uhlíková ocel 12 050, konstrukční nízkolegovaná ocel 15 142 ve stavu po zušlechtnění a nástrojová ocel 19 436 s vysokým podílem chromu. Předchozí experimenty budou popsány v následujících kapitolách a poté bude následovat aktuální experiment, na který je zaměřena tato práce.

4.2 Zařízení použité pro experimenty

Všechny experimenty, které zde budou popsány, byly provedeny na zařízení pro svařování a tepelné zpracování pomocí elektronového paprsku od německé firmy Pro-beam. Zařízení bylo zakoupeno v rámci projektu NETME centre a zprovozněno na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Toto zařízení má označení PROBEAM K26. Stroj zahrnuje polohovací systém, který je řízen numericky a je schopen operovat ve dvou až čtyřech osách. Jedná se o X-Y stůl, na který je možno umístit polohovací zařízení A-B, které umožňuje náklon v rozsahu 0° - 90°. Dále nám zařízení umožňuje rotaci okolo osy, která je kolmá na osu náklonu, přičemž rychlost rotace může dosáhnout až 100 ot/min. [16] [28]

Tab. 4 Technická specifikace zařízení použitého při experimentech [28]

Základní technická specifikace	
Objem komory	2,6 m ³
Rozměry pracovního stolu	500 x 800 mm
Maximální výška	700 mm
Pohyby v osách X a Y	500 x 800 mm
Maximální výkon svazku	15 kW
Urychlovací napětí	80 až 150 kV
Vakuum	10 ⁻⁴ mBar
Doba provozního vyčerpání komory	do 15 min

Tab. 4 [28] uvádí specifikaci zařízení. Jednou z výhod zařízení je také možnost dodávat drát do místa působení elektronového svazku. Do vakuové komory můžeme přivádět inertní či procesní plyny nebo také chladicí kapalinu. Pro ovládání stroje je využíván řídicí systém Sinumerik od firmy Siemens AG. Na tomto zařízení můžeme provádět operace jak ve vertikálním, tak v horizontálním směru. S ohledem na možné aplikace elektronového svazku uvedené v předchozích kapitolách, můžeme říci, že zařízení PROBEAM K26 umožňuje všechny zmíněné operace s jedinou výjimkou a tou je vrtání, které na tomto stroji provádět nelze. Zařízení je zobrazeno na obr. 30 [16] a detailně na obr. 31 [16]. [16]



Obr. 30 Zařízení Probeam K26 pro operace využívající elektronového svazku [16]



Obr. 31 Vakuový systém, komora a ovládací pult [16]

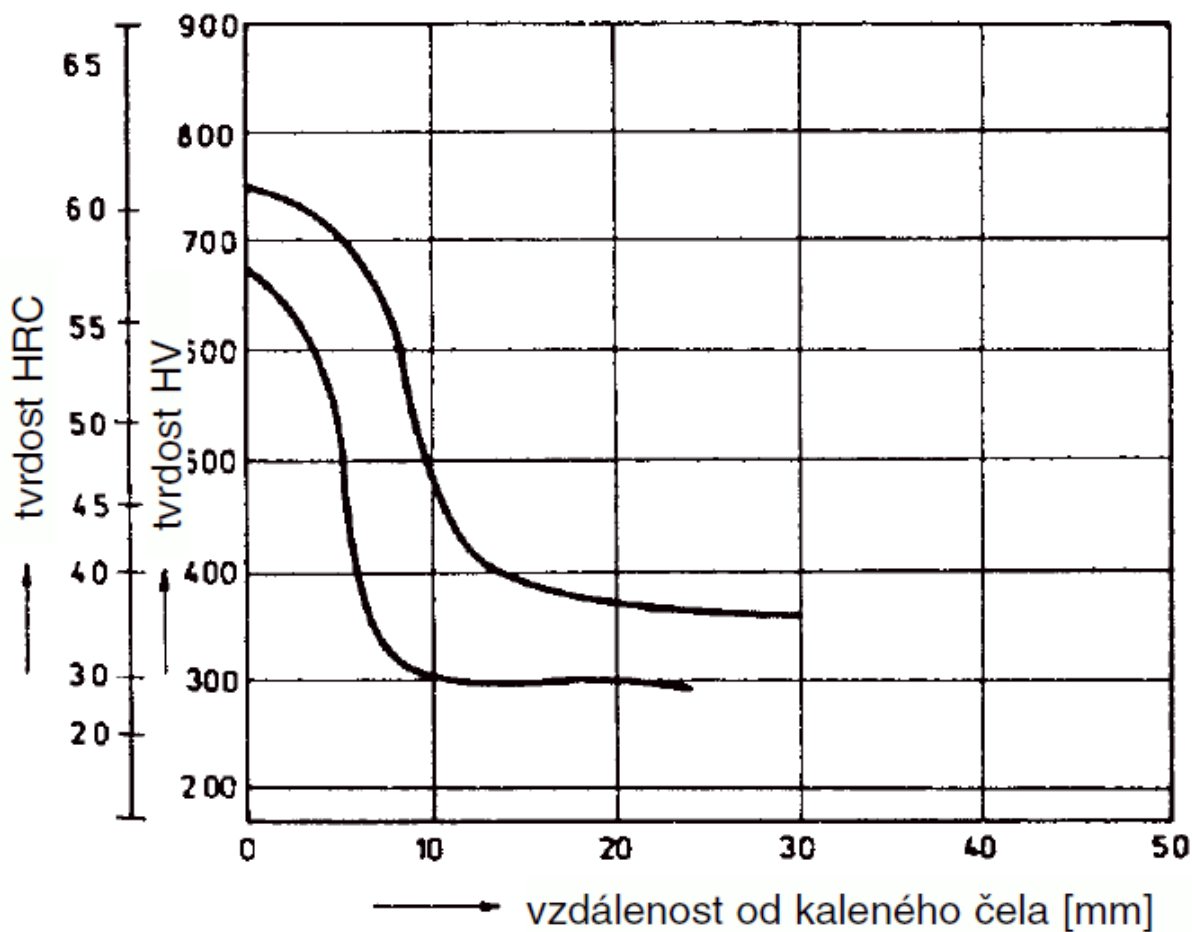
4.3 Předchozí experimenty s rozdílnými oceli

Jak již bylo řečeno, na zařízení PROBEAM K26 byly již v minulosti provedeny experimenty s tepelným zpracováním povrchů ocelí. Ve všech případech bylo cílem vytvořit co nejhlubší zakalenou vrstvu u rozdílných druhů materiálu. Zvláštní pozornost byla věnována především parametrům, které byly na zařízení při experimentech nastaveny a na jejich vliv na tvar, velikost a vlastnosti zakalené vrstvy. Tím, že tyto parametry měníme, můžeme ovlivňovat celý proces a tím i jeho výsledky. Konečným cílem všech experimentů tedy bylo prozkoumat vliv nastavených parametrů na zakalenou plochu a pokusit se stanovit pokud možno takové parametry, které by nám umožnily získat co nejkvalitněji zakalenou vrstvu. V první řadě zde uvedeme trojici experimentů provedených na ocelích, které svým složením odpovídají ocelím 12 050, 15 142 a 19 436. [16]

4.3.1 Uhlíková ocel

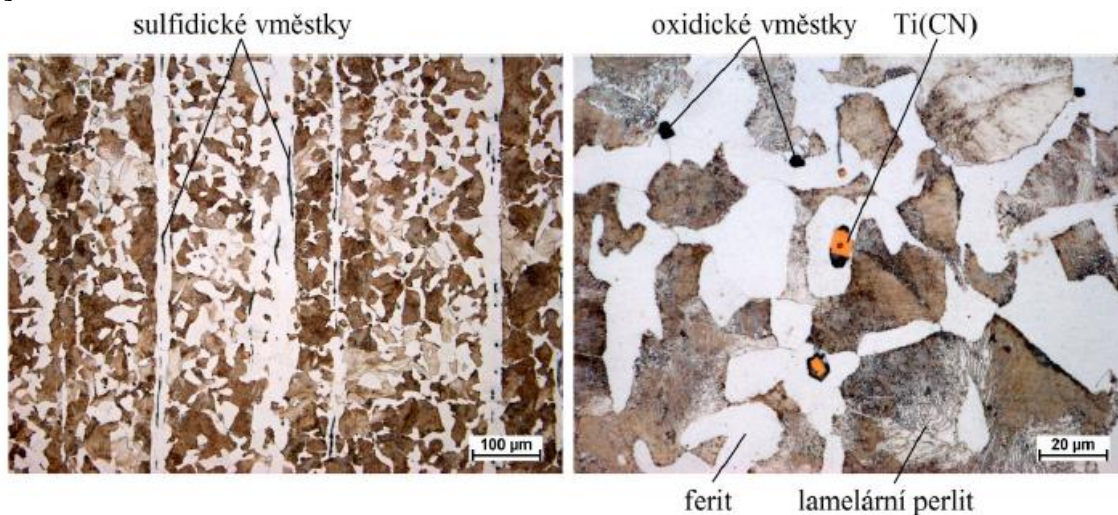
V případě prvního uvedeného experimentu byla zvolena nelegovaná uhlíková ocel odpovídající oceli 12 050. Jedná se o ocel určenou k zušlechťování a povrchovému kalení. Tato ocel se obvykle používá pro hřídele těžních strojů, turbokompresorů, karuselů, větší ozubená kola, ojnice, pístnice, vřetena, západky, spojovací součásti, kolíky, vrtací tyče, frézovací trny atd. Tepelná vodivost oceli je $\lambda = 49 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Ocel je vhodná pro kalení při kalicích teplotách v rozmezí $830 - 860^\circ\text{C}$ s ochlazováním v oleji a při teplotách v rozsahu $800 - 830^\circ\text{C}$ s ochlazováním ve vodě. Popouštění se provádí při teplotách $530 - 670^\circ\text{C}$ a ochlazování probíhá na vzduchu. Teploty přeměn jsou pak následující. Teplota $A_{C1} \sim 725^\circ\text{C}$, teplota $A_{C3} \sim 785^\circ\text{C}$ a teplota $M_S \sim 310^\circ\text{C}$. Chemické složení oceli bylo analyzováno pomocí emisní optické spektrometrie s doutnavým výbojem (GD-OES). Naměřené chemické složení odpovídající složení oceli 12 050 je uvedeno v tab. 5 [16]. [16] [30]

Před provedením experimentu byla změřena tvrdost oceli v přírodním stavu a její hodnota se pohybovala okolo 230 HV. Dle materiálového listu dosahuje povrchová tvrdost po kalení hodnoty minimálně 560 HV. Na obr. 33 [30] je zobrazen pás prokalitelnosti pro ocel 12 050 dle materiálových listů. [16]



Obr. 33 Pás prokalitelnosti pro ocel 12 050 dle materiálových listů ČSN 41 2051 [30]

Před provedením experimentu na oceli 1 bylo připraveno několik vzorků a následně byl vyhotoven metalografický výbrus. Poté proběhla metalografická analýza těchto vzorků. Z hlediska pozorované struktury bylo učiněno následující hodnocení doplněné obr. 34 [16]. [16]



Obr. 34 Pozorovaná výchozí struktura oceli 1 [16]

Struktura materiálu ve výchozím stavu byla tvořena feritem a lamelárním perlitem, přičemž u feritické fáze bylo pozorováno výrazné řádkovité uspořádání. Dále bylo pozorováno, že se zde vyskytovala nerovnoměrně distribuovaná zrna s odlišnou velikostí. Z toho bylo možno usuzovat, že nebylo provedeno normalizační žhání oceli. V oceli byly pozorovány karbonitridy titanu Ti(CN), oxidické vměstky a také vysoký obsah sulfidických vměstků, které byly protaženy ve směru tváření. [16]

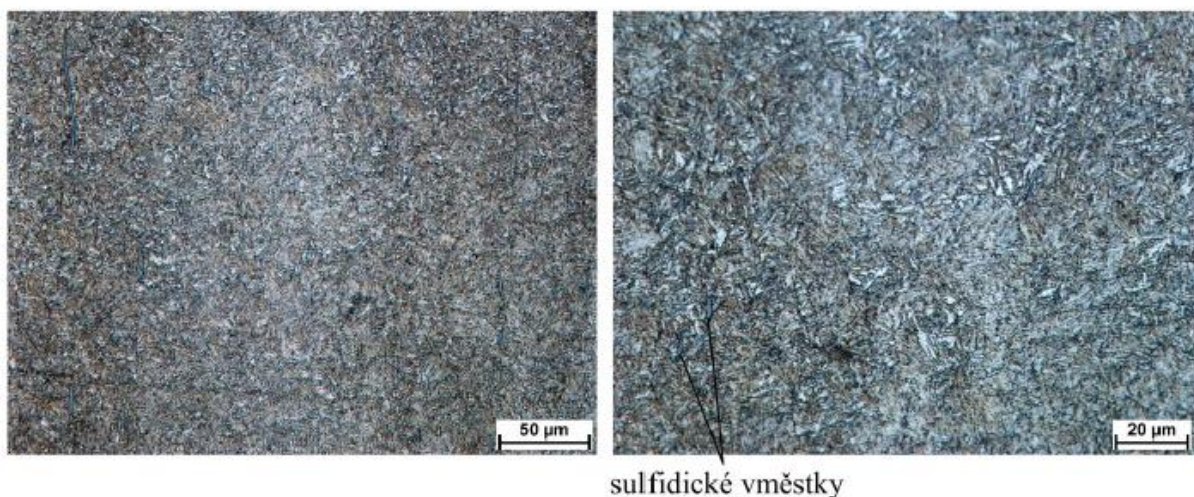
4.3.2 Konstrukční nízkolegovaná ocel

Jako druhý experimentální materiál byla vybrána konstrukční nízkolegovaná ocel (ocel 2), která svým chemickým složením odpovídá oceli 15 142. Na rozdíl od prvního případu byl tento materiál již dříve zušlechťován a to kalením do vody z teploty 860°C a popuštěním při teplotě 600°C. Ocel 15 142 je dle materiálových listů ocel Cr-Mo určená k zušlechťování a povrchovému kalení. Ocel se užívá na velmi namáhané strojní součásti a součásti silničních motorových vozidel, kde je požadována vyšší houževnatost při vysoké pevnosti. Hodnota tepelné vodivosti oceli je $\lambda = 42 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Ocel je kalena při teplotách v rozsahu 840 – 880°C s ochlazováním v oleji. Popouštění pak probíhá za teplot v rozmezí 540 – 680°C s ochlazováním na vzduchu. Pro austenitizaci jsou uváděny teploty $A_{C1} \sim 750^\circ\text{C}$ a $A_{C3} \sim 780^\circ\text{C}$ a pro martenzitickou přeměnu se uvádí teplota $M_s \sim 330^\circ\text{C}$. U oceli byla opět uskutečněna analýza chemického složení, podobně jako v prvním případě pomocí GD-OES. Naměřené chemické složení, které odpovídá chemickému složení oceli 15 142 je uvedeno v tab. 6 [16]. [16] [30]

Tab. 6 Chemické složení experimentální oceli 2 odpovídající oceli 15 142 [16]

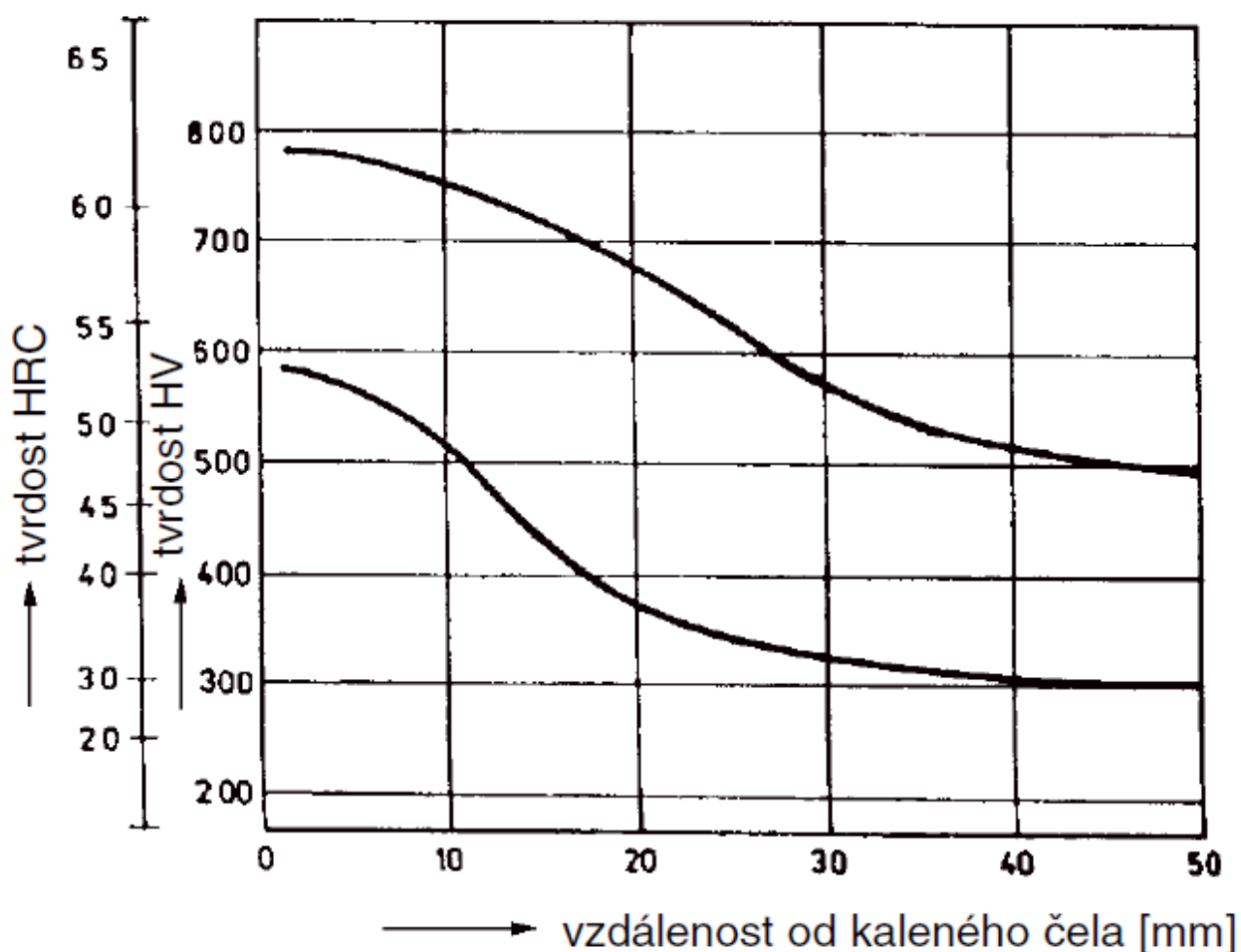
Prvek	Naměřený obsah [%]	Předepsaný obsah [%]
C	0,44	0,38-0,45
Mn	0,74	0,50-0,80
Si	0,19	0,17-0,37
Cr	1,03	0,90-1,20
Ni	0,03	max. 0,50
Mo	0,16	0,15-0,30
P	0,019	max. 0,035
S	0,026	max. 0,035

Před provedením experimentu byl nejprve opět zhotoven metalografický výbrus na oceli ve výchozím stavu. Po provedení metalografické analýzy byla pozorovaná struktura vyhodnocena a je zobrazena na obr. 35 [16]. [16]



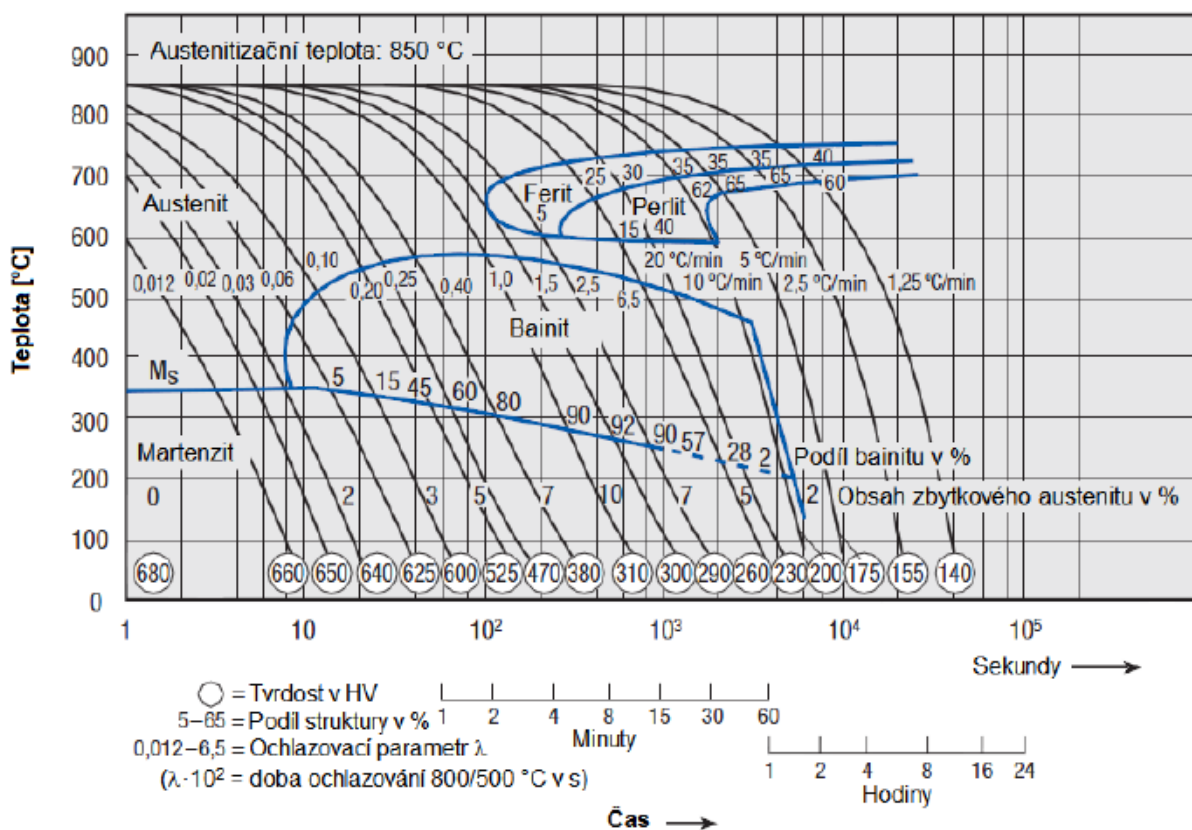
Obr. 35 Pozorovaná výchozí struktura oceli 2 [16]

Pozorovaná struktura oceli 2 byla tvořena vysokoteplotně popuštěným martenzitem, který bývá označován jako sorbit. Tato struktura tedy odpovídala předpokládanému stavu po zušlechtní. Ve struktuře byly pozorovány sulfidické vměšky s řádkovým uspořádáním. Obdobně jako v prvním případě byla u vzorku pomocí tvrdoměru měřena povrchová tvrdost a její hodnota se pohybovala okolo 280 HV. Podle materiálových listů bychom konvenčním způsobem kalení byli schopni dosáhnout hodnoty tvrdosti povrchu přibližně 600 HV. [16]



Obr. 36 Pás prokalitelnosti pro ocel 15 142 dle materiálových listů ČSN 41 5142 [30]

Ve srovnání s ocelí 1 má ocel 2 lepší prokalitelnost (viz obr. 36 [30]). Konvenčním kalením je u oceli 2 možno dosáhnout vyšší hodnoty povrchové tvrdosti. Ocel 1 má však zase vyšší hodnotu tepelné vodivosti. Oproti oceli 1, u které bylo zapotřebí vysokých ochlazovacích rychlostí pro správné zakalení povrchové vrstvy, jsou u oceli 2 potřebné nižší rychlosti ochlazování, což ukazuje ARA diagram pro ocel 15 142 na obr. 37 [31]. [16]



Obr. 37 ARA diagram oceli 15 142 [31]

4.3.3 Nástrojová ocel

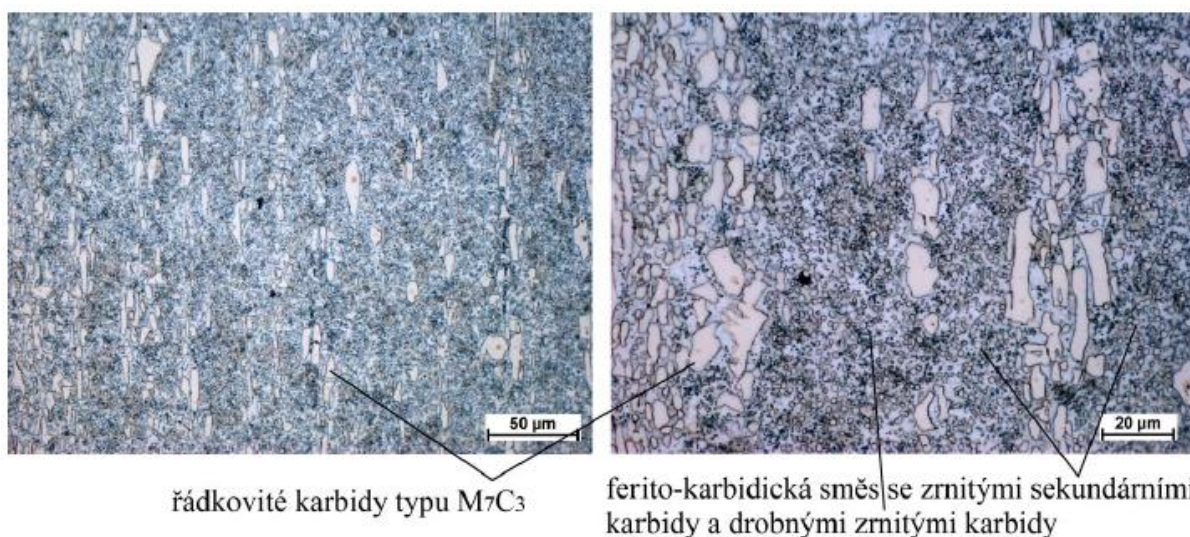
Třetím experimentálním materiálem byla nástrojová ocel (ocel 3). Tato ocel svým chemickým složením odpovídá oceli 19 436. Jedná se o nástrojovou, vysokolegovanou, chromovou ocel pro práci za studena. Ocel má široký rozsah použití. Používá se pro různé řezné nástroje, nástroje pro stříhání za studena, nástroje pro tváření za studena, dále se pak používá na formy a také na nástroje pro drcení a mletí. Z hlediska fyzikálních vlastností má ocel 19 436 tepelnou vodivost $\lambda = 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. V rámci tepelného zpracování existují tři možnosti kalení. Jednak je možno ochlazovat z kalicí teploty 930-960 °C v oleji nebo termální lázni o teplotě cca 450 °C, dále můžeme ochlazovat dmýchaným vzduchem z teploty 950-980 °C anebo je možno ochlazovat v oleji či lázni z vyšší teploty 1040-1080 °C. Obvykle se pak provádí nízkoteplotní popouštění za teplot v rozmezí 150-300 °C. Teploty přeměn jsou $A_{C1} \sim 800\text{-}830\text{ °C}$ a $M_s \sim 200\text{ °C}$. Po zakalení konvenčním způsobem by dle materiálových listů měla tvrdost povrchu dosahovat hodnoty okolo 690 HV. U této oceli tedy můžeme dosáhnout větší povrchové tvrdosti než u předchozích dvou ocelí. Ocel 3 má nejvyšší prokalitelnost ze všech tří. Rovněž platí, že pro zakalení povrchové vrstvy je zapotřebí nižších ochlazovacích rychlostí než v předchozích dvou případech. To je možno především díky vysokému obsahu chromu v oceli 3. Hodnota tepelné vodivosti je však u této oceli nejnižší ze všech tří případů a to zejména kvůli vysokému obsahu legujících prvků. [16] [30]

Podobně jako v předchozích dvou případech byla u oceli provedena analýza chemického složení pomocí GD-OES. Jak již bylo řečeno, chemické složení odpovídá oceli 19 436 a je uvedeno v tab. 7 [16]. [16]

Tab. 7 Chemické složení experimentální oceli 3 odpovídající oceli 19 436 [16]

Prvek	Naměřený obsah [%]	Předepsaný obsah [%]
C	2,05	1,80-2,05
Mn	0,54	0,20-0,45
Si	0,86	0,20-0,45
P	0,021	max. 0,030
S	0,015	max. 0,035
Cr	10,93	11,0-12,5
Ni	0,18	max. 0,50

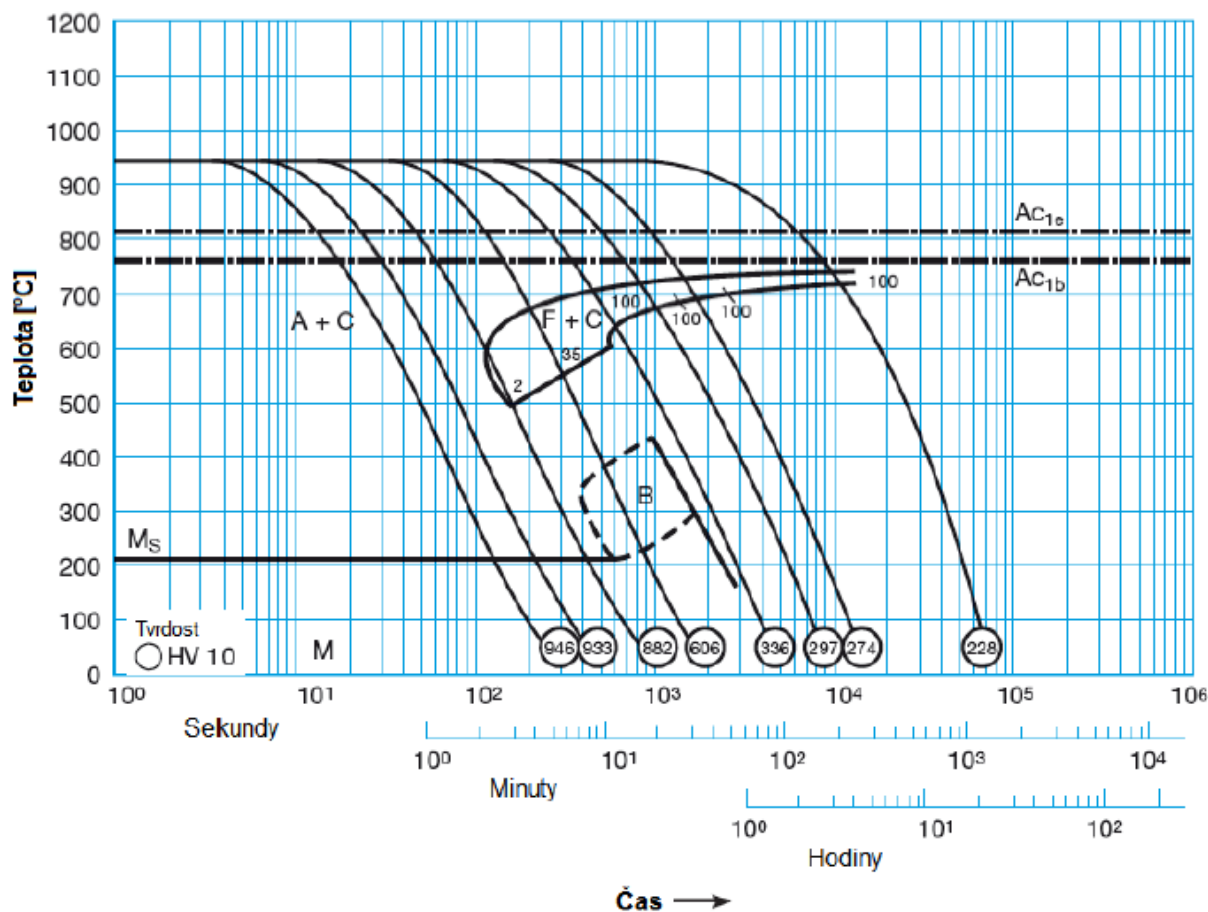
Na oceli ve výchozím stavu byl podobně jako v předchozích dvou případech zhotoven výbrus a proběhla metalografická analýza. Struktura oceli je zobrazena na obr. 38 [16]. [16]



Obr. 38 Pozorovaná výchozí struktura oceli 3 [16]

Na obr. 38 [16] je možno vidět směs legovaného feritu a karbidů. Můžeme pozorovat řádkovité karbidy M_7C_3 , které jsou velké a také poměrně tvrdé. Ve struktuře se vyskytovaly zrnité sekundární karbidy a také drobné zrnité karbidy. Hodnota tvrdosti oceli ve výchozím stavu byla naměřena 300 HV. Lze předpokládat, že u oceli 3 bylo provedeno žihání naměkko.

Jak již bylo řečeno ocel 3, která svým složením odpovídá oceli 19 436, umožňuje díky vysokému obsahu chromu průběh martenzitické přeměny za nízkých ochlazovacích rychlostí. Na obr. 39 [32] je uveden ARA diagram pro tuto ocel. [16]



Obr. 39 ARA diagram oceli 19 436 [32]

4.3.4 Nastavené parametry

Jak již bylo řečeno dříve, na zařízení elektronového paprsku můžeme nastavovat různé parametry, které mají vliv na tvar, velikost a vlastnosti zakalené vrstvy. Existuje několik parametrů, které můžeme měnit a tím ovlivnit kalicí proces a vlastnosti výsledného povrchu součásti po zakalení. Operátor proto musí na zařízení nastavit takové parametry, které povedou k vytvoření zakalené povrchové vrstvy odpovídající požadavkům. Jedním z cílů při experimentálním kalení všech tří ocelí elektronovým paprskem bylo také určení toho, které parametry mají významnější vliv na proces a výslednou zakalenou vrstvu a které parametry mají vliv zanedbatelný. Mezi důležité parametry patří například urychlovací napětí značené HV a uváděné v kV, proud paprsku s označením SQ a jednotkou mA nebo posuv stolu F_s v mm/s. Předpokládá se, že vliv na výsledek procesu mohou mít také míra defokuse neboli offset a skenovací frekvence značená FRQ. [16]

Po provedení experimentu se zakalením povrchových ploch všech tří uvedených ocelí, bylo důkladně zkoumáno, které parametry mohly nejvíce ovlivnit vlastnosti výsledných zakalených vrstev. Nastavené parametry, u nichž se předpokládalo, že měly významný vliv, byly pečlivě zaznamenány a vycházelo se z nich při následujících experimentech. U těchto experimentů byly parametry různě měněny s cílem nalézt nejvhodnější hodnoty, při kterých bychom dosáhli požadovaných výsledků. Tab. 8 [16] uvádí přehled nastavovaných parametrů. [16]

Tab. 8 Přehled nastavovaných parametrů [16]

Název veličiny	Značení	Popis veličiny
Urychlovací napětí	HV	Urychlovací napětí zařízení
Proud paprsku	SQ	Proud elektronového paprsku
Posuv stolu	Fs	Hodnota posuvu pracovního stolu
Kalibrace	KW	Propojuje posuv součásti s deflekcí el. paprsku
Fokusační proud	SL	Proud, který fokusuje na povrch kalené součásti
Defokusace	Offset	Posun ohniska el. paprsku nad nebo pod povrch
Kalicí obrazec	HF	Skenuje el. paprsek rovnoběžně se směrem posuvu
Rozměry HF	SWX/SWY	Rozměry kalicího obrazce
Frekvence HF	PVZH/PVZL	Skenovací frekvence kalicího obrazce
Příčný obrazec	Fig	Skenuje el. paprsek kolmo na směr posuvu
Rozměry Fig	SWX1/SWY1	Rozměry příčného obrazce
Frekvence Fig	FRQ	Skenovací frekvence příčného obrazce
Slopein	Slopein	Náběh parametrů na procesní hodnoty
Slopeout	Slopeout	Pokles parametrů z procesních hodnot

Z parametrů uvedených v tab. 8 [16] jsou tedy pouze některé parametry takové, které ovlivňují vlastnosti zakalené vrstvy. [16]

4.3.5 Průběh experimentu

Před provedením experimentu bylo potřeba nejprve vytvořit řídicí program v systému Sinumerik. Do tohoto řídicího programu byly zadány odhadované parametry. Díky řídicímu programu je možné vytvoření přímých kalicích pásů s přesně definovanou šířkou a délkou. Tyto pásy mohou být rovnoběžné buď s osou X nebo s osou Y. Při odhadování parametrů bylo u některých veličin možno nastavit hodnoty podle doporučení od výrobce. Při těchto experimentech šlo nejprve o to, stanovit vhodnou hodnotu proudu elektronového paprsku s označením SQ. Pokud by byla hodnota proudu příliš velká, docházelo by k natavování povrchu, čemuž bylo nutné předejít. Cílem tedy bylo určit maximální hodnotu proudu paprsku, při které by ještě nedocházelo k natavování. Hodnota SQ byla určována s přesností řádově v desetinách mA. Během experimentů bylo možné natavení povrchové plochy kontrolováno vizuálně. Tímto způsobem byla nastavena nejvyšší možná hodnota proudu paprsku, při které ještě nebylo vizuálně zaznamenáno natavení povrchu materiálu. Po určení vhodné hodnoty SQ následovala optimalizace dalších parametrů a to podobným způsobem. [16]

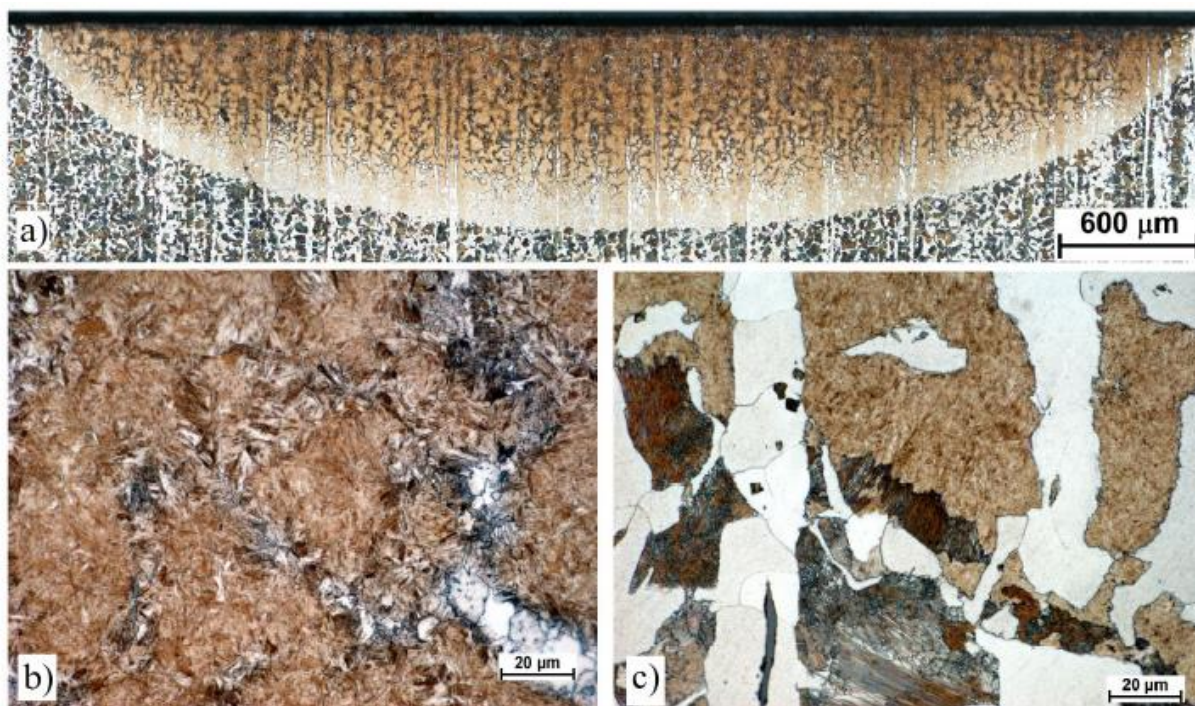
Jeden vybraný parametr byl vždy změněn a celý proces se opakoval, dokud nebyla určena jeho vhodná hodnota. Vzorky byly před kalením připraveny v dílnách. Povrchové plochy určené k tepelnému zpracování byly důkladně obroušeny. V případě uhlíkové oceli byl zhotoven vzorek se čtvercovým průřezem o rozměrech 80x80 mm a tloušťkou 30 mm. Z konstrukční nízkolegované oceli byl připraven vzorek kruhového průřezu o průměru $\varnothing 65$ mm a tloušťce 20 mm. U nástrojové oceli měl vzorek kruhový průřez, přičemž jeho průměr byl $\varnothing 45$ mm a tloušťka byla 15 mm. [16]

Po zakalení povrchových ploch všech tří ocelí byly zhotoveny metalografické výbrusy a poté byla uskutečněna jejich metalografická analýza. V rámci určení tvrdosti povrchové vrstvy po zakalení byl na tvrdoměru naměřen profil tvrdosti. Z naměřeného profilu byla určena tloušťka zakalené vrstvy. V místě, kde hodnota tvrdosti poklesla na tvrdost základního materiálu zvětšenou o 50 HV, byla odečtena hloubka zakalené povrchové vrstvy. [16]

4.3.6 Zhodnocení výsledků

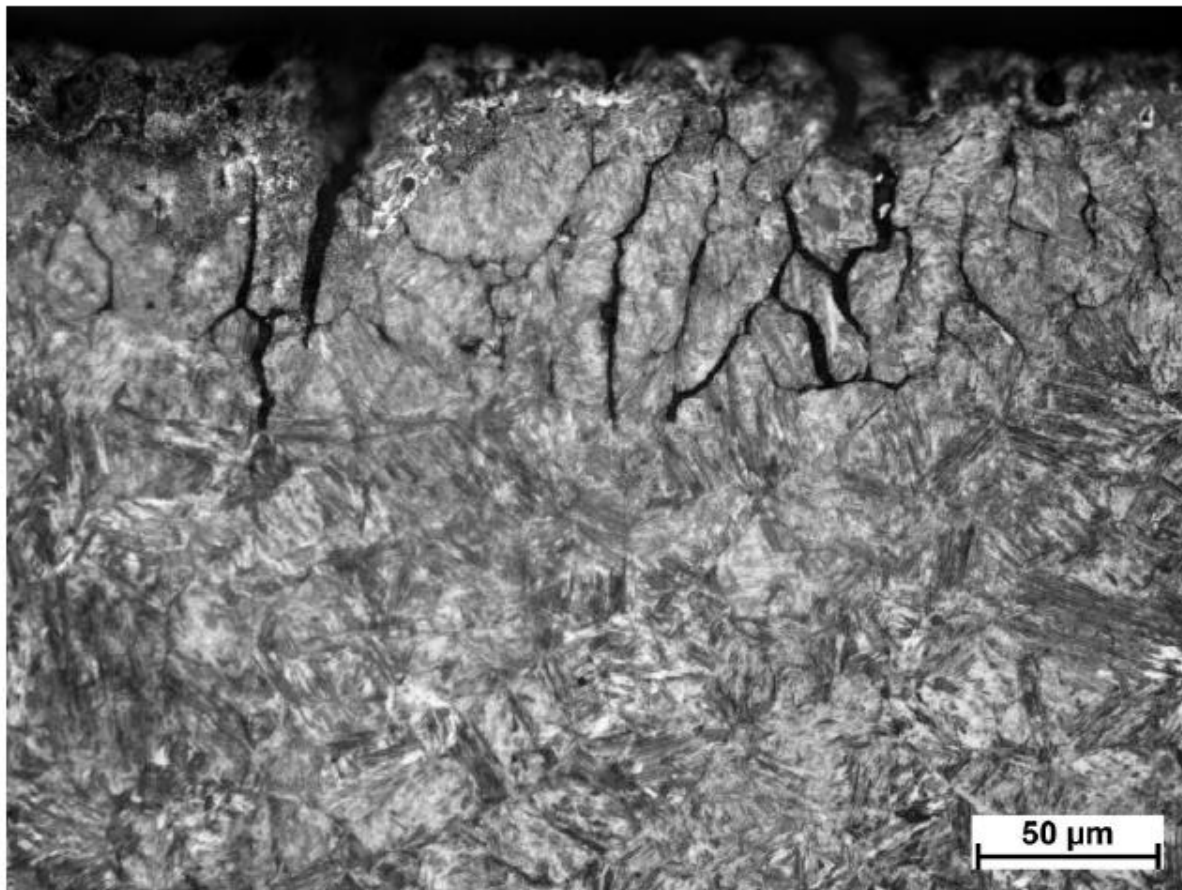
Pro metalografickou analýzu byly zvoleny především takové vzorky, u kterých byly na zařízení zadány optimalizované parametry. Po provedení analýzy a stanovení profilů tvrdosti byl diskutován vliv některých parametrů na vlastnosti zakalených vrstev, které byly u jednotlivých ocelí podobné. [16]

V případě uhlíkové oceli byla výchozí struktura tvořená feritem a lamelárním perlitem přeměněna na martenzitickou strukturu. Snímky z metalografické analýzy jsou zobrazeny na obr. 40 [16]. Martenzitická struktura byla na povrchu hrubší a směrem do jádra materiálu se postupně zjemňovala. Toto bylo s největší pravděpodobností způsobeno tím, že na povrchu byly největší teploty a docházelo zde k částečnému hrubnutí zrna. V oceli byly zaznamenány zbytky po vyřádkování feritu. Oblast obsahující méně uhlíku, která byla snadněji leptatelná, se vyskytovala mezi martenzitickými a feritickými zrny. Tato oblast vznikla s největší pravděpodobností v důsledku rychlého zastavení rozpouštění feritu v průběhu austenitizace. Feritická fáze totiž neobsahuje téměř žádný uhlík a toto zřejmě vedlo ke vzniku ochuzených oblastí. [16]



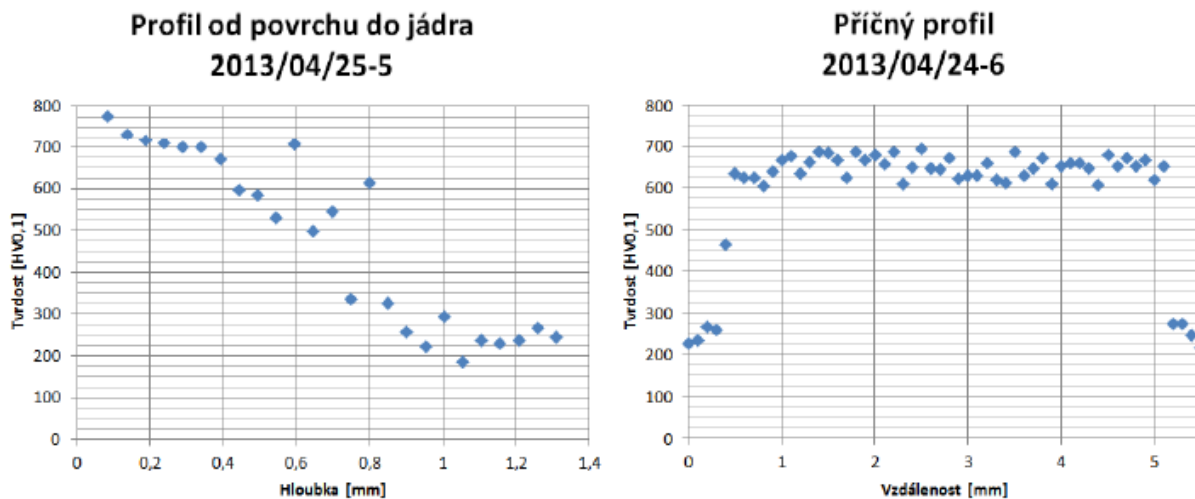
Obr. 40 Snímky zakalené povrchové vrstvy oceli 1 tvořené martenzitickou strukturou [16]

Na rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu lze nalézt stopy svědčící o rychlém přerušení difuze, které bylo zapříčiněno velmi rychlým ochlazením v důsledku odvodu tepla do zbývajícího materiálu. V oblasti zrna byly pozorovány pozůstatky po perlitické struktuře, která tvořila strukturu oceli před zakalením. Analyzovány byly také vzorky, u kterých došlo k lokálnímu natažení povrchu. U těchto vzorků se vyskytovaly trhliny v zakalené vrstvě. Tyto trhliny jsou zobrazeny na obr. 41 [16]. [16]



Obr. 41 Trhliny v zakalené vrstvě [16]

Po provedení metalografické analýzy byly na tvrdoměru naměřeny profily tvrdosti. Jednalo se o profil od povrchu směrem do jádra oceli a také o příčný profil tvrdosti. Oba profily jsou vyobrazeny na obr. 42 [16]. [16]



Obr. 42 Profily tvrdosti povrchové vrstvy oceli 1 po zakalení [16]

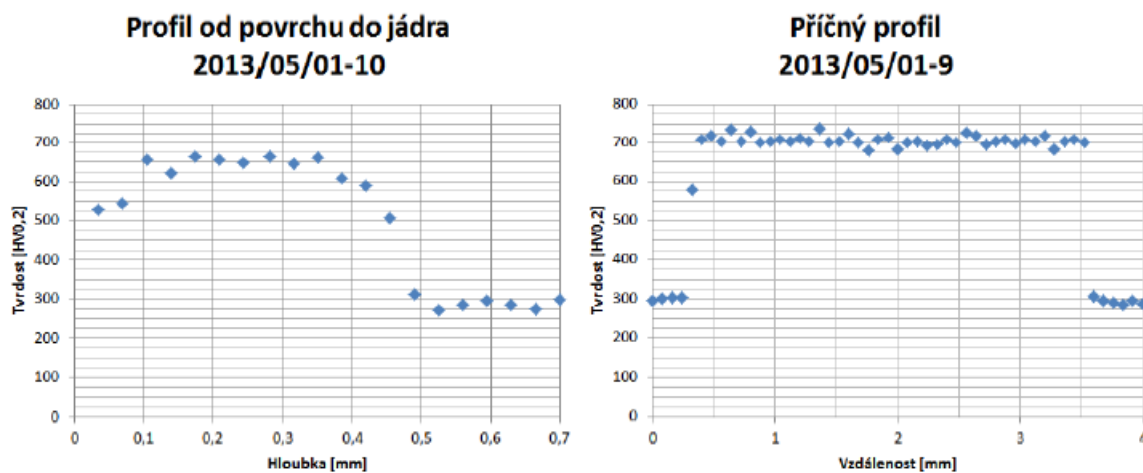
Na povrchu vzorku byla podle očekávání tvrdost nejvyšší. Její maximální hodnota dosahovala 800 HV_{0,1}. Hloubka zakalené vrstvy byla určena 0,85 mm. Pro porovnání je v literatuře uvedeno, že pomocí technologie elektronového svazku by mělo být možno vytvořit zakalenou vrstvu o tloušťce přibližně 1,5 mm. Zakalená povrchová vrstva oceli 1 vykazuje dobrou homogenitu, o čemž svědčí příčný profil tvrdosti. [16]

U konstrukční nízkolegované oceli došlo dle předpokladů po zakalení k přeměně na martenzitickou strukturu, která byla na povrchu hrubší podobně jako u zakalené uhlíkové oceli. Vlastnosti zakalené povrchové vrstvy byly podobné jako v prvním případě. Struktura tvořená martenzitem je zobrazena na obr. 43 [16]. [16]



Obr. 43 Snímky zakalené povrchové vrstvy oceli 2 tvořené martenzitickou strukturou [16]

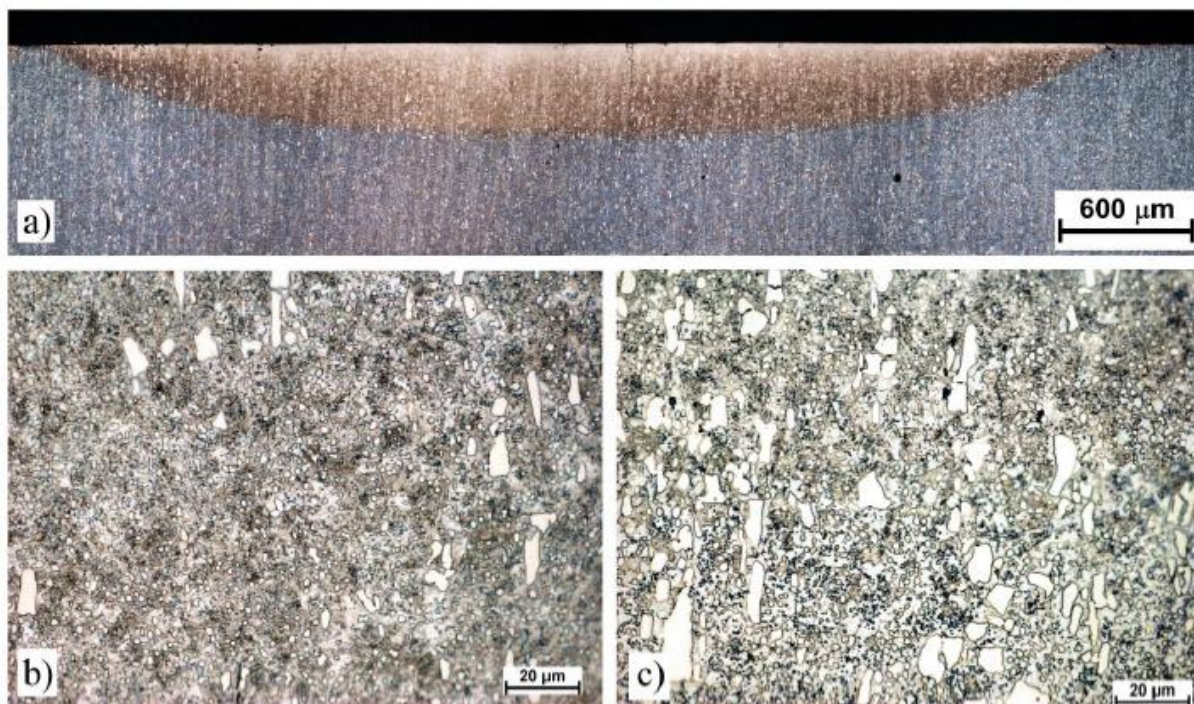
U oceli 2 byly rovněž naměřeny dva profily tvrdosti, příčný profil a profil od povrchu do jádra. Tyto profily jsou zobrazeny na obr. 44 [16]. [16]



Obr. 44 Profily tvrdosti povrchové vrstvy oceli 2 po zakalení [16]

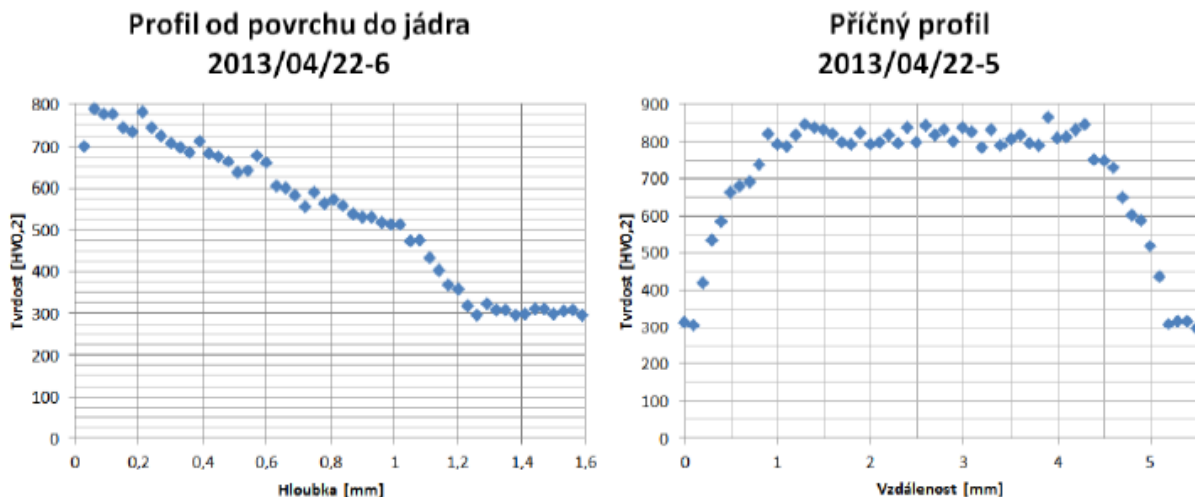
Na rozdíl od prvního případu nebyly nejvyšší hodnoty tvrdosti zaznamenány těsně pod povrchem vzorku, nýbrž až v určité hloubce od povrchu. Tyto hodnoty byly v rozmezí 630-730 HV_{0,2}. Nižší tvrdost v těsně podpovrchové vrstvě byla zapříčiněna zhrubnutím martenzitické struktury, ke kterému došlo podobně jako u oceli 1 v důsledku vysokých teplot na povrchu a rychlého ochlazení. Hloubka zakalené vrstvy byla 0,49 mm. Homogenita zakalené vrstvy byla lepší než v případě oceli 1, což bylo možno předpokládat vzhledem k tomu, že ocel 2 již ve výchozím stavu vykazovala z hlediska vlastností větší homogenitu. [16]

Jako třetí v pořadí byla analyzována nástrojová ocel. Snímky z metalografické analýzy jsou zobrazeny na obr. 45 [16]. [16]



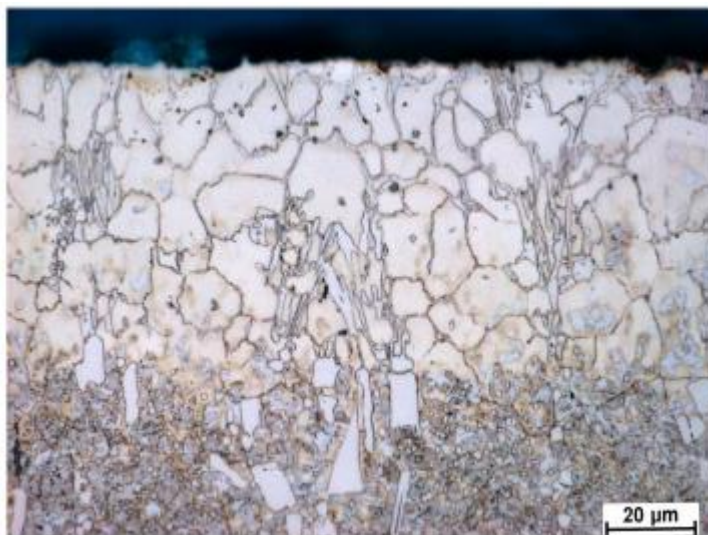
Obr. 45 Snímky zakalené povrchové vrstvy oceli 3 [16]

Výsledná struktura oceli byla tvořena martenzitem. U drobných zrnitých karbidů, které byly v oceli pozorovány ve výchozím stavu, došlo ke znatelnému úbytku. To bylo s největší pravděpodobností způsobeno rozpuštěním karbidů při austenitizaci. Naměřené profily tvrdosti jsou vyobrazeny na obr. 46 [16]. [16]



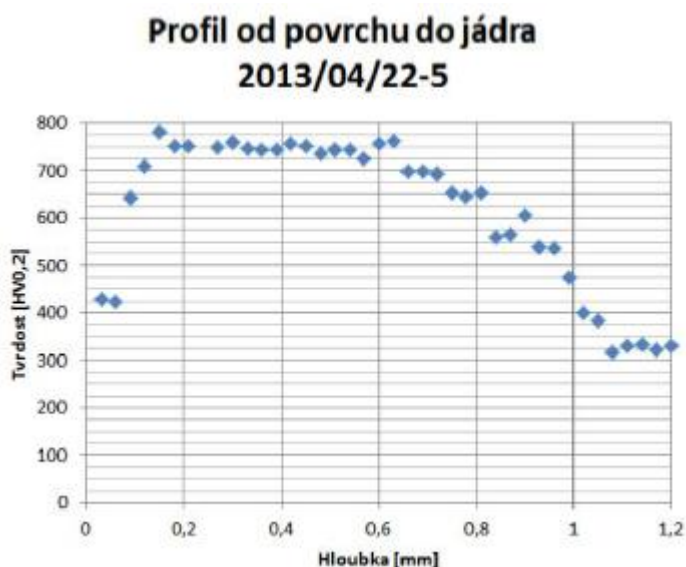
Obr. 46 Profily tvrdosti povrchové vrstvy oceli 3 po zakalení [16]

Nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo v oblasti těsně pod povrchem vzorku. Tyto hodnoty se pohybovaly okolo 800 HV0,2. Maximální tloušťka zakalené vrstvy byla 1,2 mm, což odpovídá hodnotě uváděné v literatuře. Při kalení oceli 3 byla také na jednom vzorku vytvořena natavená vrstva s hrubozrnnou strukturou. Při přetavení vzorku zůstal v těsně podpovrchové vrstvě zvýšený obsah zbytkového austenitu, což zřejmě mohlo zapříčinit nižší hodnoty tvrdosti v této oblasti. Struktura nataveného vzorku je zobrazena na obr. 47 [16]. Přetavená vrstva obsahovala velmi malé množství karbidů oproti zbývajícimu materiálu. [16]



Obr. 47 Natavený vzorek oceli 3 [16]

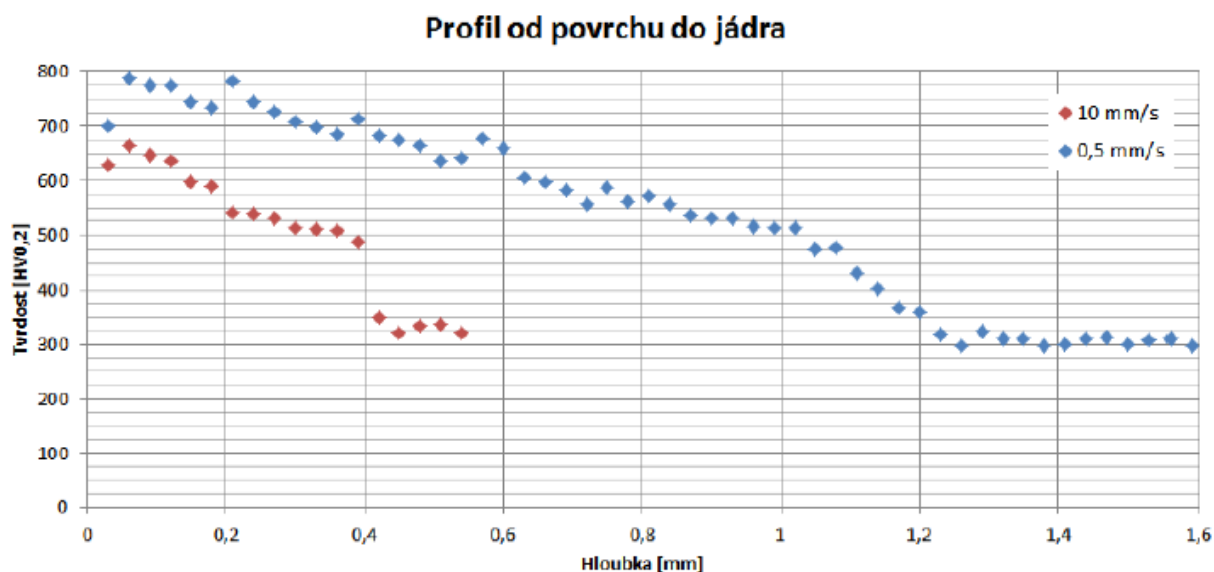
Profil tvrdosti od povrchu do jádra u nataveného vzorku je možno vidět na obr. 48 [16]. V hloubce mezi 0,2 až 0,6 mm byly zaznamenány nejvyšší hodnoty tvrdosti nad 700 HV0,2. [16]



Obr. 48 Profil tvrdosti od povrchu do jádra u nataveného vzorku oceli 3 [16]

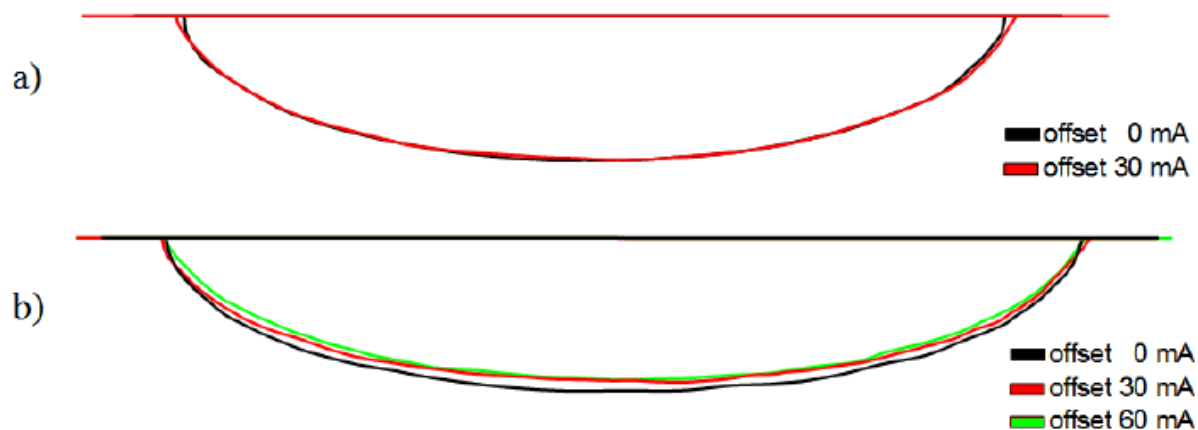
Při těchto experimentech bylo jedním z cílů stanovit vliv některých proměnných parametrů na vlastnosti výsledné zakalené vrstvy. Mezi tyto parametry patří rychlost posuvu F_s , míra defokuse neboli offset a skenovací frekvence FRQ. Vliv posuvu F_s spočívá v tom, že při snížení jeho rychlosti dochází k prodloužení expozice povrchové plochy vzorku. Tato prodloužená doba vede k prohřátí vrstvy do větší hloubky a po ochlazení je možno získat zakalenou vrstvu větší tloušťky. V případě oceli 3 byla hodnota rychlosti posuvu snížena z 10 mm/s na 0,5 mm/s a výsledkem byla zakalená vrstva o větší tloušťce. [16]

Vliv změny rychlosti posuvu je znázorněn na obr. 49 [16]. V grafu je zobrazen profil tvrdosti oceli 3 při rychlosti posuvu 10 mm/s a při rychlosti 0,5 mm/s. [16]



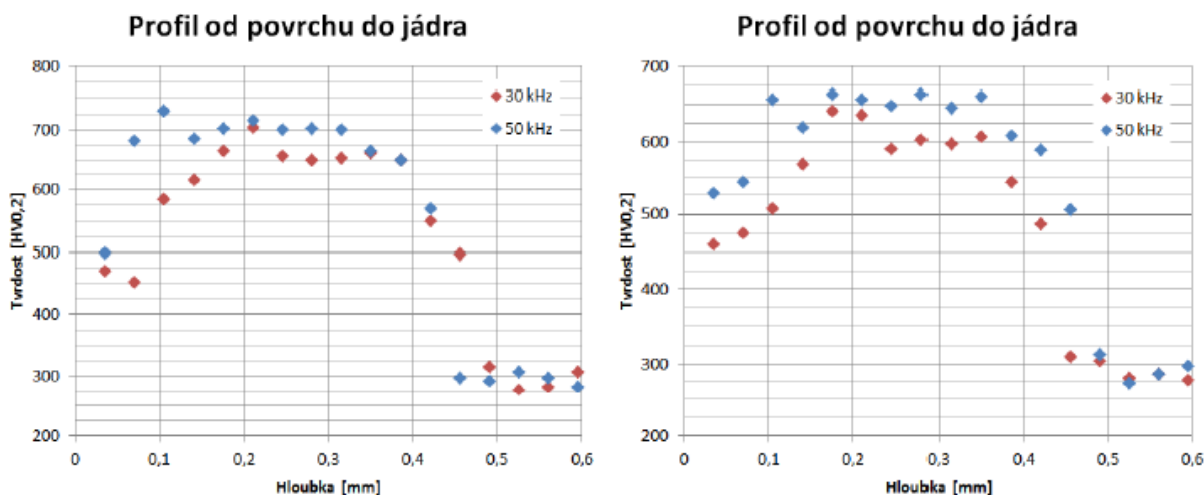
Obr. 49 Vliv rychlosti posuvu na zakalenou vrstvu [16]

Z hlediska vlivu defokusace bylo zjištěno, že s nárůstem míry neostrosti dochází k velmi mírnému poklesu tloušťky zakalené vrstvy. Tento pokles byl však opravdu nepatrně malý. Bylo tedy možno konstatovat, že vliv defokusace je zcela zanedbatelný a při použitím offsetu tedy prakticky nedochází k ovlivnění vlastností zakalené vrstvy. Vliv defokusace je znázorněn na obr. 50 [16]. [16]



Obr. 50 Vliv defokusace na vlastnosti zakalené vrstvy, a) pro posuv 5 mm/s, b) pro posuv 10 mm/s [16]

Z hlediska vlivu skenovací frekvence FRQ existuje předpoklad, že nárůst frekvence může způsobit nárůst tvrdosti, což naznačuje obr. 51 [16]. Vliv skenovací frekvence FRQ na šířku tepelně ovlivněné oblasti byl navzdory očekáváním poměrně významný. Při zvýšení hodnoty frekvence z 30 kHz na 50 kHz totiž došlo k zúžení tepelně ovlivněné oblasti. Toto bylo potřeba kompenzovat změnou hodnoty proudu. Změna šířky zakalené vrstvy, tedy její zúžení, by mohla být příčinou zmíněného nárůstu tvrdosti. Ačkoliv je vliv skenovací frekvence FRQ na šířku tepelně ovlivněné zóny zřejmý, není zatím zcela jasná příčina tohoto jevu. [16]



Obr. 51 Vliv frekvence FRQ na vlastnosti zakalené vrstvy, při rychlosti posuvu 10 mm/s a rychlosti 5 mm/s [16]

4.4 Předchozí experiment s nástrojovou ocelí 19 552

Tento experiment byl zaměřen na povrchové kalení tvarových částí kovací zápustek. U těchto částí totiž dochází k největšímu opotřebení. Experimentálním materiálem byla nástrojová ocel 19 552, která bude blíže popsána v následující podkapitole. Jedním z cílů experimentu bylo podobně jako v předchozích případech nalezení optimálních parametrů pro povrchové kalení dané součásti. Při provádění experimentu bylo snahou dosáhnout co největší hloubky zakalené vrstvy a zvýšit povrchovou tvrdost součásti tak, aby byla co možná nejvíce prodloužena její životnost. Ilustrační fotografie kovací zápustky je vyobrazena na obr. 52 [33]. [34]



Obr. 52 Ilustrační fotografie zápustky pro kování [33]

4.4.1 Nástrojová ocel 19 552

Materiálem kovací zápustky byla nástrojová ocel 19 552. Jedná se o středně legovanou Cr-Mo-V ocel pro práci za tepla. Kromě zápustek pro kování se tato ocel používá také na různé nástroje pro stříhání za tepla, nože strojních nůžek velmi namáhané tepelně i

mechanicky, střížníky a střížnice s velkými nároky na houževnatost. Dále jsou to nástroje pro tváření za tepla a jiné. Hodnota tepelné vodivosti je u oceli 19 552 $\lambda = 29 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Ocel je možno kalit za ohřevu na teplotu 1000 až 1050°C a ochlazování v oleji nebo na vzduchu. Ochlazování v oleji se provádí u jednodušších nástrojů a tvrdost by po kalení měla dosahovat minimálně 50 HRC. Z hlediska prokalitelnosti oceli je uváděno, že při kalení do oleje nebo na vzduchu dosahuje prokalitelnost v celém průřezu hodnoty 150 mm. Vysokoteplotní popouštění se provádí za teplot 550 až 650°C. [30]

Fázové přeměny mají tyto teploty:

$A_{C1} \sim 840^\circ\text{C}$ [30]

$A_{C3} \sim 870^\circ\text{C}$ [30]

$M_s \sim 280^\circ\text{C}$ [30]

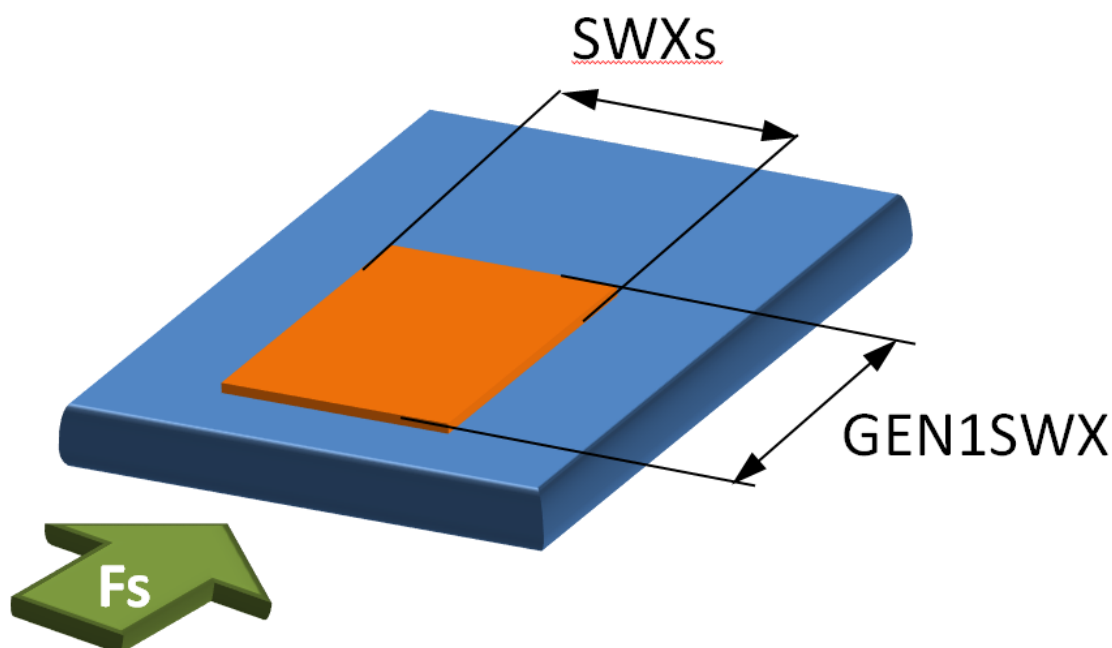
Chemické složení oceli 19 552 uvádí tab. 9 [30].

Tab. 9 Chemické složení nástrojové oceli 19 552 v hm. % [30]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
0,32-0,42	0,20-0,50	0,80-1,20	max 0,03	max 0,03	4,50-5,50	1,10-1,60	0,35-0,60

4.4.2 Průběh experimentu a zhodnocení výsledků

Před samotným začátkem experimentu byly podobně jako v předchozích případech nejprve stanoveny vhodné parametry. Bylo provedeno několik přejezdů paprsku s odstupňovanou energetickou hustotou a poté se změnila rychlost posuvu a přepočítal se proud paprsku. Následně byly nastaveny nové parametry a při proměnné energetické hustotě bylo vytvořeno několik stop. V rámci samotného experimentu pak bylo tepelně zpracováno několik vzorků, přičemž byla měněna délka kalicího obrazce – parametr GEN1SWX. Pro lepší představu jsou rozměry kalicího obrazce znázorněny na obr. 53 [34]. [34]



Obr. 53 Rozměry kalicího obrazce [34]

Šířka stopy zakalení byla v tomto případě 20 mm. V systému Sinumerik byl vytvořen řídicí program. Hodnota urychlovacího napětí byla 120 kV a to z toho důvodu, že vyšší napětí zužuje možnou defleksi elektronového paprsku. Zaostření paprsku bylo nastaveno mírně nad povrch součásti. Konkrétní hodnota parametru byla +15 mA. Poté, co byly stanoveny výchozí parametry, byla provedena první fáze experimentu, která zahrnovala zakalení vzorků s označením 1.2 až 1.5 při rychlosti posuvu $F_s = 3$ mm/s. U základního materiálu byla naměřena hodnota tvrdosti okolo 53 HRC. Po zakalení měly povrchové vrstvy vzorků tvrdost v rozmezí 57 až 60 HRC. Vzhledem k tomu, že podle vizuální kontroly zřejmě došlo k mírnému natavení vzorků, bylo pro další experimenty rozhodnuto, že se bude energetická hustota snižovat. [34]

V případě dalších zkoumaných vzorků, kterými byly vzorky 1.6 a 1.7 byla povrchová tvrdost stejná jako tvrdost základního materiálu, z čehož vyplývalo, že u těchto vzorků vůbec nedošlo k tepelnému zpracování. U vzorku 1.8 byl nejprve nastaven proud paprsku s hodnotou 6,5 mA a poté při dalším přejezdu proud 7,5 mA. Vzorky 1.9 až 1.13 byly tepelně zpracovány s rostoucím výkonem, přičemž u vzorku 1.13 byly zaznamenány stopy po přetavení. [34]

Následující vzorky byly tepelně zpracovány na opačné straně součásti s novými parametry a po modulaci délky kalicího obrazce čili parametru SWXs. U vzorků 1.14 a 1.16 bylo možno konstatovat, že byly přetaveny. Vzorky 1.15 a 1.17 jsou naopak nesprávně zakaleny, jelikož u nich nedošlo k příliš velké změně povrchové tvrdosti oproti základnímu materiálu. Vzorek 1.18 byl tepelně zpracován ještě před tím, než se začalo se zvyšováním energetické hustoty v kombinaci s nižší rychlostí posuvu F_s a větším ozařovaným polem. V případě vzorků 1.19 a 1.21 byla naměřena poměrně nevýznamná změna hodnoty tvrdosti oproti základnímu, což znamená, že vzorky nebyly správně zakaleny. Vzhledem k tomu, že vzorek 1.22 byl na základě vizuální kontroly vyhodnocen již jako přetavený, bylo možno za optimální považovat vzorek 1.20. Velikost ozařovaného pole u tohoto vzorku však nebyla optimální. Docházelo zde k tepelným ztrátám a k ohřevu materiál došlo pouze lokálně v oblasti čela. U vzorků 1.23 až 1.26 bylo zkoumáno, jaký má vliv rozostření paprsku na vlastnosti zakaleného povrchu. Dále následuje seznam konstantních parametrů nastavených na zařízení elektronového svazku během prováděného experimentu. Parametry jsou uvedeny v tab. 10 [34]. [34]

Tab. 10 Konstantní parametry pro experiment [34]

Urychlovací napětí HV	120 kV	Fokusační proud SL	2503,25 mA
Kalibrace KW	4211	GEN1FRQ	4136 Hz
Rozměr SWY	0 mm	GEN1FIG	8
Příčný obrazec Fig	61	GEN1SWX	20 mm
Frekvence FRQ	793 Hz	GEN1SWY	0 mm

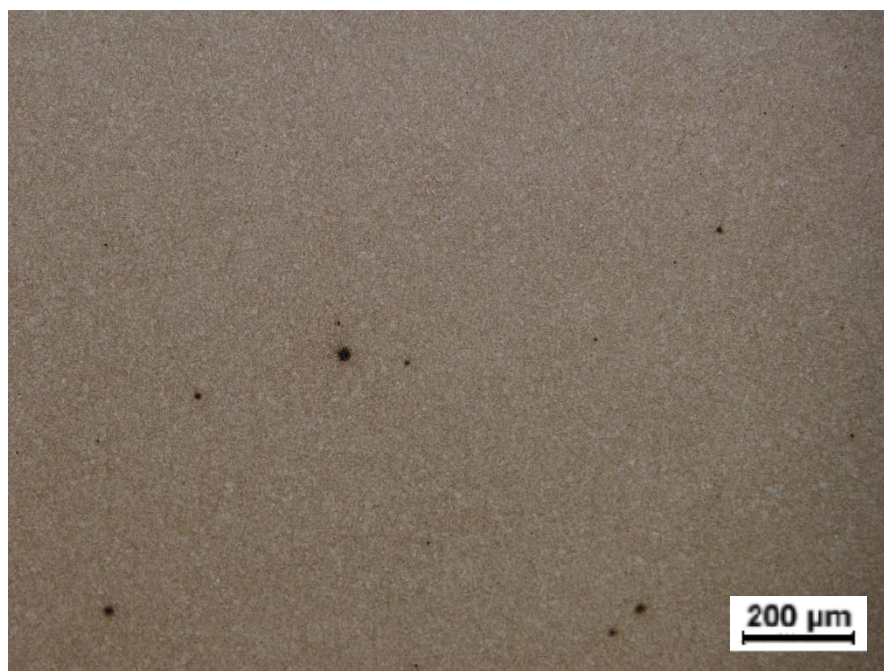
Všechny vzorky, na kterých bylo experimentováno, jsou spolu s hodnotami příslušných parametrů nastavených na zařízení uvedeny v tab. 11 [34].

Tab. 11 Vzorky s příslušnými parametry [34]

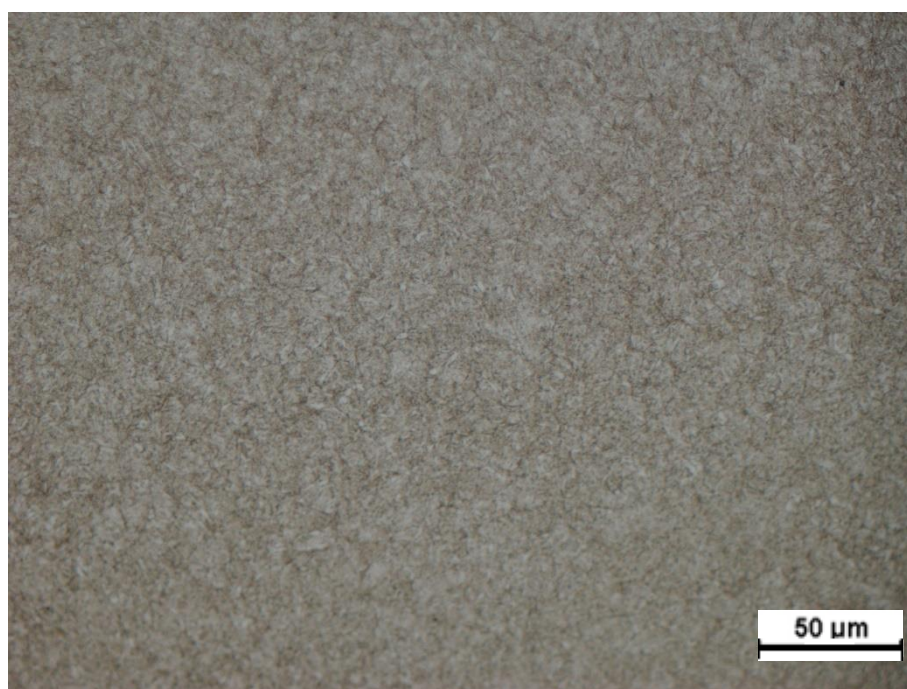
Číslo vzorku	Proud SQ [mA]	Posuv Fs [mm/s]	SWXs [mm]	Offset [mA]
1.1	-	-	5	15
1.2	10,2	3	5	15
1.3	10,4	3	5	15
1.4	10,6	3	5	15
1.5	10,8	3	5	15
1.6	10,0	3	5	15
1.7	9,8	3	5	15
1.8	6,5 a 7,5	1,5	5	15
1.9	7,7	1,5	5	15
1.10	7,9	1,5	5	15
1.11	8,1	1,5	5	15
1.12	8,4	1,5	5	15
1.13	8,7	1,5	5	15
1.14	8,1	1,5	3	15
1.15	8,1	1,5	7	15
1.16	10,4	3	3	15
1.17	10,4	3	7	15
1.18	10,0	3	3	15
1.19	8,7	1,5	7	15
1.20	9,2	1,5	7	15
1.21	9,0	1,5	7	15
1.22	9,4	1,5	7	15
1.23	7,7	1,5	5	0
1.24	8,1	1,5	5	0
1.25	10,4	3	5	0
1.26	10,4	3	5	-15

Z tohoto experimentu vyplývá, že některé z parametrů umožňují vytvořit zakalenou vrstvu o tvrdosti přibližně 60 HRC. Na některých vzorcích byly stále přítomny stopy po lokálním natavení. Příčinou byla pravděpodobně nevhodná kombinace frekvencí. Experiment se vzorkem 1.26, u kterého byl nastaven offset -15 mA, tedy rozostření pod povrchem, naznačuje, že příčinou problému by mohlo být špatné nastavení offsetu, neboť vzorek 1.26 nevykazoval žádné známky po natavení. [34]

Dále budou uvedeny snímky z metalografické analýzy a k nim budou přiřazeny příslušné profily tvrdosti naměřené na tvrdoměru. Ze všech 26 vzorků jsou zde vybrány pouze některé nejvíce reprezentativní.

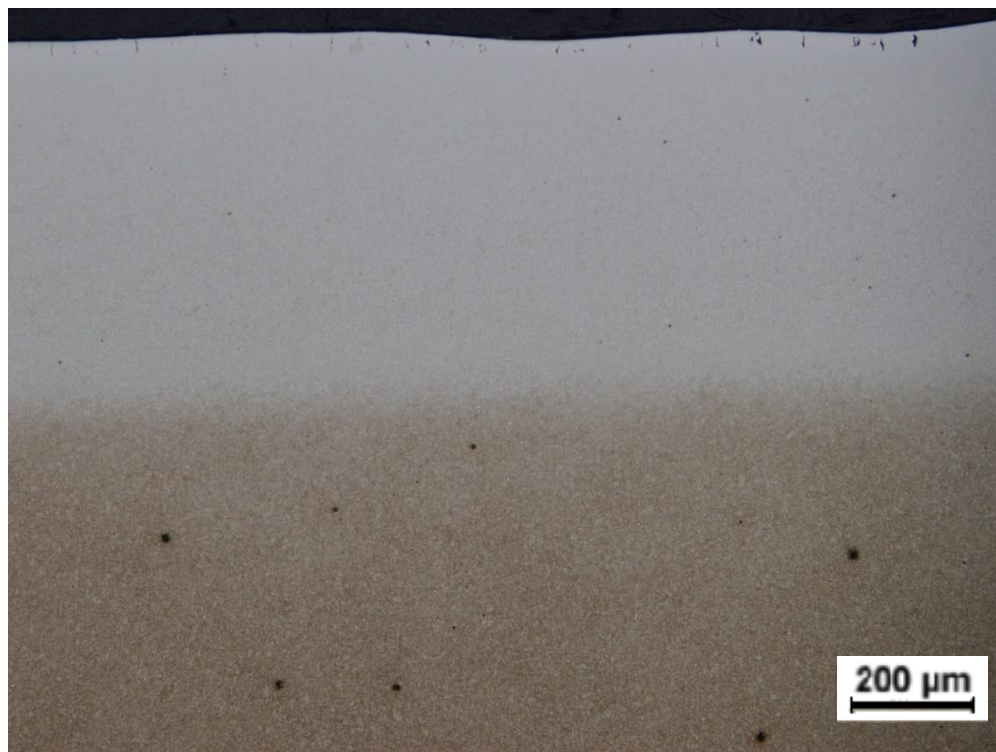


Obr. 54 Vzorek 1.2, základní materiál, zvětšeno 100x

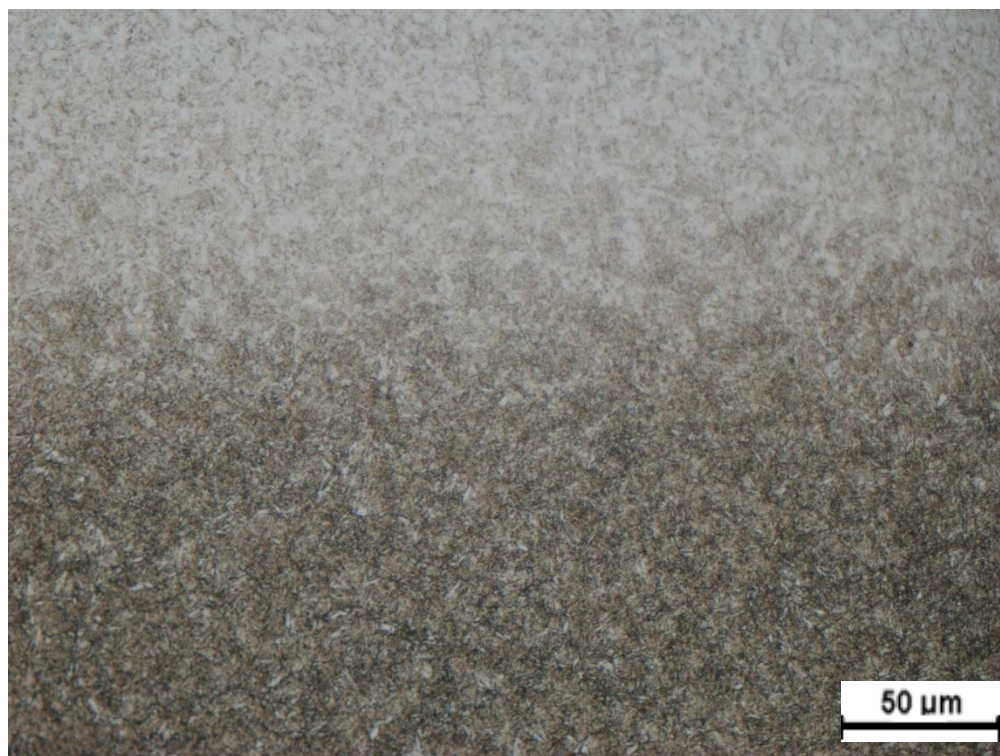


Obr. 55 Vzorek 1.2, základní materiál, zvětšeno 500x

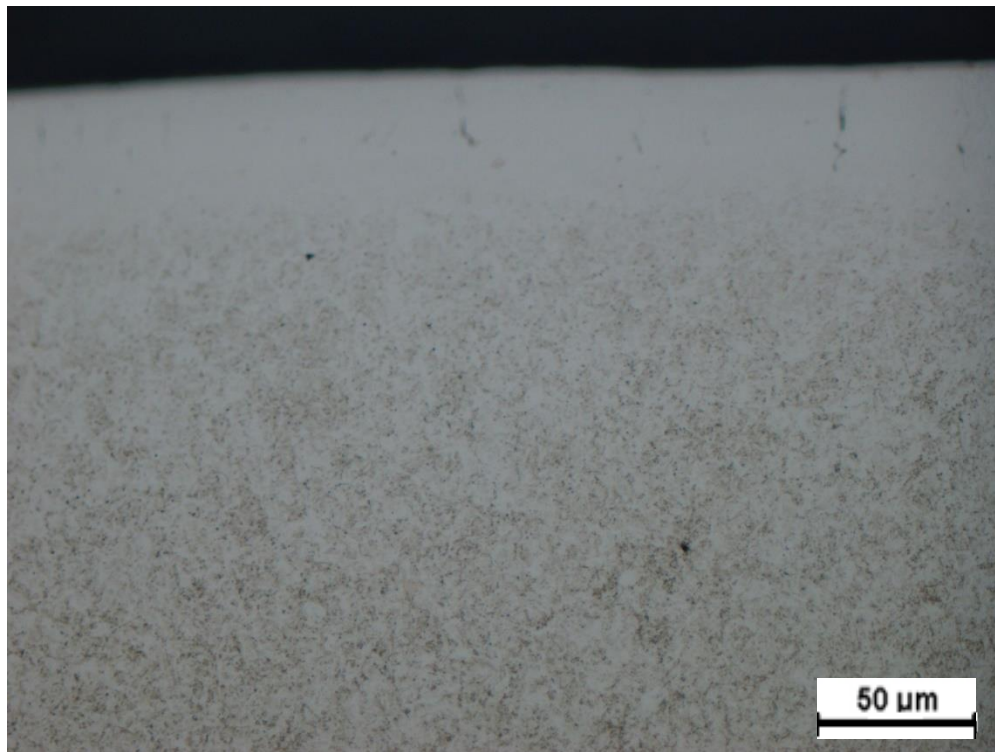
Na základě obr. 55 je možno konstatovat, že struktura základního materiálu vzorku 1.2 je tvořena vysokoteplotně popuštěným martenzitem označovaným jako sorbit. Z dostupných informací o předchozím tepelném zpracování materiálu bylo známo, že ocel byla již dříve zušlechťována, tedy kalena a vysokoteplotně popouštěna. Struktura základního materiálu tedy odpovídá předpokládané struktuře po zušlechtění. Naměřená tvrdost základního materiálu se pohybovala okolo hodnoty 450 HV1.



Obr. 56 Vzorek 1.2, zakalená povrchová vrstva, zvětšeno 100x

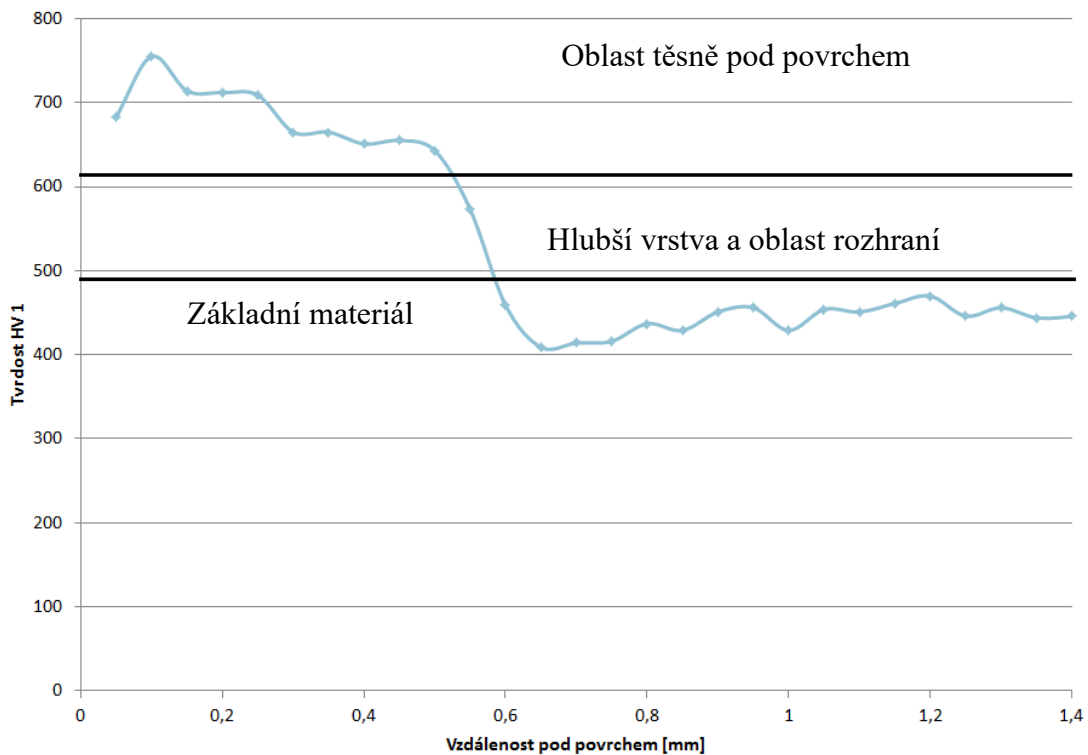


Obr. 57 Vzorek 1.2, rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu, zvětšeno 500x



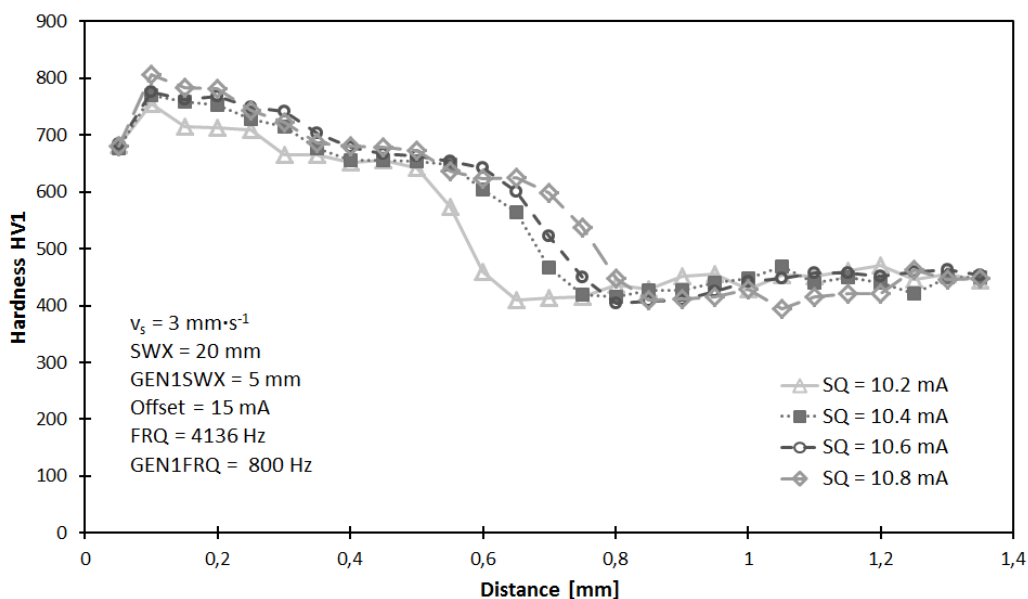
Obr. 58 Vzorek 1.2, povrch zakalené vrstvy, zvětšeno 500x

Na obr. 56 až 58 je možno pozorovat strukturu zakalené povrchové vrstvy. Jedná se o velmi jemnou martenzitickou strukturu. Na obr. 56 a 57 je zobrazeno rozhraní jemné martenzitické struktury zakalené vrstvy a sorbitické struktury základního materiálu. Na obr. 56 a 58 je zřejmá přítomnost trhlin na povrchu. Jak již bylo uvedeno dříve, u vzorků 1.2 až 1.5 došlo pravděpodobně k natavení. Z tohoto předpokladu byl vyvozen závěr, že bude potřeba snížit energetickou hustotu. Parametr SQ, tedy proud paprsku byl před dalším experimentem snížen na hodnotu 10 mA. Profil tvrdosti vzorku 1.2 je vyobrazen na obr. 59.



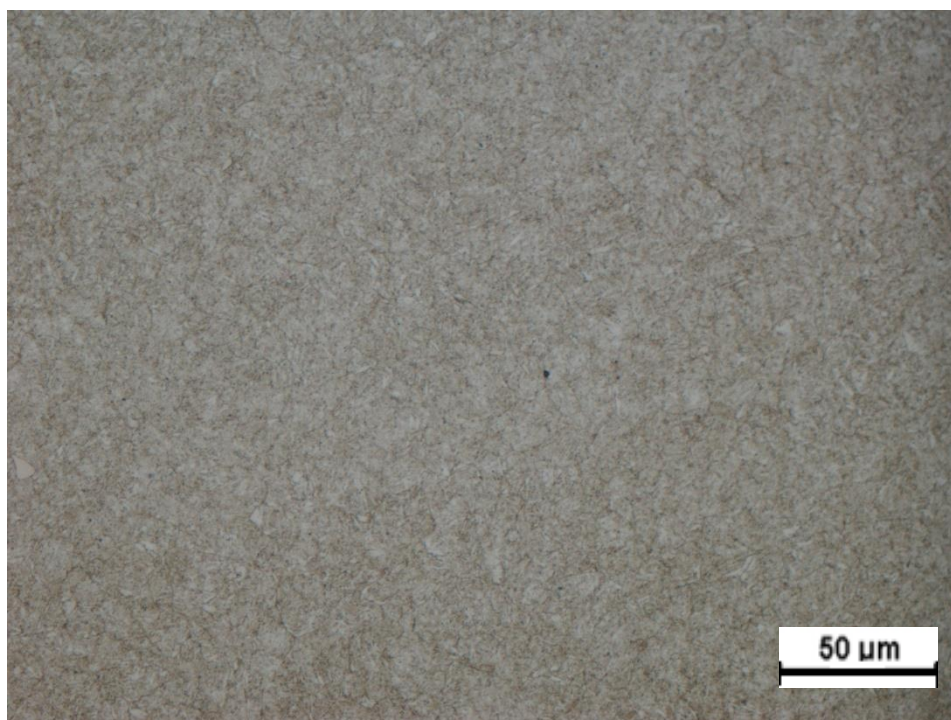
Obr. 59 Profil tvrdosti vzorku 1.2 od povrchu do jádra

Nejvyšší tvrdost byla zaznamenána v těsně podpovrchové vrstvě, kde se její hodnota pohybovala nad 700 HV1. V hlubší vrstvě pak tvrdost znatelně klesala. V oblasti rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu se její hodnota pohybovala v rozmezí 550 až 500 HV1. Hloubka zakalené vrstvy byla 0,59 mm. Vliv parametru SQ na vlastnosti zakalené vrstvy pro vzorky 1.2 až 1.5 je zobrazen na obr. 60.



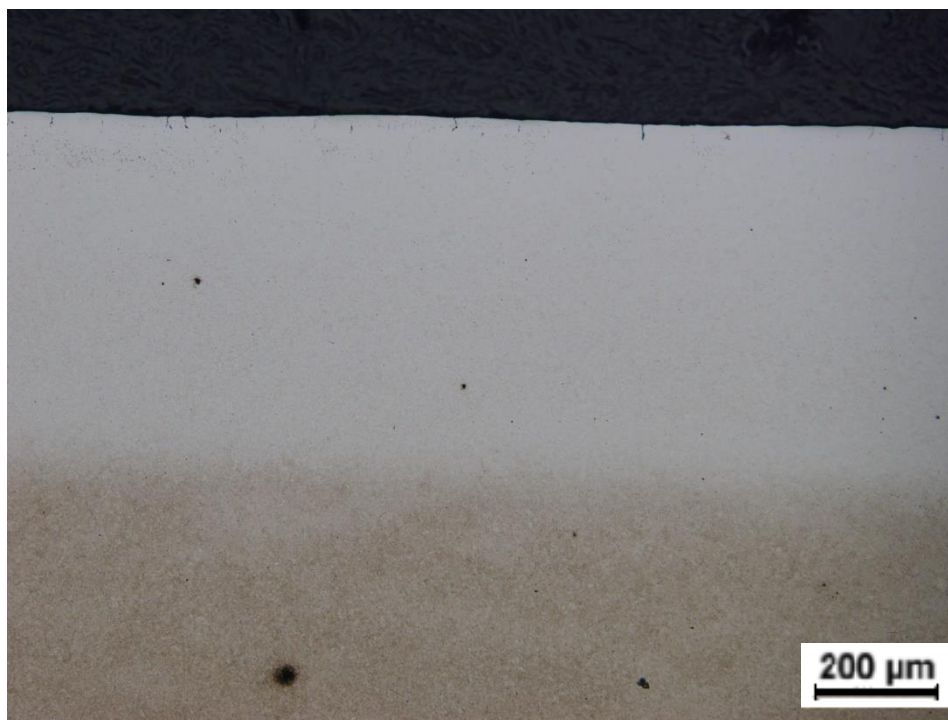
Obr. 60 Optimalizace parametru SQ pro vzorky 1.2 až 1.5

U následujících vzorků 1.6 a 1.7 však nedošlo k zakalení povrchové vrstvy, neboť povrch vykazoval podobnou tvrdost jako jádro vzorku. V případě vzorku 1.8 rovněž nedošlo ke správnému povrchovému zakalení. Snímky vzorků 1.3 až 1.5 zde nejsou uvedeny, protože vzorky měly po zakalení velmi podobnou strukturu jako vzorek 1.2 a to včetně povrchových trhlin. Vzorky 1.6 až 1.8 zde nejsou rovněž uvedeny, neboť u nich nedošlo k zakalení. Ze vzorků 1.9 až 1.13, které již byly standardně tepelně zpracovány, zde bude uveden vzorek 1.9, který je nejvíce reprezentativní.



Obr. 61 Vzorek 1.9, základní materiál, zvětšeno 500x

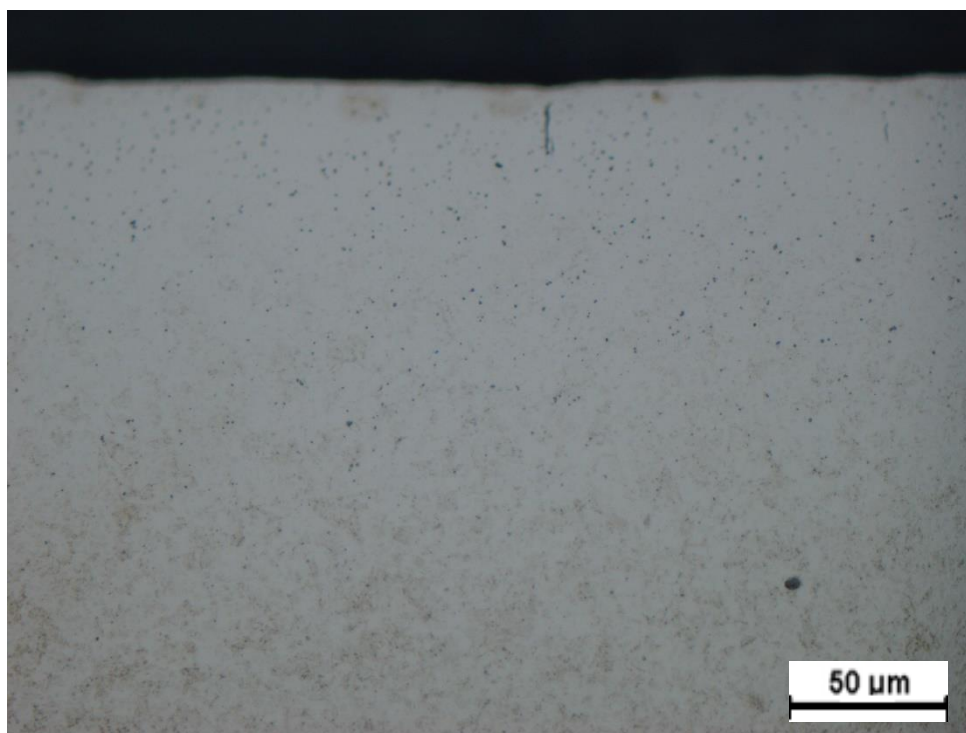
Na obr. 61 lze pozorovat sorbitickou strukturu základního materiálu vzorku 1.9. Měřením tvrdosti základního materiálu byly získány hodnoty pohybující se okolo 450 HV1. U tohoto vzorku byly oproti vzorku 1.2 změněny dva parametry. Jednak byl snížen proud elektronového paprsku SQ a to na hodnotu 7,7 mA a dále byla snížena rychlost posuvu. V tomto případě byla hodnota posuvu nastavena na 1,5 mm/s oproti původním 3 mm/s. Parametry SWXs a offset byly zatím ponechány na původních hodnotách 5 mm a 15 mA. U vzorku 1.9 byly po zakalení opět pozorovány trhliny. Podle vizuální kontroly opět došlo k natavení povrchu vzorku a to i navzdory tomu, že byla snížena hodnota proudu paprsku. Zakalená vrstva je zobrazena na obr. 62 až 64.



Obr. 62 Vzorek 1.9, zakalená vrstva, zvětšeno 100x

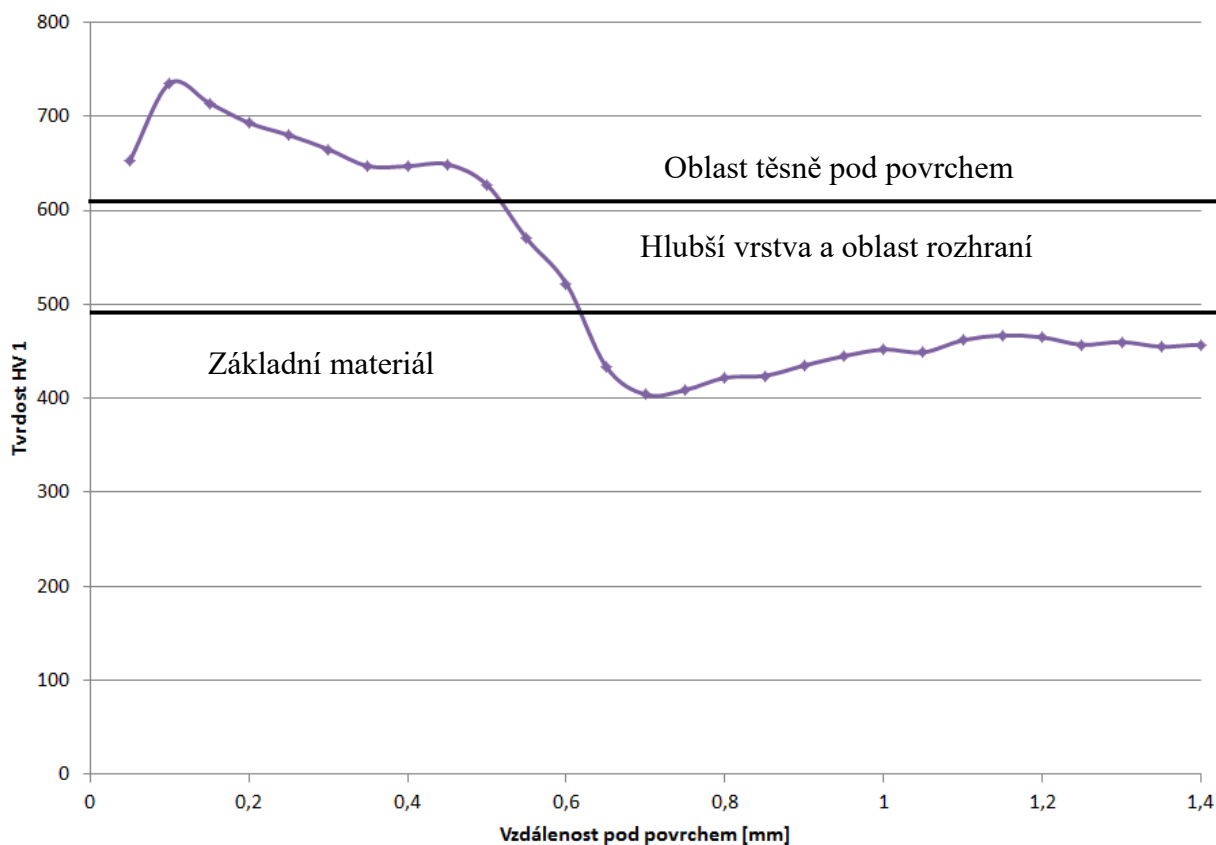


Obr. 63 Vzorek 1.9, rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu, zvětšeno 500x



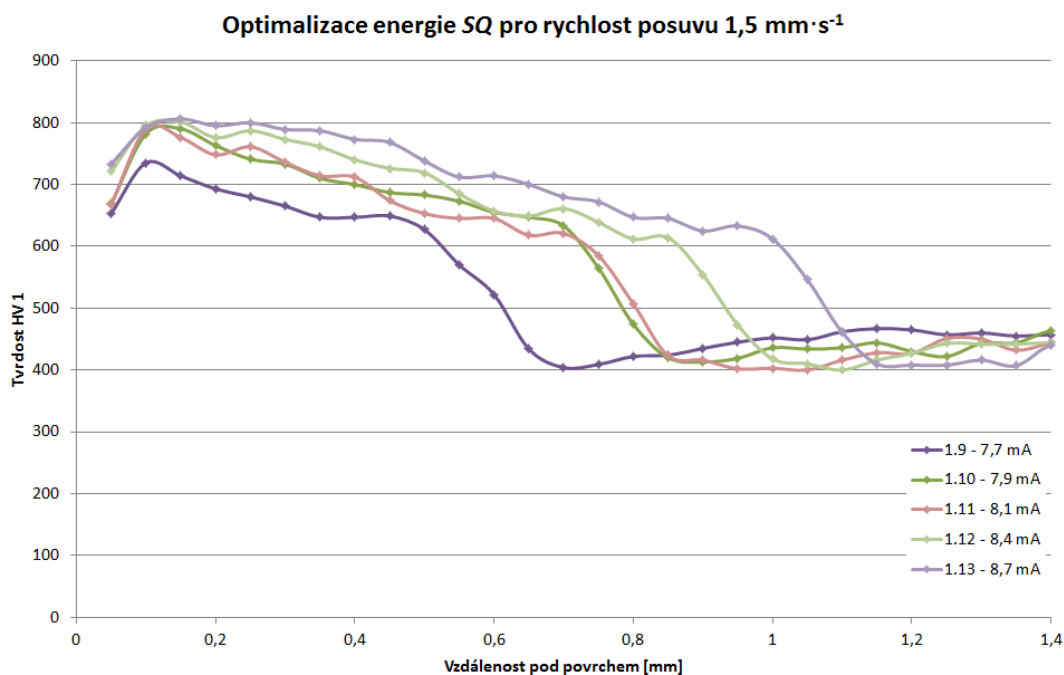
Obr. 64 Vzorek 1.9, povrch zakalené vrstvy, zvětšeno 500x

Po zakalení vznikla velmi jemná martenzitická struktura. Na obr. 64 je detailní zobrazení trhliny na povrchu. Naměřený profil tvrdosti vzorku 1.9 je znázorněn na obr. 65. Ve vrstvě těsně pod povrchem se tvrdost vzorku pohybovala v rozmezí 740 až 650 HV1. V hlubších vrstvách pak tvrdost klesala z 600 na 500 HV1. Hloubka zakalené vrstvy byla 0,61 mm.



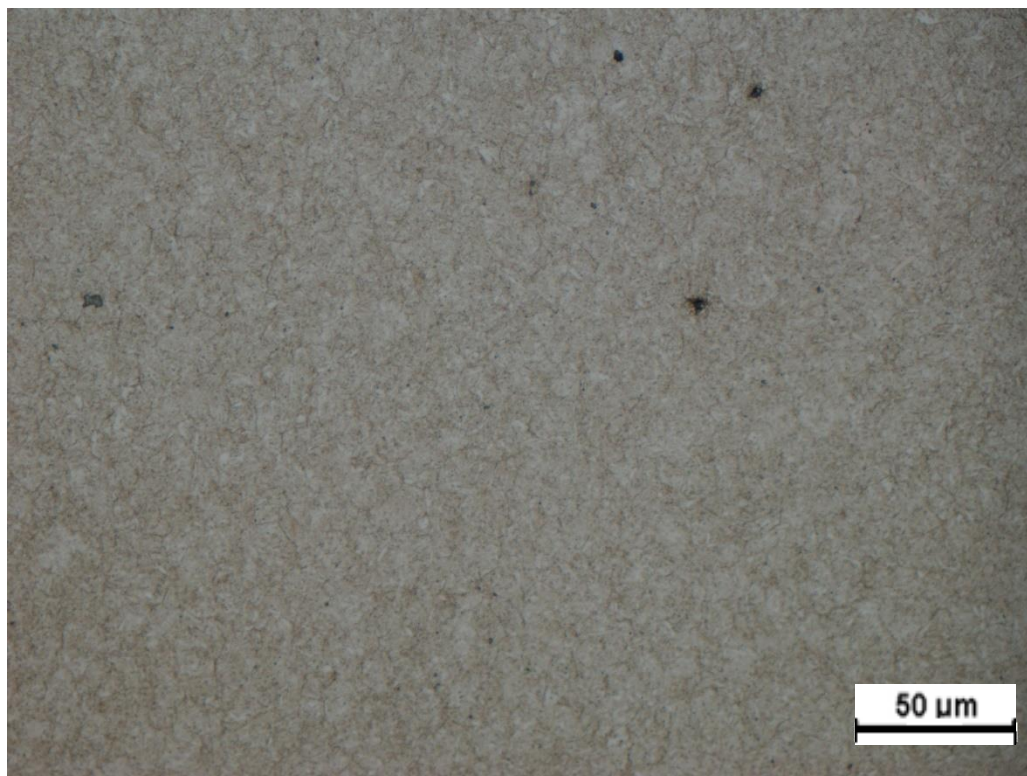
Obr. 65 Profil tvrdosti vzorku 1.9 od povrchu do jádra

Vliv parametru SQ na vlastnosti zakalené vrstvy u vzorků 1.9 až 1.13 je možno pozorovat na obr. 66. U vzorku 1.9 bylo při hodnotě parametru SQ 7,7 mA dosaženo nejnižších tvrdostí. V případě vzorku 1.13, kdy měl parametr SQ hodnotu 8,7 mA byly hodnoty tvrdosti nejvyšší.

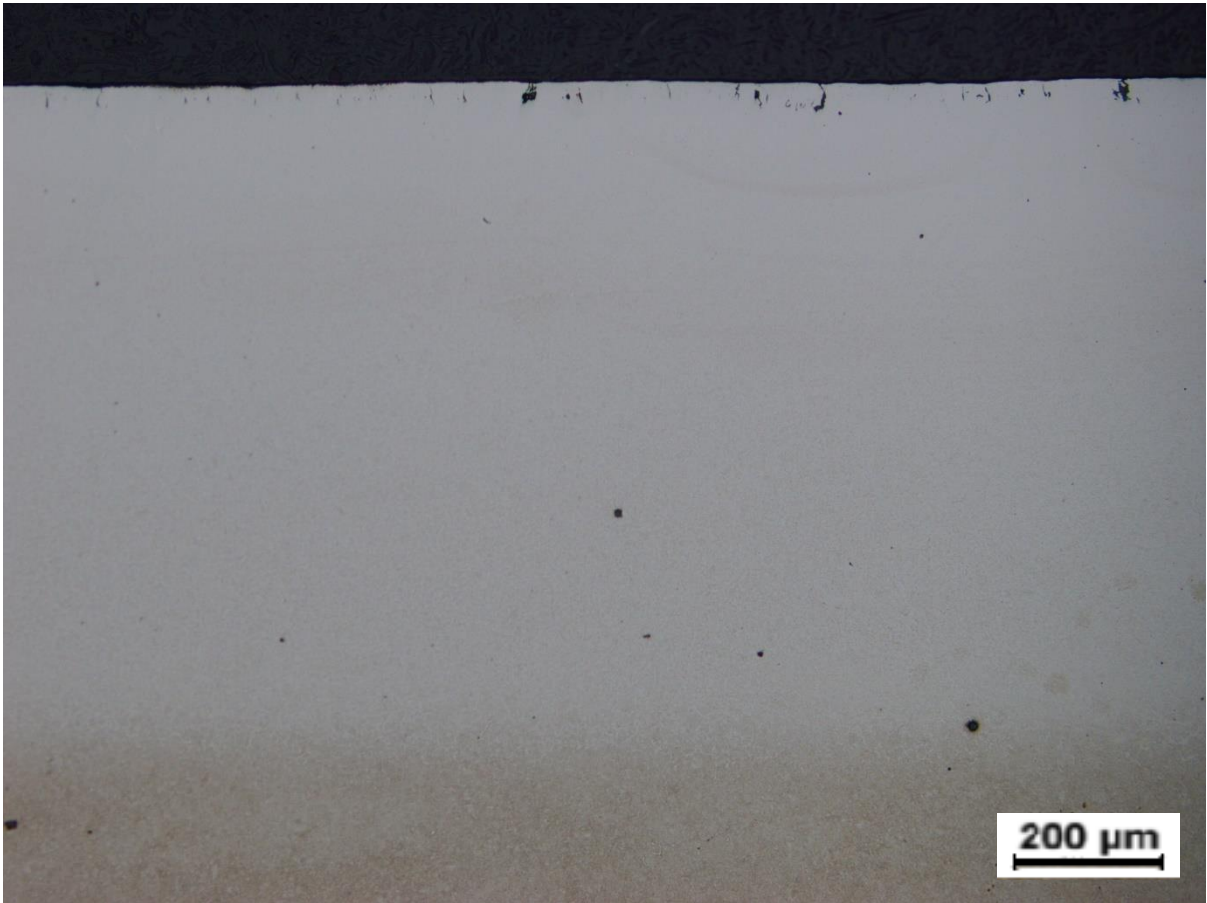


Obr. 66 Optimalizace proudu paprsku SQ pro vzorky 1.9 až 1.13

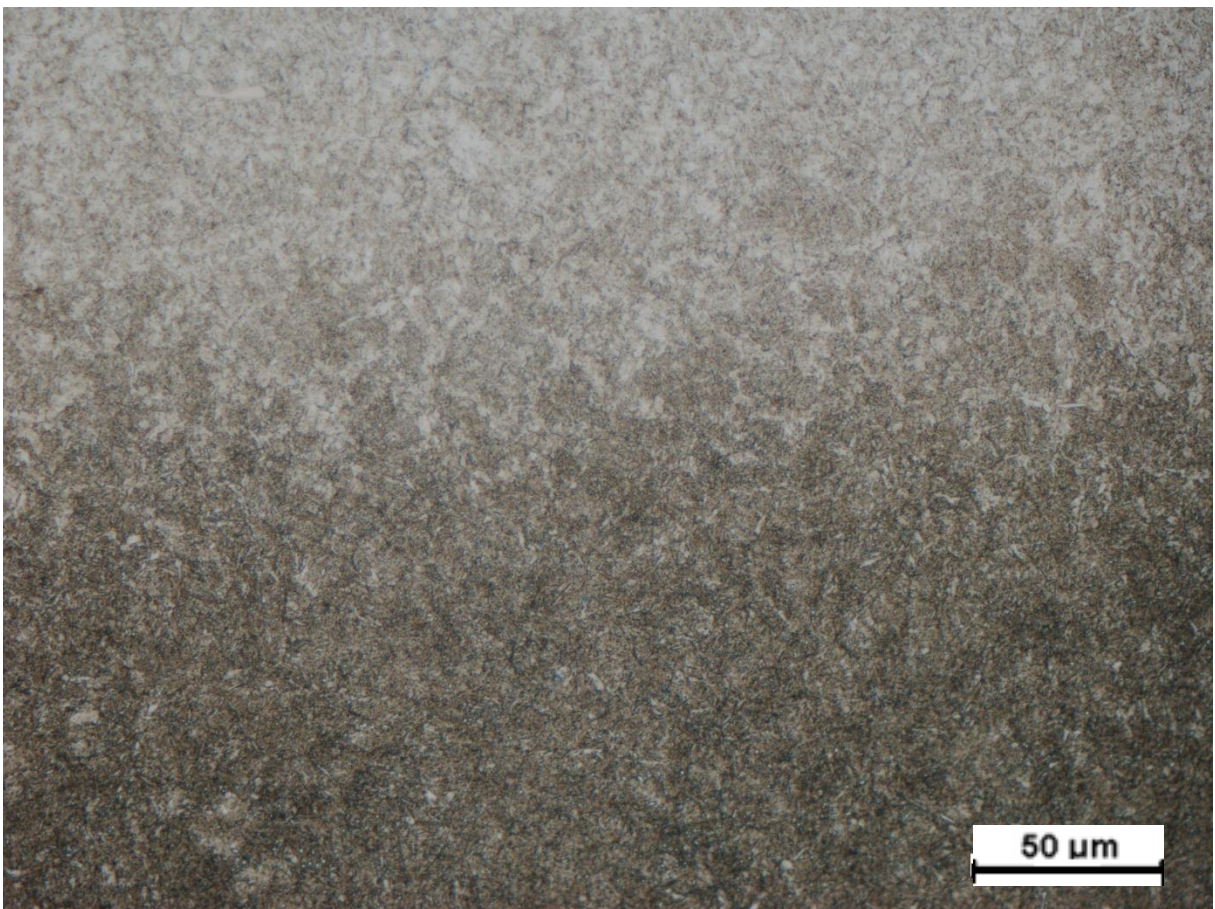
Následující vzorky 1.14 až 1.19 nebudou uvedeny, jelikož vzorky 1.14 a 1.16 byly přetaveny a vzorky 1.15 a 1.17 naopak nebyly zakaleny. Vzorek 1.18 neposkytuje žádné nové důležité informace a vzorek 1.19 nebyl správně zakalen. Na obr. 67 až 70 jsou tedy snímky struktury vzorku 1.20.



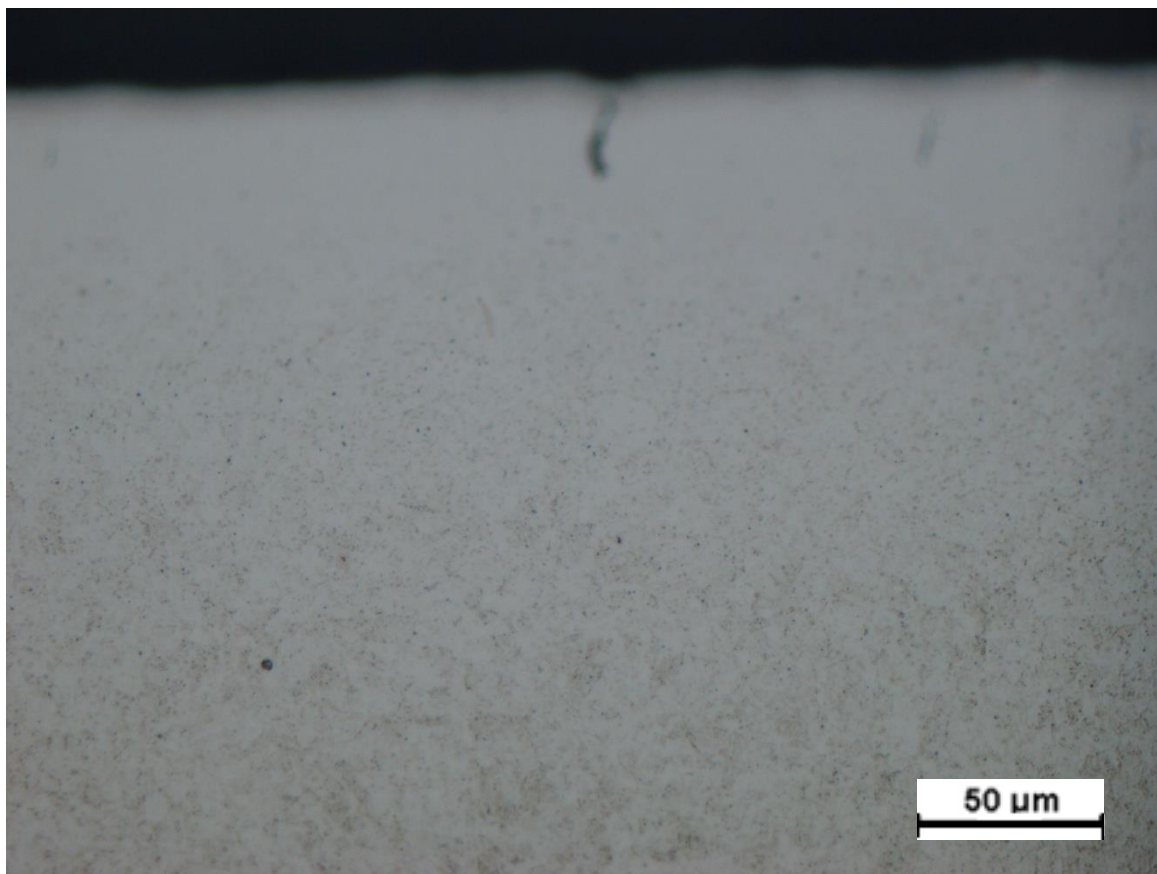
Obr. 67 Vzorek 1.20, základní materiál, zvětšeno 500x



Obr. 68 Vzorek 1.20, zakalená vrstva, zvětšeno 100x

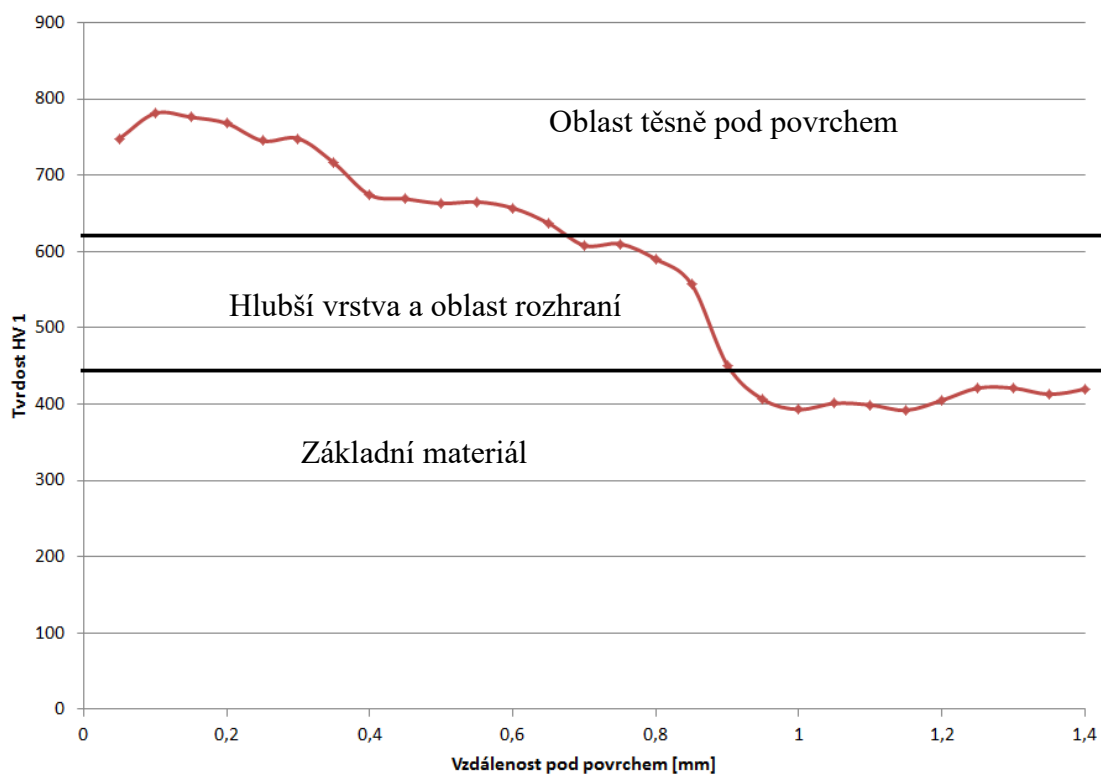


Obr. 69 Vzorek 1.20, rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu, zvětšeno 500x



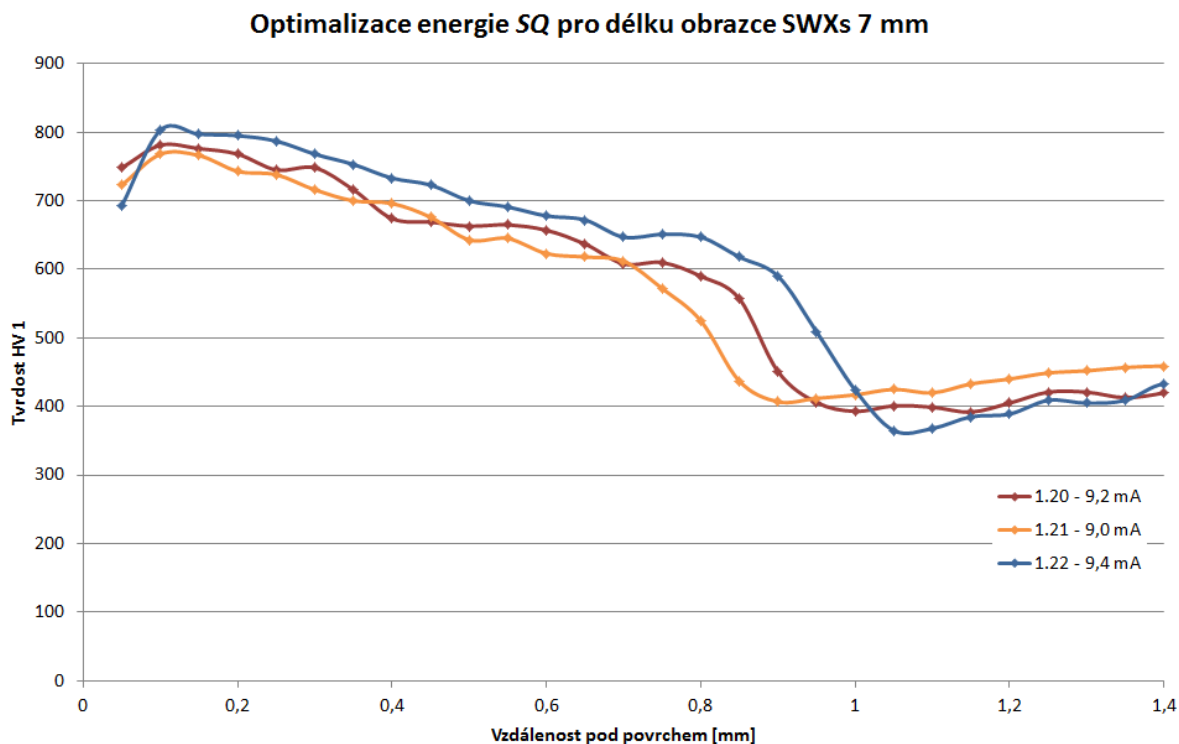
Obr. 70 Vzorek 1.20, povrch zakalené vrstvy, zvětšeno 500x

V případě vzorku 1.20 byl parametr SQ nastaven na hodnotu 9,2 mA a parametr SWXs na 7 mm oproti předchozím 5 mm. Z obr. 67 a 69 je zřejmé, že trhliny se ve struktuře vyskytují i nadále. Profil tvrdosti od povrchu do jádra vzorku 1.20 je možno pozorovat na obr. 71.



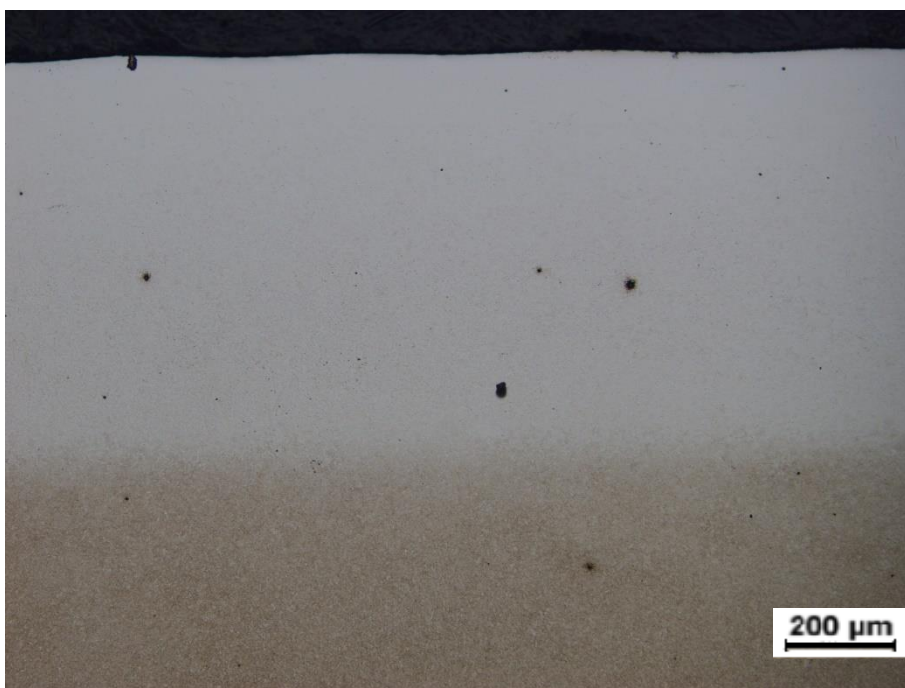
Obr. 71 Profil tvrdosti vzorku 1.20 od povrchu do jádra

Nejvyšších hodnot tvrdosti dosahovala vrstva těsně pod povrchem, kde tyto hodnoty přesahovaly 750 HV1, v hlubší vrstvě se tvrdost pohybovala okolo 650 HV1. V okolí rozhraní pak hodnota tvrdosti poklesla z 600 HV1 pod 500 HV1. Hloubka zakalené vrstvy činila 0,9 mm. Vliv parametru SQ (proud paprsku) na vlastnosti zakalené vrstvy u vzorků 1.20 až 1.22 znázorňuje obr. 72.

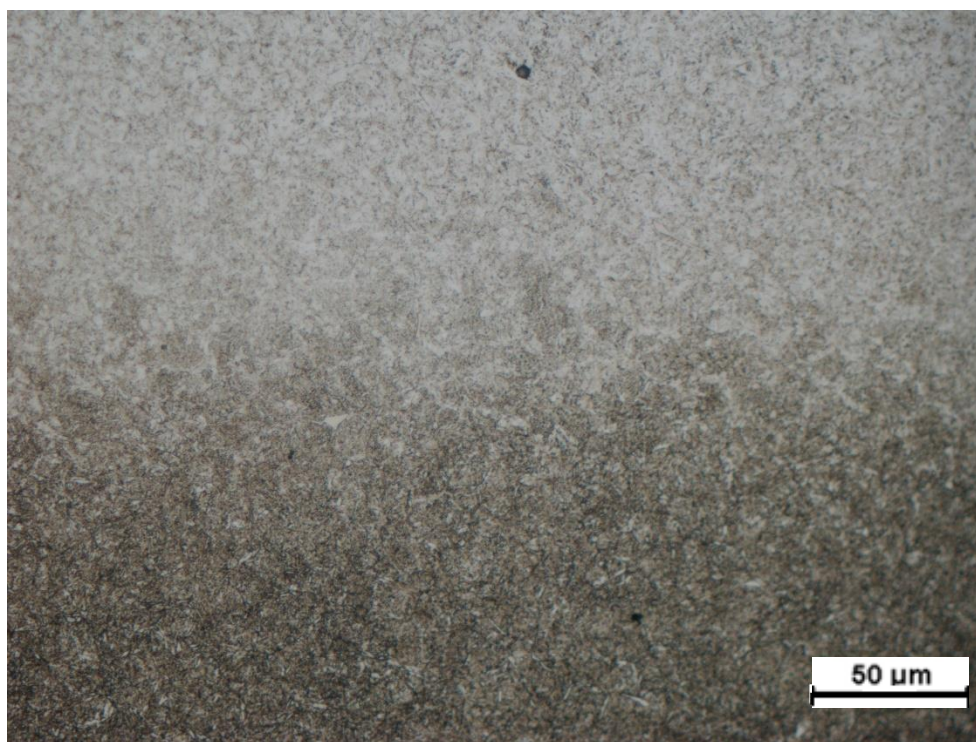


Obr. 72 Optimalizace proudu paprsku SQ pro vzorky 1.20 až 1.22

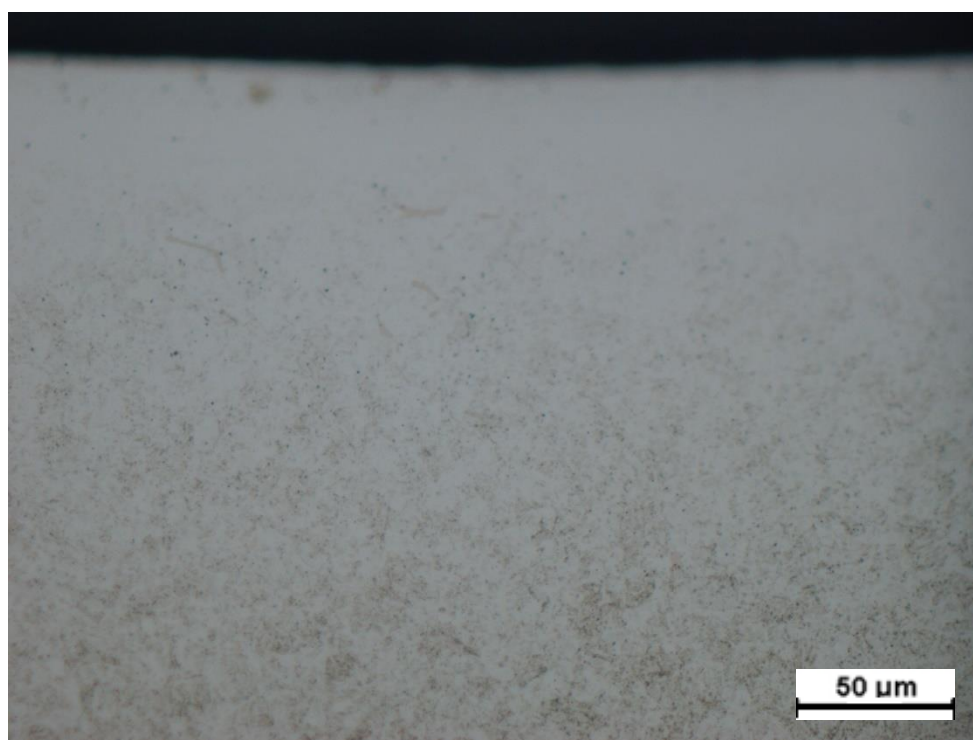
Jako poslední je zde uveden vzorek 1.26. Při tepelném zpracování tohoto vzorku byl nastaven offset na hodnotu -15 mA. Rozostření tedy bylo pod povrchem materiálu. Snímky struktury vzorku 1.26 jsou na obr. 73 až 75



Obr. 73 Vzorek 1.26, zakalená vrstva, zvětšeno 100x

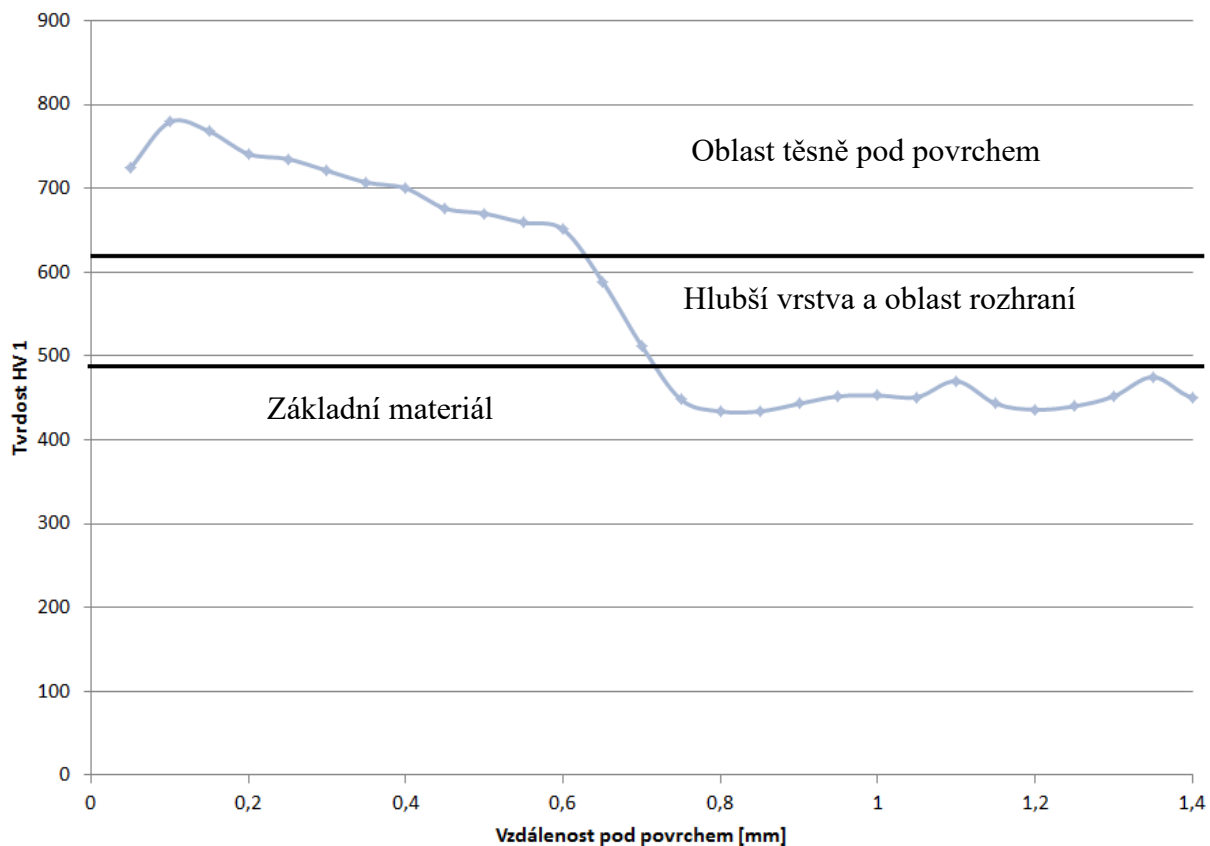


Obr. 74 Vzorek 1.26, rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu, zvětšeno 500x



Obr. 75 Vzorek 1.26, povrch zakalené vrstvy, zvětšeno 500x

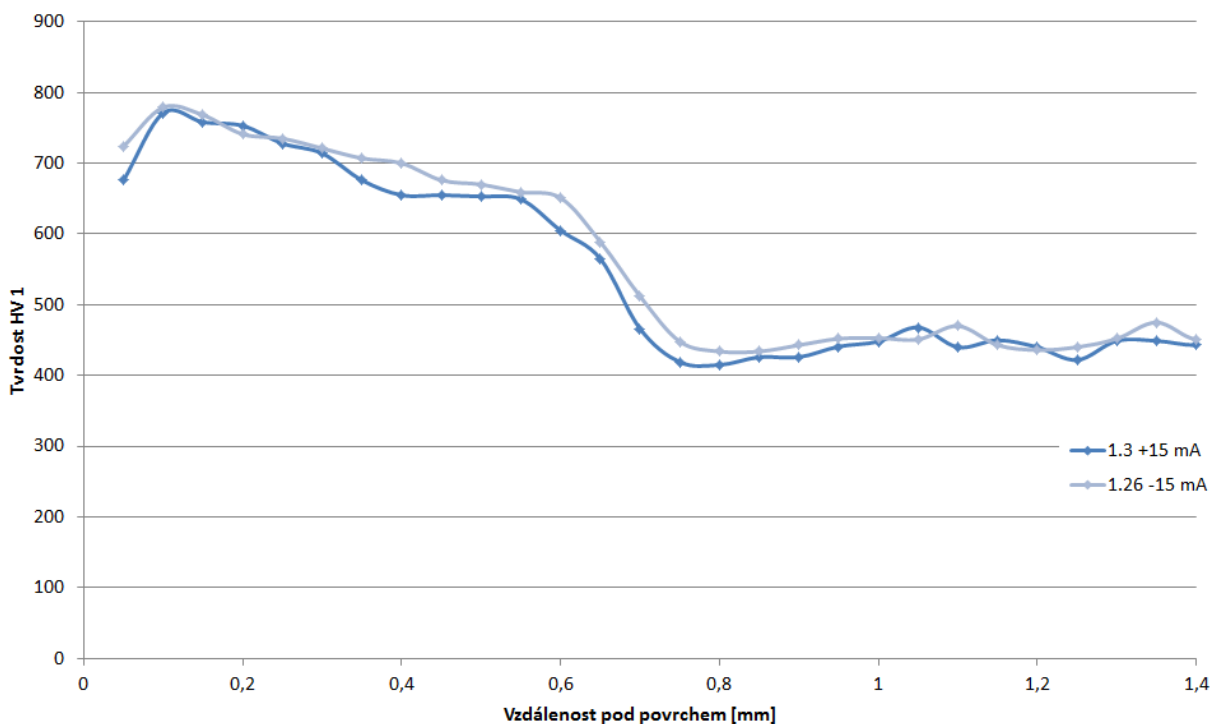
Jak je patrné z obr. 73 a 75, z hlediska výskytu trhlin došlo u vzorku 1.26 k výraznému zlepšení. Na obr. 76 je možno pozorovat profil tvrdosti vzorku 1.26. Nejvyšší tvrdost byla naměřena těsně pod povrchem. Hodnoty tvrdosti v této oblasti se pohybovaly nad 700 HV1. Hluběji v materiálu tvrdost klesala ze 700 na 600 HV1. V oblasti okolo rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu byly naměřeny hodnoty tvrdosti od 600 do 500 HV1. Zakalená vrstva měla tloušťku 0,73 mm.



Obr. 76 Profil tvrdosti vzorku 1.26 od povrchu do jádra

Jak již bylo řečeno, u tepelného zpracování vzorku 1.26 došlo ke změně offsetu. Obr. 77 ukazuje vliv této změny na vlastnosti zakalené vrstvy. Pro srovnání byl použit vzorek 1.3, u kterého byly nastaveny stejné parametry jako u vzorku 1.26 s výjimkou offsetu.

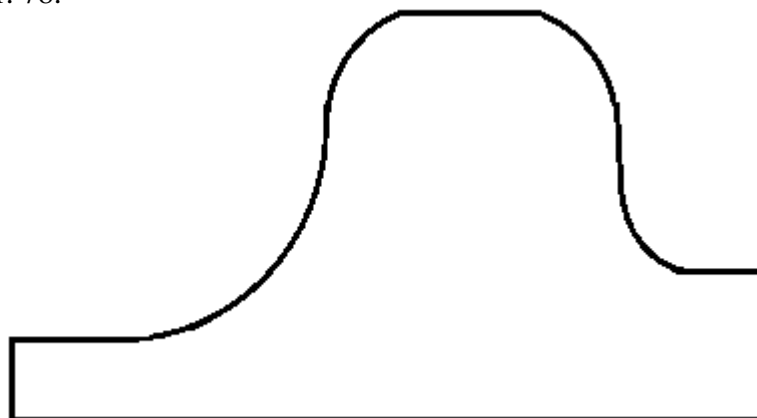
Vliv roviny ostrosti *Offset*



Obr. 77 Vliv offsetu na vlastnosti zakalené vrstvy

4.5 Aktuální experiment s nástrojovou ocelí 19 552

V rámci nejnovějšího experimentu s tepelným zpracováním povrchu oceli elektronovým svazkem, na který se zaměřuje tato práce, byla opět použita kovací zápustka vyrobená z nástrojové oceli 19 552. Tato nástrojová ocel byla již blíže popsána v jedné z předchozích podkapitol. Na zápustce se vyskytovaly zaoblené tvarové plochy, přičemž naší snahou bylo především experimentální zakalení těchto ploch. Zvláštní pozornost byla věnována tomu, jak kvalitně nebo zda vůbec bude možno dané tvarové plochy zakalit. Příklad takových ploch je vyobrazen na obr. 78.

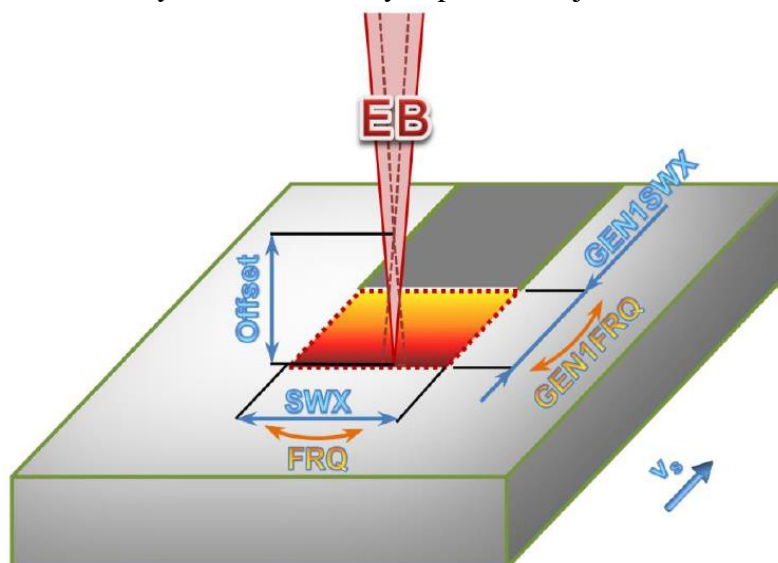


Obr. 78 Ukázka tvarové plochy na zápustce

Vodorovné plochy se nacházely v rozdílné výšce a v případě strmějších částí nebylo jisté, zda na nich bude možno vytvořit zakalenou vrstvu. Kromě tvarových ploch bylo experimentováno také na plochách rovinného charakteru.

4.5.1 Průběh experimentu a nastavené parametry

Na začátku experimentu byly nejprve stanoveny konstantní parametry, u kterých se nepředpokládá zásadní vliv na vlastnosti zakalené vrstvy nebo takové, u nichž byly již dříve určeny optimální hodnoty, a při našem experimentu nebylo třeba je měnit. Důležitými parametry, které byly změněny, byly proud paprsku SQ, fokusační proud SL, kalibrace KW, frekvence GEN1FRQ, dále rozměry SWX a GEN1SWX, rychlost posuvu a především offset. Schéma tep. zpracování s vyznačením některých parametrů je zobrazeno na obr. 79 [35].



Obr. 79 Schéma tepelného zpracování elektronovým svazkem s vyznačenými parametry [35]

Experiment probíhal tak, že elektronový paprsek nejprve přešel povrchové plochy vzorků 1 a 2, pro které byly nastaveny určité parametry. V další etapě byly některé z těchto parametrů změněny a následně byly paprskem zpracovány další dva vzorky s čísly 3 a 4. Ve třetí etapě experimentu byly provedeny další změny parametrů a elektronový svazek přecházel přes povrchové plochy vzorků 5 a 6. Celkem tedy bylo zpracováno 6 vzorků. V každé etapě byla elektronovým paprskem tepelně zpracována jedna rovinná plocha a jedna tvarová plocha se zaoblením. Vzorky s rovinnými plochami mají čísla 1, 4 a 5, vzorky s tvarovými plochami jsou označeny čísly 2, 3 a 6. Rychlost posuvu byla pro všechny vzorky ponechána na stejné hodnotě. Pro tepelné zpracování povrchů vzorků 1 a 2 byly nastaveny parametry uvedené v tab. 12.

Tab. 12 Nastavené parametry pro tepelné zpracování vzorků 1 a 2

Urychlovací napětí HV	120 kV	Proud paprsku SQ	23,7 mA
Kalibrace KW	5555	Fokusační proud SL	2346,3 mA
Rozměr SWX	7 mm	GEN1FRQ	5263,158 Hz
Posuv Fs	3 mm/s	GEN1FIG	8
Frekvence FRQ	793 Hz	GEN1SWX	40 mm
Příčný obrazec Fig	61	GEN1SWY	0 mm
Rozměr SWY	0 mm	Offset	-150 mA

Ve srovnání s předchozím experimentem byl výrazně změněn především offset. Analýza zakaleného vzorku 1.26 naznačila, že by pravděpodobně bylo vhodnější volit zápornou hodnotu defokuse. Na rozdíl od předchozích experimentů, kdy bylo u většiny vzorků ohnisko elektronového paprsku posunuto nad povrch materiálu, byla pro všechny nové experimenty nastavena poloha ohniska pod povrchem materiálu. V tomto případě byla nastavená šířka stopy zakalení 40 mm. Hodnota kalibrace KW nastavená pro zpracování vzorků 1 a 2 byla později shledána nepříliš vhodnou, jelikož byla původně nastavena pro jiný experiment a nebyla před naším experimentem optimalizována. Při experimentu s tepelným zpracováním vzorků 3 a 4 se některé parametry změnilly. Všechny nové parametry jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 13 Změněné parametry pro tepelné zpracování vzorků 3 a 4

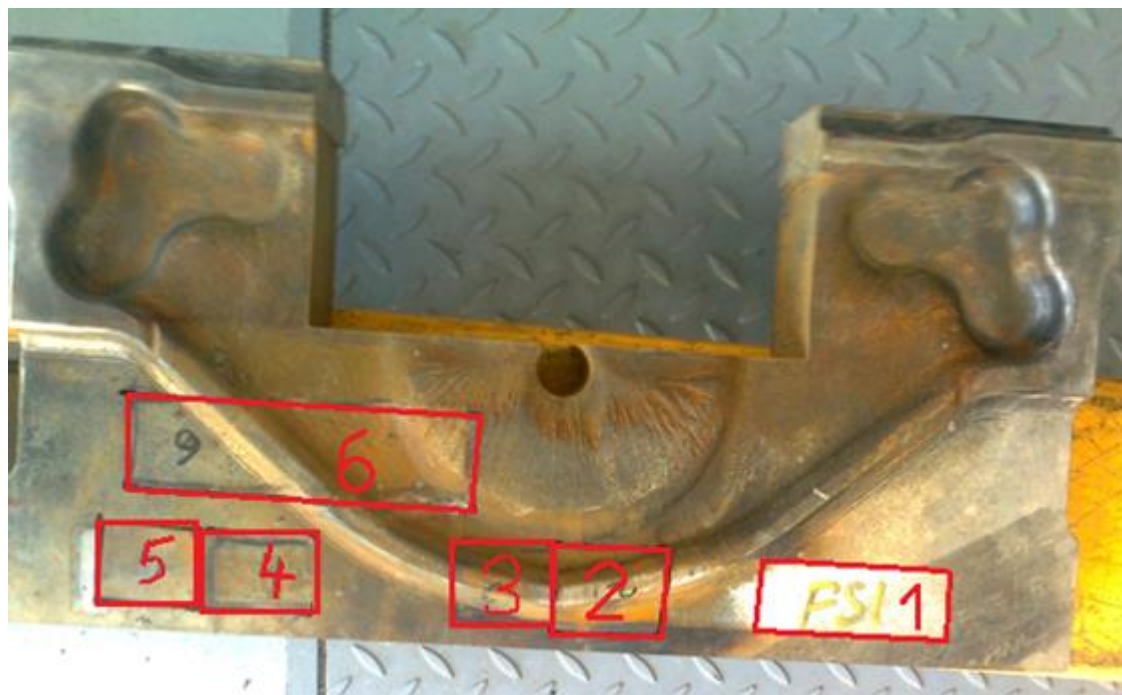
Proud paprsku SQ	GEN1SWX	Fokusační proud SL	Kalibrace KW
9,5 mA	20 mm	2417,3 mA	4819

V poslední etapě byly tepelně zpracovány vzorky 5 a 6. Parametry, které se změnilly, jsou uvedeny v tab. 14.

Tab. 14 Parametry pro vzorky 5 a 6

Proud paprsku SQ	GEN1SWX
23,7 mA	40 mm

Zápustka se zakalenými povrchovými plochami vzorků 1 až 6 je zobrazena na obr. 80 a 81.



Obr. 80 Zápustka se zakalenými povrchovými plochami vzorků 1 až 6

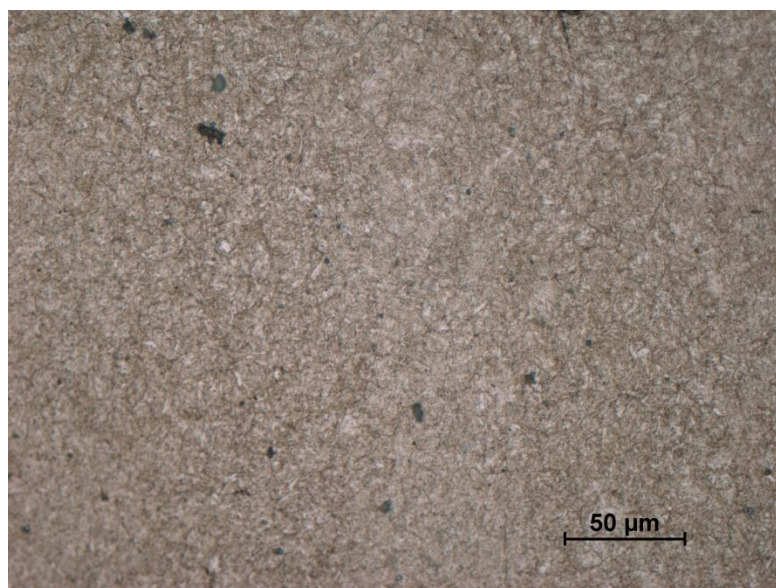


Obr. 81 Detaily vzorků 2 až 6

5 Výsledky experimentů a diskuse

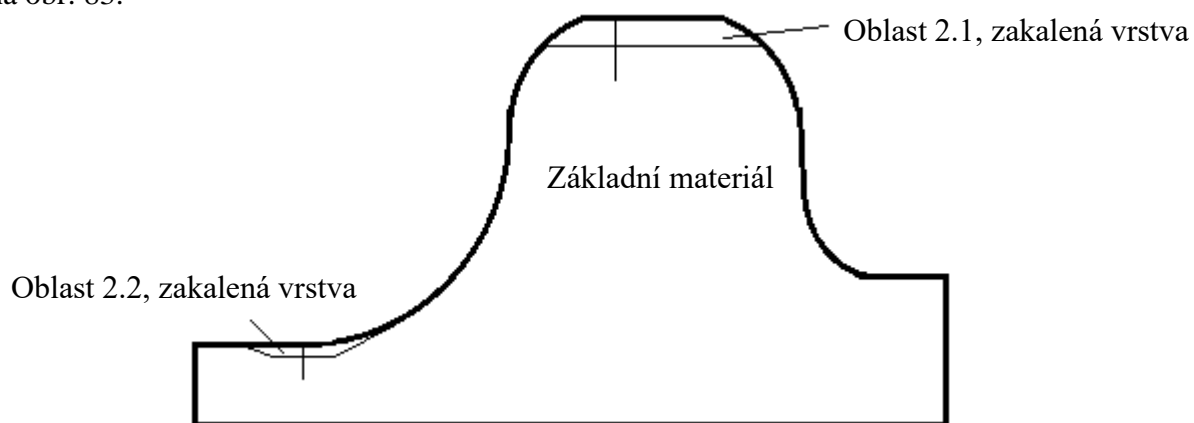
5.1 Rozbor výsledků

Po provedení experimentu jsme získali 6 vzorků, z nichž byly vybrány 4 vzorky, které byly dále analyzovány a měřeny. Jak již bylo řečeno, u vzorků 1 a 2 byl nastaven sporný parametr kalibrace KW. Rozhodli jsme se proto, že vzorek 1 nebude analyzován. Vzorek vykazoval při měření povrchové tvrdosti ručním měřidlem zajímavé hodnoty, a proto jsme se rozhodli jej analyzovat. Dále byly pro metalografickou analýzu připraveny vzorky 4, 5 a 6. Vzorek 3 vybrán nebyl, protože u něj podle vizuální kontroly došlo k natažení. Vzorky 2, 4, 5 a 6 byly vyřezány vodním paprskem, takže u nich nedošlo k tepelnému ovlivnění. Byly zhotoveny výbrusy a provedena metalografická analýza. Snímek struktury základního materiálu vzorku 2 je zachycen na obr. 82. Struktura je tvořena vysokoteplotně popuštěným martenzitem (sorbit).



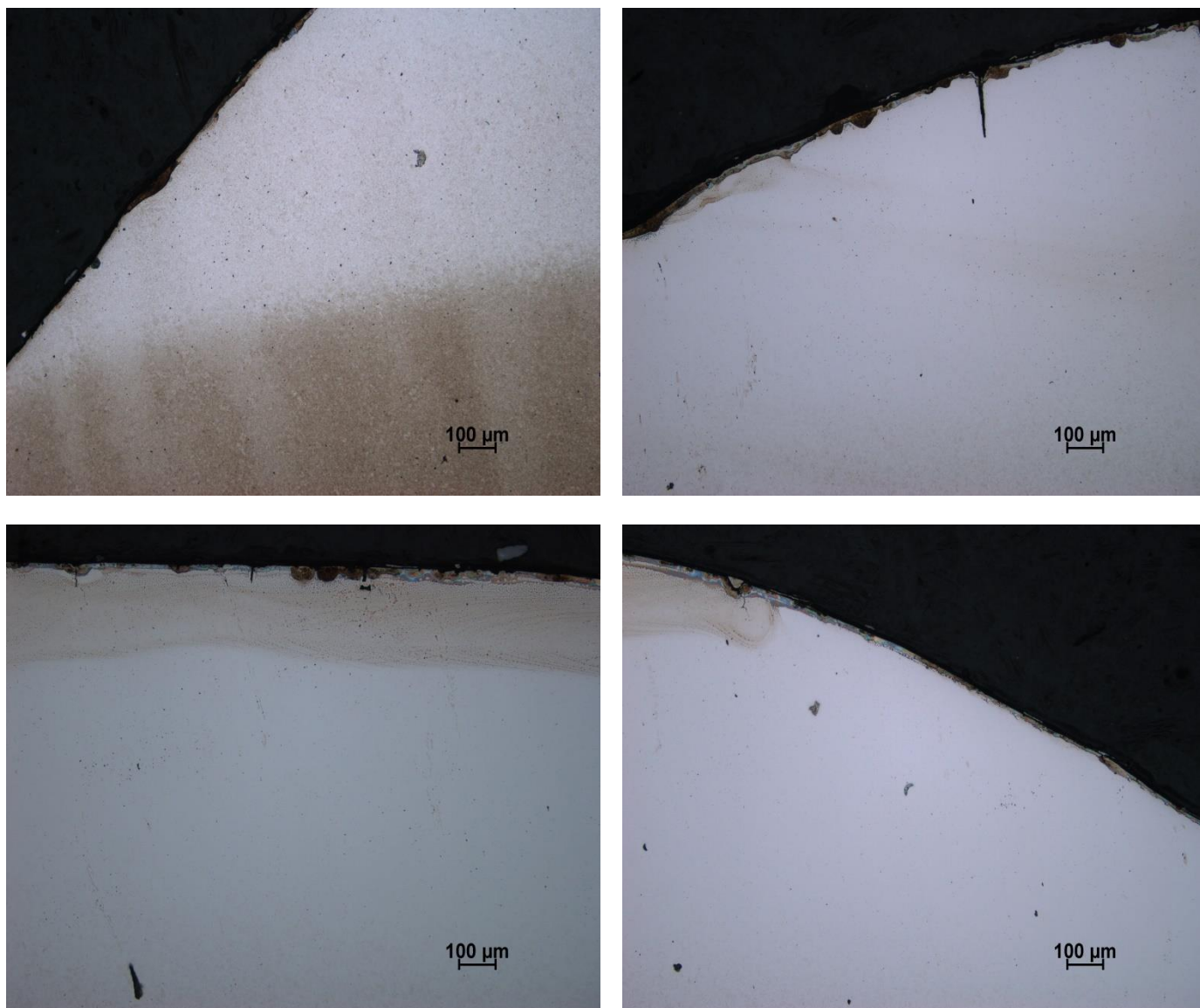
Obr. 82 Vzorek 2, základní materiál, zvětšeno 500x

Další snímky byly pořízeny z oblastí vyznačených na obr. 83. Tenké čáry označují hranici zakalené vrstvy, čáry směřující kolmo k povrchu přibližně značí řadu bodů určenou při měření profilu tvrdosti na tvrdoměru. Některé plochy vzorku 2 nebyly elektronovým paprskem zakaleny. Jedná se zejména o nejstrmější, téměř svislé plochy, které je možno vidět na obr. 83.

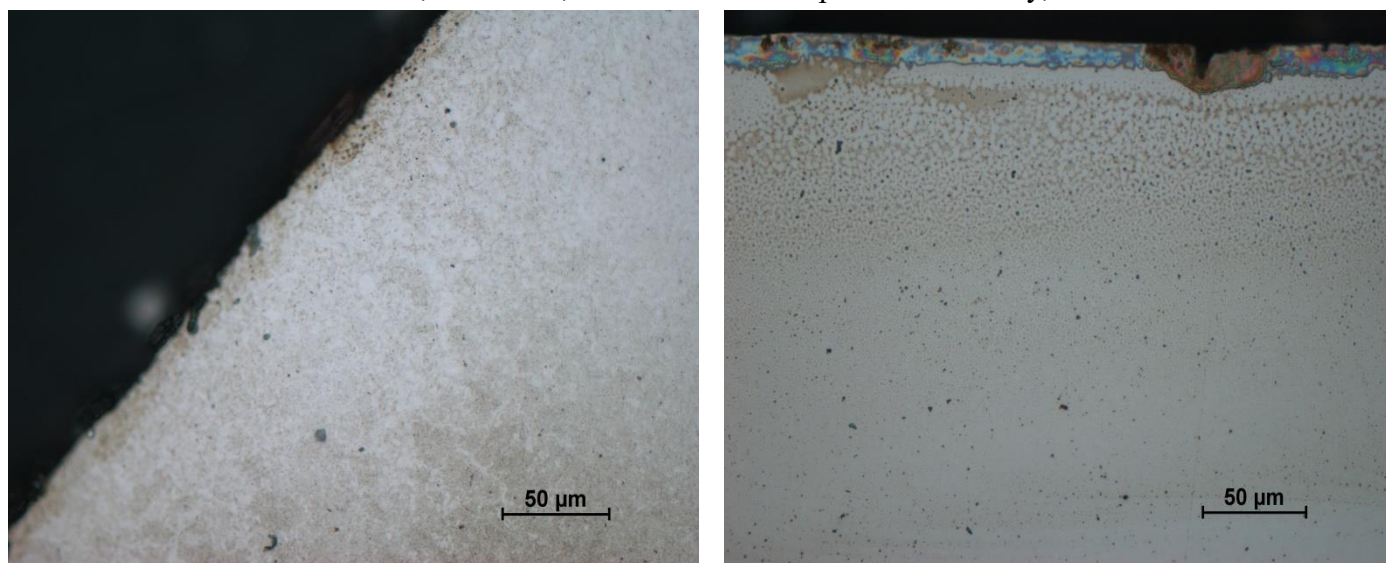


Obr. 83 Schéma s vyznačením pozorovaných oblastí a řady bodů pro měření profilu tvrdosti

Následují snímky struktury z oblasti 2.1, které je možno vidět na obr. 84 a 85

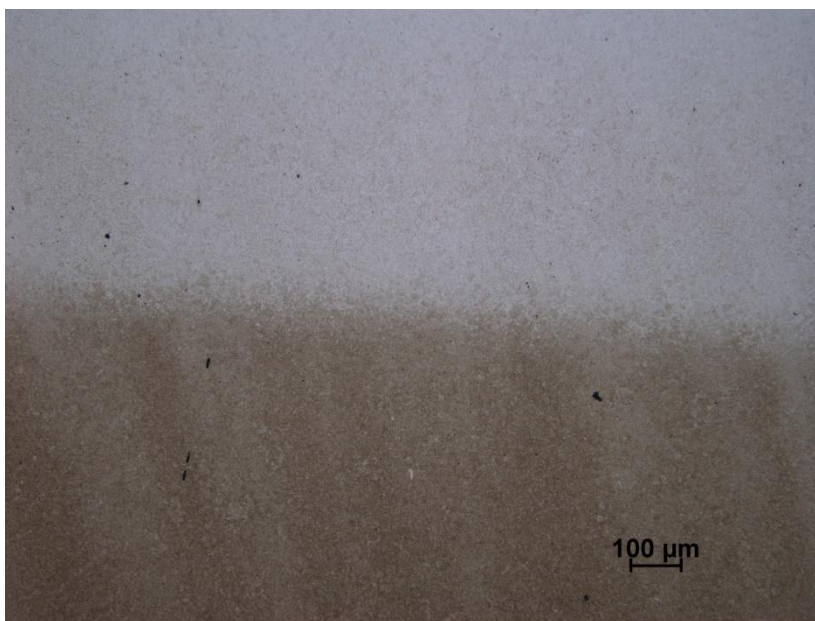


Obr. 84 Vzorek 2, oblast 2.1, struktura zakalené povrchové vrstvy, zvětšeno 100x

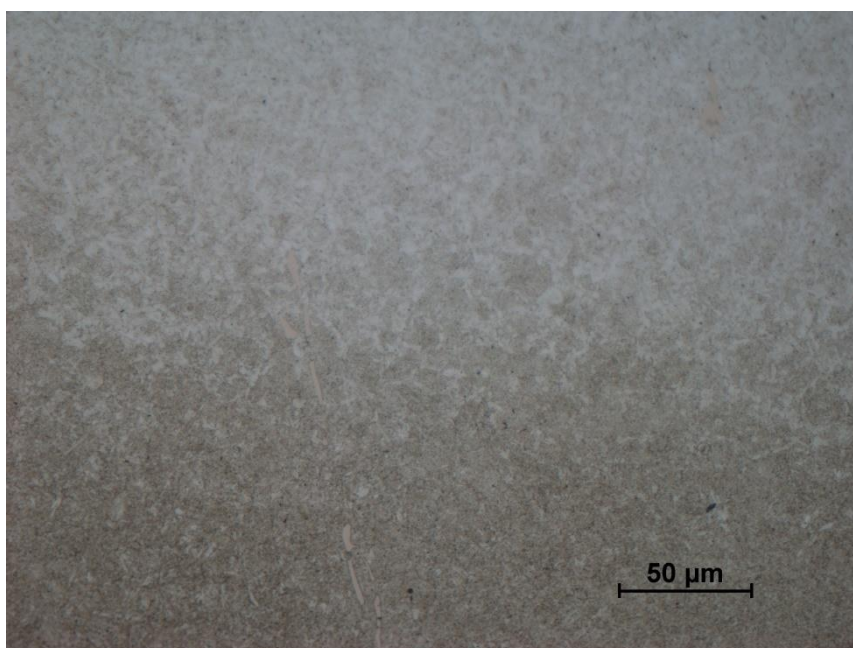


Obr. 85 Vzorek 2, oblast 2.1, struktura zakalené povrchové vrstvy, zvětšeno 500x

Velice jemná struktura zakalené povrchové vrstvy vzorku 2 na obr. 84 a 85 je tvořena martenzitem. Ve struktuře jsou přítomny ojedinělé trhliny, u kterých se však domníváme, že byly s největší pravděpodobností vytvořeny již dříve v důsledku tepelného namáhání a dle našich předpokladů patrně nemají souvislost s aktuálním tepelným zpracováním. Na obr. 86 a 87 je možno vidět snímky rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu vzorku 2.

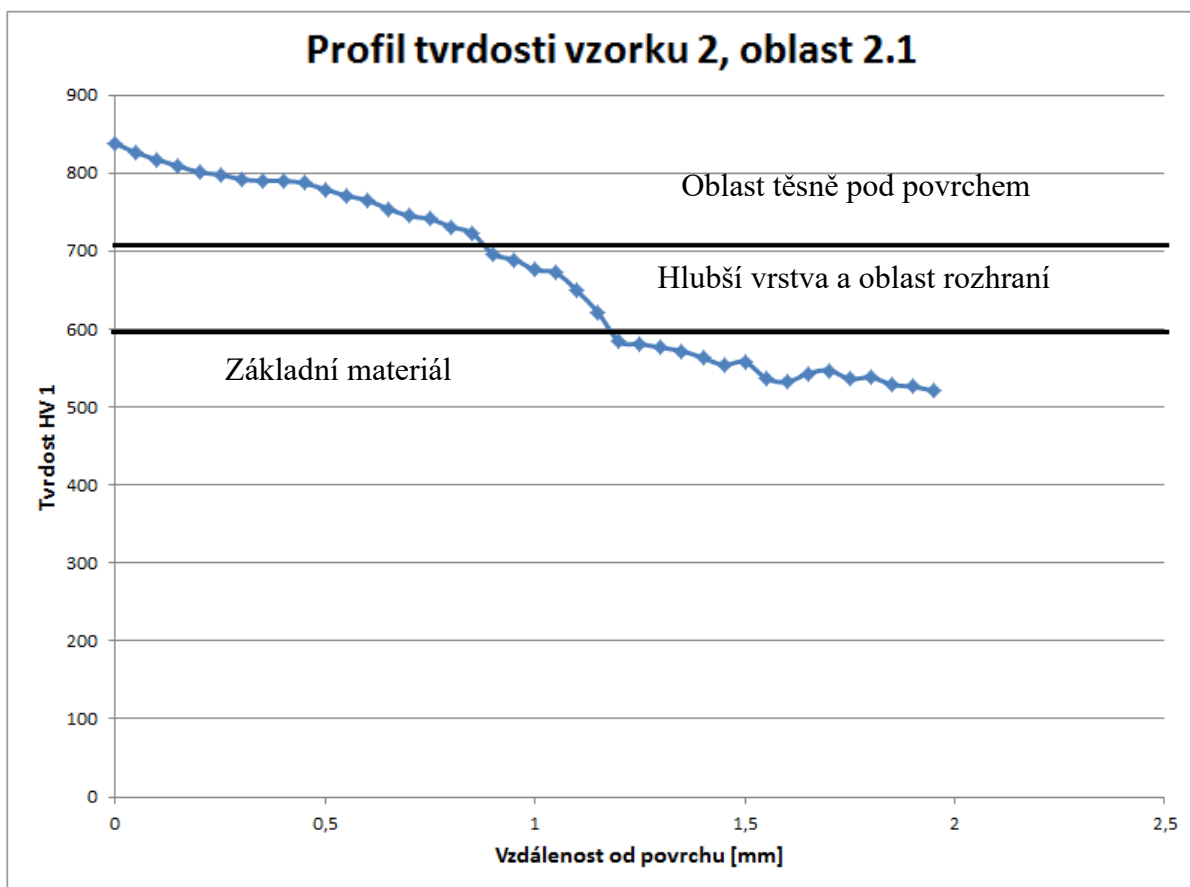


Obr. 86 Vzorek 2, oblast 2.1, rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu, zvětšeno 100x



Obr. 87 Vzorek 2, oblast 2.1, rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu, zvětšeno 500x

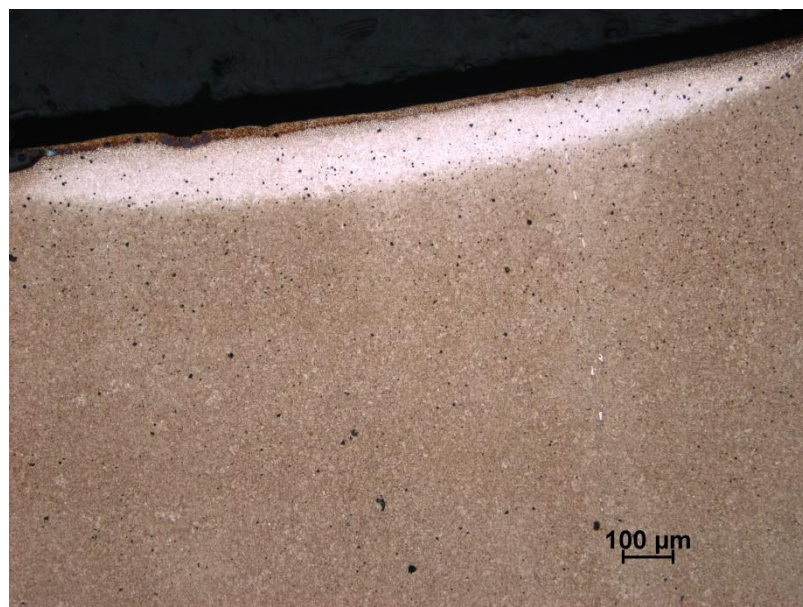
Na obr. 86 a 87 je možno pozorovat rozhraní velmi jemné martenzitické struktury zakalené vrstvy a struktury základního materiálu tvořené vysokoteplotně popuštěným martenzitem. V oblasti 2.1 u vzorku 2 bylo dosaženo maximální tloušťky zakalené vrstvy 1,2 mm. Naměřený profil tvrdosti z oblasti 2.1 je zobrazen na obr. 88.



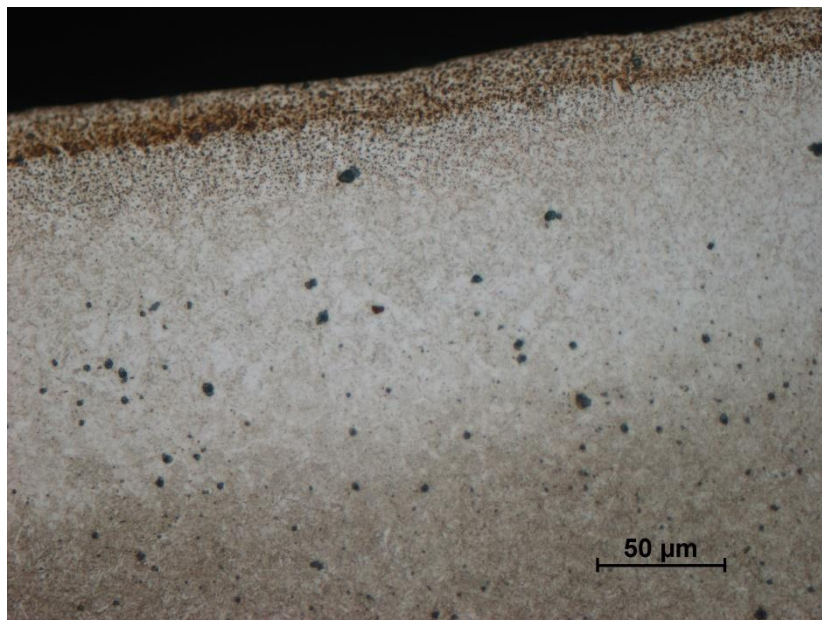
Obr. 88 Profil tvrdosti vzorku 2, oblast 2.1

Vůbec nejvyšší zaznamenaná hodnota tvrdosti byla naměřena těsně pod povrchem a činila 838 HV1. Hodnoty tvrdosti v těsně podpovrchové vrstvě se pohybovaly mezi 800 až 700 HV1. Ve hlubší vrstvě a v okolí rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu klesala tvrdost ze 700 HV1 na 600 HV1.

Následující snímky struktury pocházejí z oblasti 2.2. Tato oblast se nacházela v menší výšce než oblast 2.1. Snímky je možno pozorovat na obr. 89 a 90

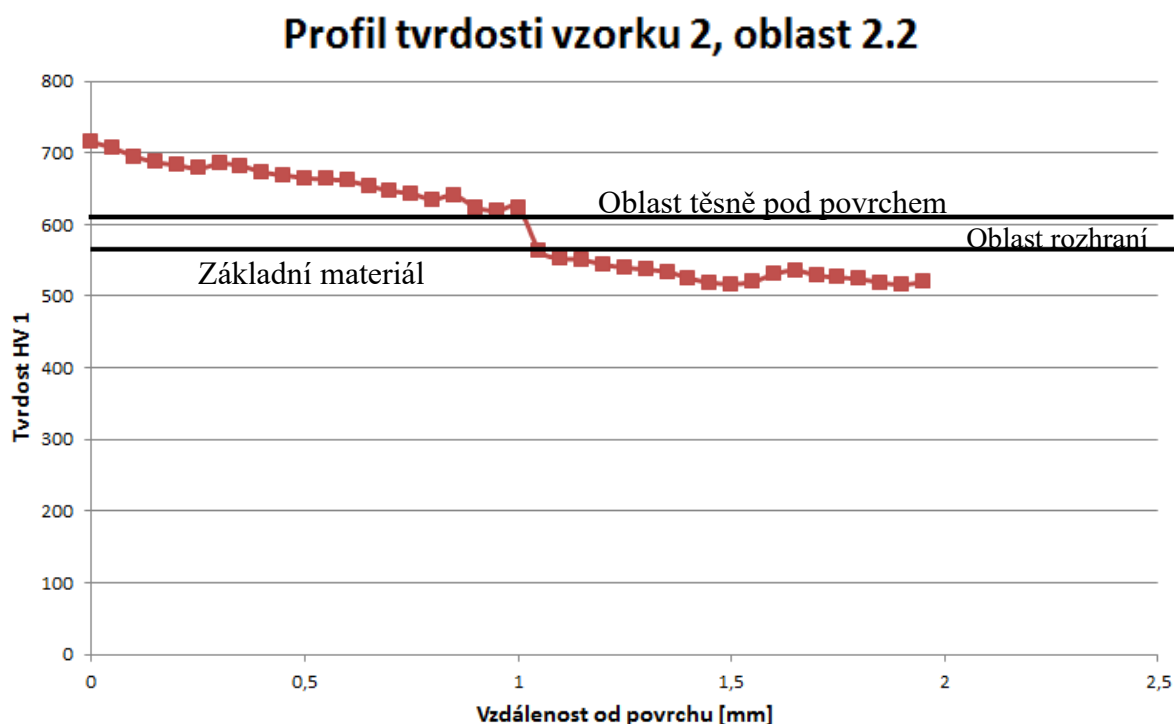


Obr. 89 Vzorek 2, oblast 2.2, struktura zakalené povrchové vrstvy a rozhraní, zvětšeno 100x



Obr. 90 Vzorek 2, oblast 2.2, struktura zakalené povrchové vrstvy a rozhraní, zvětšeno 500x

Na obr. 89 a 90 můžeme pozorovat velmi jemnou martenzitickou strukturu zakalené vrstvy a rozhraní této vrstvy a základního materiálu, jehož struktura je tvořena vysokoteplotně popuštěným martenzitem neboli sorbitem. V oblasti 2.2 nebyly pozorovány žádné trhliny. Dle předpokladu je zřejmé, že nižší poloha oblasti 2.2 se projevila na tloušťce zakalené vrstvy. Její maximální hodnota v případě oblasti 2.2 činila 1,05 mm. Obr. 91 ukazuje naměřený profil tvrdosti pro oblast 2.2



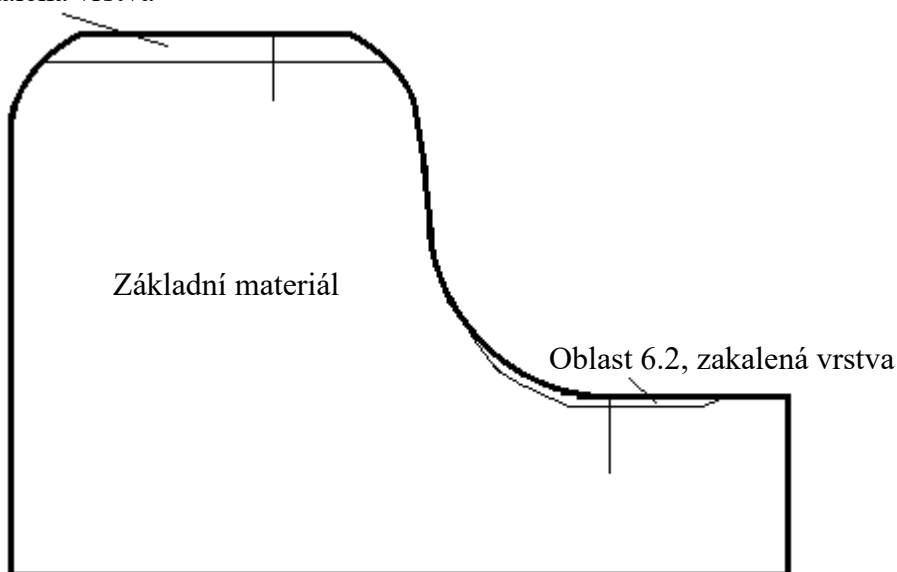
Obr. 91 Profil tvrdosti vzorku 2, oblast 2.2

Maximální hodnota tvrdosti činila 715 HV1 a byla naměřena těsně pod povrchem. Dále od povrchu se tvrdost pohybovala od 700 HV1 do 600 HV1. V blízkosti rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu pak nastal pokles na hodnotu 564 HV1.

Po analýze a měření tvrdosti vzorků 4 a 5 bylo zjištěno, že povrchy těchto vzorků nebyly zakaleny. Na mikroskopu nebyla patrná žádná zakalená vrstva. Struktura byla tvořena vysokoteplotně popuštěným martenzitem v celém materiálu vzorků. Hodnoty naměřené na tvrdoměru rovněž neprokázaly žádnou zvýšenou tvrdost na povrchu oproti základnímu materiálu vzorků. Z tohoto důvodu zde tedy nebudou snímky a profily tvrdosti vzorků 4 a 5 dále uváděny.

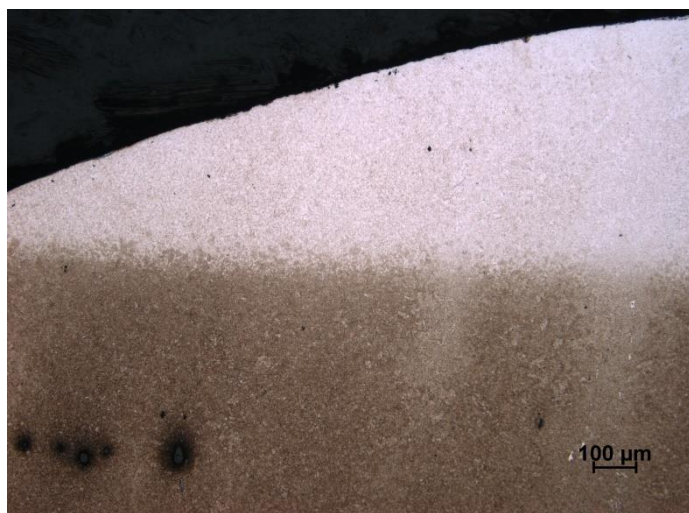
Vzorek 6 s tvarovou plochou byl tepelně zpracován s takovými nastavenými parametry, které byly na rozdíl od vzorku 2 všechny optimalizovány. Podobně jako u vzorku 2 byly i u vzorku 6 pořízeny snímky struktury za dvou oblastí. Totéž pak platí i pro profily tvrdosti. Schéma je vyobrazeno na obr. 92.

Oblast 6.1, zakalená vrstva

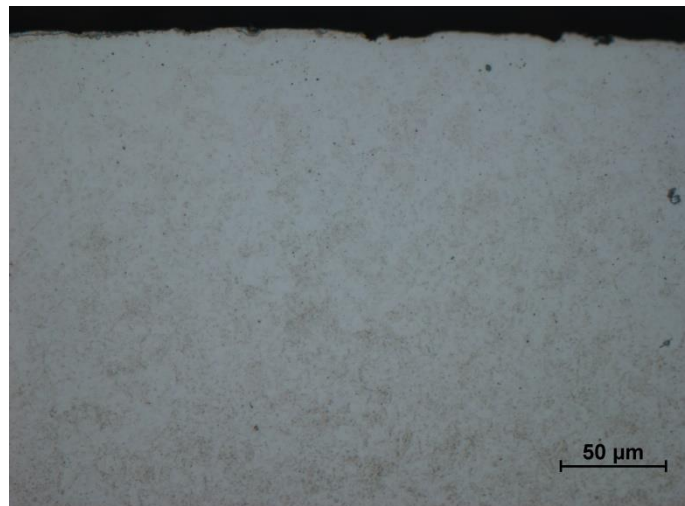
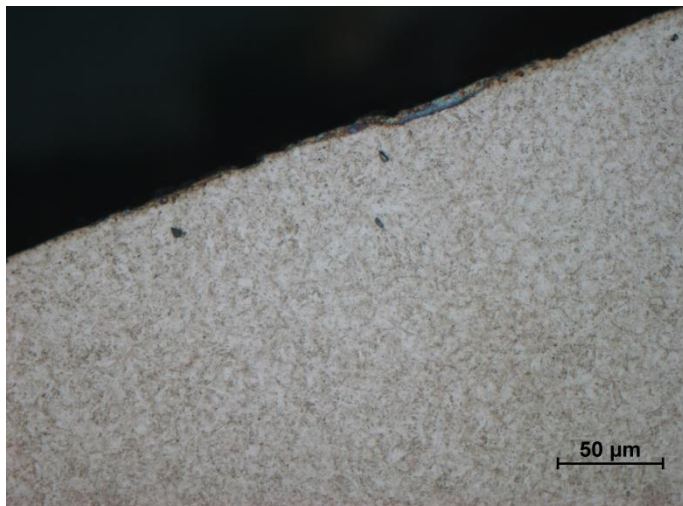


Obr. 92 Schéma vzorku 6 s vyznačením pozorovaných oblastí a řady bodů pro měření profilu tvrdosti

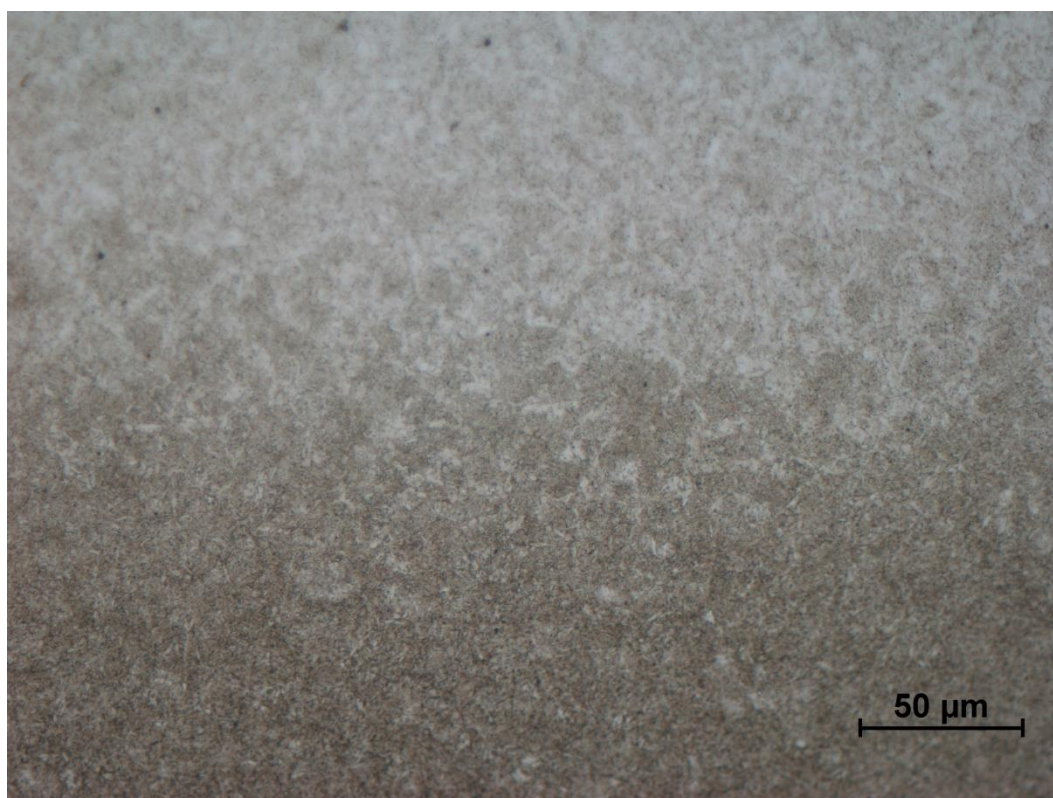
Na obr. 93 až 95 je možno pozorovat strukturu zakalené vrstvy v oblasti 6.1 u vzorku 6. Podobně jako v případě vzorku 2, nebyly u vzorku 6 zakaleny některé velmi strmé až téměř svislé plochy.



Obr. 93 Vzorek 6, oblast 6.1, struktura zakalené povrchové vrstvy, zvětšeno 100x

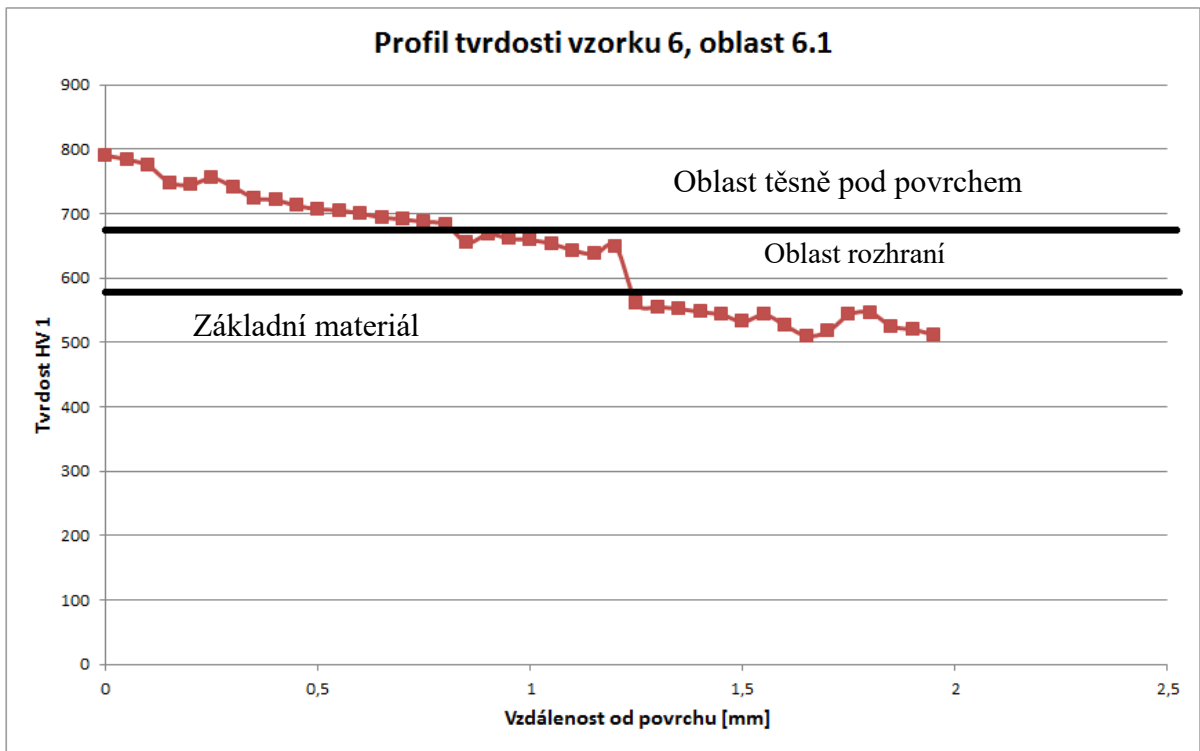


Obr. 94 Vzorek 6, oblast 6.1, struktura zakalené povrchové vrstvy, zvětšeno 500x



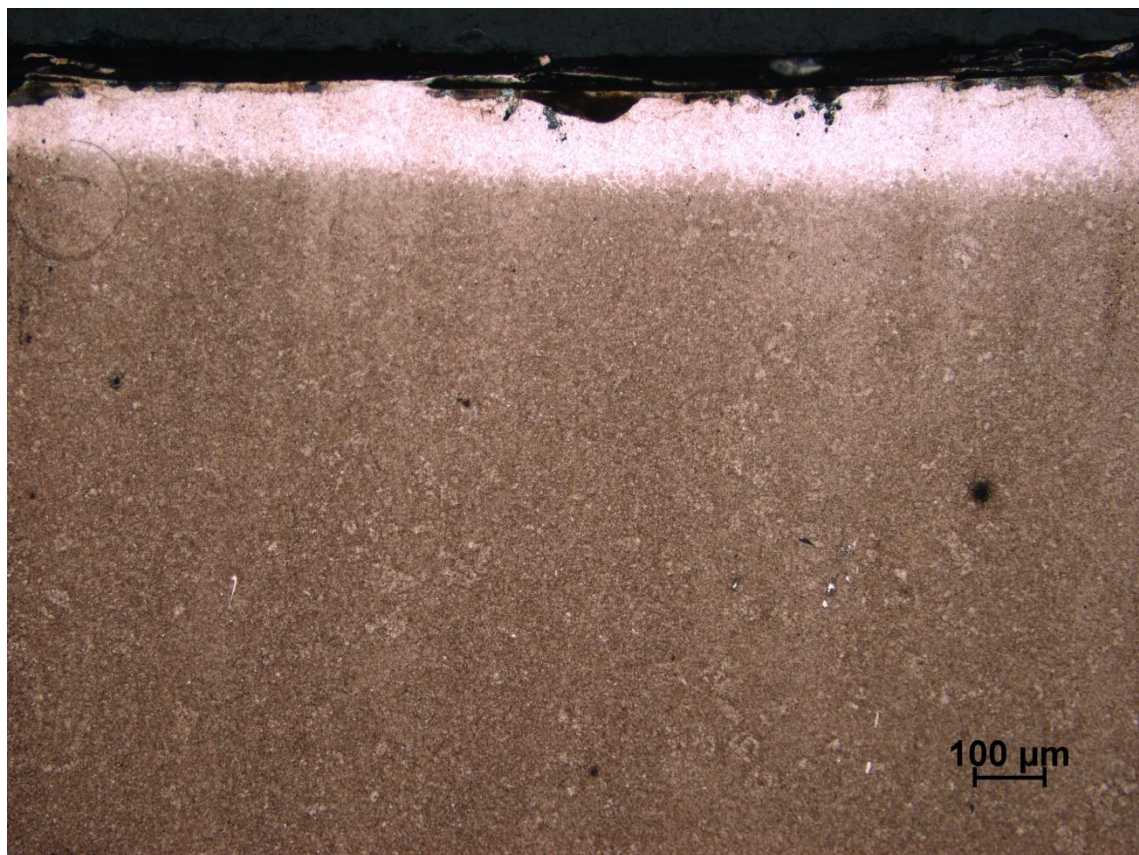
Obr. 95 Vzorek 6, oblast 6.1, rozhraní zakalené vrstvy a základního materiálu, zvětšeno 500x

Z obr. 93 až 95 je zřejmé, že v oblasti 6.1 byla vytvořena velmi jemná martenzitická struktura. Výskyt trhlin ve struktuře nebyl při prohlídce na mikroskopu převážně zaznamenán. Pouze v ojedinělých případech byly pozorovány trhliny, u kterých podobně jako u vzorku 2 předpokládáme, že jejich vznik je již staršího data. S velmi vysokou pravděpodobností se domníváme, že kalení elektronovým svazkem v tomto případě nezavinilo vznik trhlin a že trhliny byly přítomny už předtím. Příčinou jejich vzniku by zřejmě mělo být tepelné namáhání, ke kterému došlo dříve. Maximální tloušťka zakalené vrstvy činila 1,2 mm tedy podobně jako u vzorku 2 v oblasti 2.1. Profil tvrdosti vzorku 6 v oblasti 6.1 je zobrazen na obr. 96. Nejvyšší naměřená tvrdost činila 790 HV1 a byla naměřena těsně pod povrchem. V podpovrchové vrstvě se pak hodnota tvrdosti snižovala ze 750 HV1 pod 700 HV1. V okolí rozhraní tvrdost klesala z 650 HV1 pod 600 HV1.

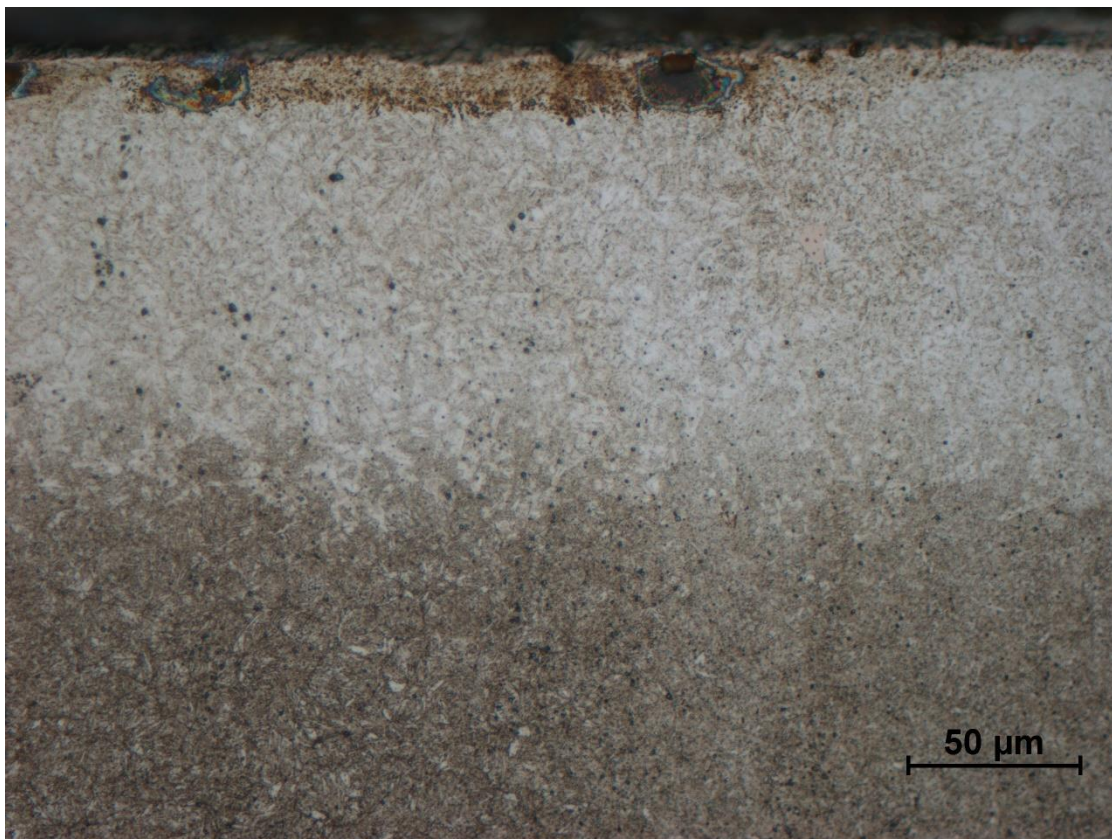


Obr. 96 Profil tvrdosti vzorku 6, oblast 6.1

Dále následují snímky struktury z oblasti 6.2. Podobně jako v případě vzorku 2 se oblast 6.2 nacházela v nižší poloze než oblast 6.1. Snímky struktury zobrazují obr. 97 a 98.



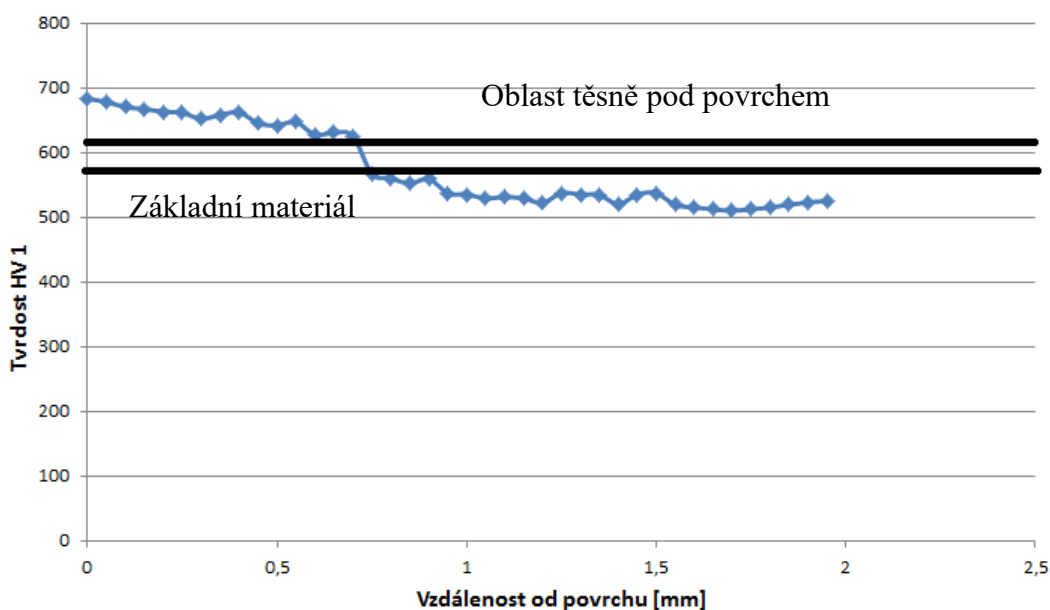
Obr. 97 Vzorek 6, oblast 6.2, struktura zakalené povrchové vrstvy a rozhraní, zvětšeno 100x



Obr. 98 Vzorek 6, oblast 6.2, struktura zakalené povrchové vrstvy a rozhraní, zvětšeno 500x

Jemná martenzitická struktura, kterou je možno pozorovat na obr. 97 a 98 s největší pravděpodobností nevykazuje trhliny, které by byly způsobeny aktuálním tepelným zpracováním. Můžeme pozorovat zřetelné rozhraní martenzitické struktury zakalené vrstvy a struktury základního materiálu tvořené vysokoteplotně popuštěným martenzitem. Rozdílná výška polohy oblasti 6.2 oproti poloze oblasti 6.1 se pravděpodobně projevila nižší tloušťkou zakalené vrstvy v oblasti 6.2. Rozdíl byl značný, jelikož maximální tloušťka zakalené vrstvy v oblasti 6.2 činila 0,7 mm. Profil tvrdosti vzorku 6 v oblasti 6.2 zobrazuje obr. 99.

Profil tvrdosti vzorku 6, oblast 6.2



Obr. 99 Profil tvrdosti vzorku 6, oblast 6.2

Maximální tvrdost naměřená těsně pod povrchem činila 683 HV1. Ve větší hloubce pod povrchem pak tvrdost postupně klesala až k hodnotě 625 HV1. V oblasti rozhraní pak tvrdost poklesla na 567 HV1.

5.2 Rozbor míry zakalení vzorků

Ze 4 zkoumaných vzorků se 2 vzorky nezakalily. Jednalo se o vzorky s rovinnými plochami 4 a 5. Domníváme se, že elektronový paprsek některé části těchto vzorků tepelně zpracovat mohl, avšak při přípravě vzorků byly zřejmě odřezány takové plochy, které zakaleny nebyly. Pro možnost zakalení některých částí vzorků 4 a 5 svědčí úspěšné tepelné zpracování oblastí 2.2 a 6.2, u kterých sice byla zakalená vrstva tenčí, ale každopádně byla vytvořena. Povrchy vzorků 4 a 5 se nacházely ve stejné výšce jako oblasti 2.2 a 6.2 a jelikož přes tyto povrchy elektronový paprsek zaručeně procházel, je nejpravděpodobnějším vysvětlením zmíněné odřezání a příprava výbrusů u takových částí plochy, které zůstaly elektronovým paprskem nedotčeny.

V případě vzorků s tvarovou plochou 2 a 6 je nutno zamyslet se nad nezakalením některých ploch. Jednalo se o takové plochy, které byly velice strmé až téměř svislé. Předpokládaným důvodem nezakalení těchto ploch je pravděpodobně nízká intenzita energie v daných místech při tepelném zpracování. Pokud bychom chtěli zakalit i zmíněné strmé plochy bylo by zapotřebí zvýšit intenzitu energie a případně také vhodně natočit vzorek pro tepelné zpracování. Takové natočení by mělo být na zařízení PROBEAM K26 možné. Domníváme se, že zcela svislé plochy však zakalit nelze.

5.3 Rozbor vlivu parametrů

Nový experiment byl prováděn se značně odlišným nastavením parametru offset oproti předchozímu experimentu se stejným materiálem. V rámci předchozího experimentu byl tento parametr většinou nastavován na hodnotu +15 mA, případně 0 mA či -15 mA. Nastavení na hodnotu -15 mA naznačilo, že záporná hodnota offsetu, tedy rozostření pod povrchem materiálů, by pravděpodobně mohla být správnou cestou, protože u vzorku s takovýmto offsetem došlo k výraznému zlepšení z hlediska výskytu trhlin. Přestože oproti minulému experimentu byly změněny i jiné parametry, které mohly mít na vlastnosti zakalené vrstvy vliv, je možno konstatovat, že se záporná hodnota offsetu -150 mA by patrně měla být optimálním nastavením. Ve strukturách zakalených elektronovým svazkem sice byly pozorovány trhliny, avšak máme za to, že tyto trhliny byly s největší pravděpodobností vytvořeny již dříve důsledkem tepelného namáhání. S naším experimentem s tepelným zpracováním by podle našich předpokladů zřejmě neměly mít souvislost.

Parametr posuvu F_s byl nastaven na hodnotu 3 mm/s pro všechny vzorky. V oblastech 2.1, resp. 6.1 u vzorků 2, resp. 6 jsme získali poměrně hluboké vrstvy o maximální tloušťce 1,2 mm. Již dříve bylo zjištěno, že parametr F_s má určitý vliv na hloubku zakalené vrstvy. Při nižších rychlostech posuvu dochází k delší expozici povrchové plochy vzorku a v důsledku toho vzniká hlubší zakalená vrstva. Vzhledem k tloušťce vrstev v oblastech 2.1 a 6.1 lze říci, že nastavená hodnota parametru posuvu F_s je pravděpodobně optimální.

Pro tepelné zpracování vzorků 1 a 2 byl nastaven parametr kalibrace KW na hodnotu 5555. Toto nastavení zůstalo po jiné operaci, která zde není uvedena. Parametr KW tedy nebyl optimalizován pro první etapu našeho experimentu. Předpokládali jsme, že nevhodně nastavený parametr KW bude mít negativní vliv na vlastnosti zakalených vrstev. Vzorek 1 proto nebyl dále analyzován, avšak vzorek 2 v oblasti 2.1 vykazoval příznivé hodnoty povrchové tvrdosti, poměrně hlubokou zakalenou vrstvu a v jemné martenzitické strukturu

nebyly pravděpodobně přítomny trhliny způsobené tepelným zpracováním. Pro další etapy experimentu již byla nastavena optimalizovaná hodnota kalibrace 4819. Lze však konstatovat, že rozdíl hodnot parametru KW neměl zásadní vliv na vlastnosti zakalené vrstvy.

Z hlediska vlivu parametru GENISWX, který udává šířku kalící stopy, jsme dospěli k závěru, že nově nastavená hodnota 40 mm mohla mít vliv na prohloubení zakalené vrstvy. Srovnání jsme provedli se vzorky z předchozího experimentu, kde byla šířka stopy konstantně nastavena na 20 mm. Hloubka zakalené vrstvy v oblastech 2.1 a 6.1 nových vzorků byla větší než v případech předchozích vzorků.

V případě vzorků, jejichž povrchové plochy byly úspěšně zakaleny, byl nastaven parametr proudu paprsku SQ na hodnotu 23, 7 mA. Tato hodnota byla vyšší než hodnoty SQ nastavované během předchozího experimentu. Při vyhodnocování výsledků předchozího experimentu se ukázalo, že proud paprsku SQ může mít vliv na tvrdost zakalené vrstvy. Na rozdíl od předchozího experimentu však předpokládáme, že tentokrát nebyly ve struktuře vzorku trhliny způsobené tepelným zpracováním. Při předchozím experimentu neměly změny parametru SQ žádný zásadní vliv na výskyt trhlin ve struktuře. Tento fakt nasvědčuje možnému vlivu parametru offset na přítomnost trhlin.

6 Závěr

Tato práce byla zaměřena na povrchové zpracování vybraných ocelí pomocí elektronového svazku. Cílem bylo provést tepelné zpracování povrchu vybrané oceli elektronovým svazkem a vyhodnotit výsledky. V rámci experimentální části této práce byly provedeny experimenty s tepelným zpracováním povrchových vrstev kovací zápusky vyrobené z oceli 19 552. Experimenty byly provedeny jak na rovinných plochách, tak na plochách tvarového charakteru.

Na dvou vzorcích s tvarovými plochami byly vytvořeny poměrně hluboké zakalené vrstvy s relativně vysokými hodnotami tvrdosti bez natavení povrchu. Struktura zakalených vrstev odpovídala předpokladům. Zvláštní pozornost byla věnována parametrům, které byly při experimentech na zařízení elektronového svazku nastaveny. Zkoumán byl především vliv míry defokusace, rychlosti posuvu, šířky kalící stopy a proudu paprsku. Domnívám se, že hodnoty parametrů nastavené při tomto experimentu by mohly být považovány za optimální.

Z hlediska výskytu trhlin ve struktuře se domnívám, že je možno výsledky aktuálního experimentu považovat za příznivé. U předchozích experimentů se ve strukturách vzorků nacházely četné trhliny vzniklé v důsledku tepelného zpracování elektronovým paprskem. V případě nového experimentu se ve strukturách vzorků sice také nacházely ojedinělé trhliny, avšak ty byly podle mých předpokladů vytvořeny již dříve a s největší pravděpodobností neměly souvislost s aktuálním experimentem.

7 Seznam použité literatury

- [1] FISCHER, G. *Fischer-Elektronenstrahl* [online]. Berlin [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <http://www.fischer-elektronenstrahl.com/>
- [2] ZOBAČ, M. *Řízení a diagnostika elektronového svazku pro pokročilé technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s. 158. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.
- [3] *Cathode ray* [online]. Poslední revize 9.2.2011 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cathode_ray
- [4] ZOBAČ, M. *Elektronový svazek v technologiích* [online]. 2010, poslední revize 29.1.2010 [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/elektronovy-svazek-v-technologiich>
- [5] *Design of an electron beam generator* [online]. 2006 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <http://www.steigerwald-eb.de/en/eb-technology/electron-beam-generator.html>
- [6] *Electron beam generators EBOGEN* [online]. 2006 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <http://www.steigerwald-eb.de/en/machines/generators.html>
- [7] HALLIDAY, D., WALKER, J., RESNICK, R. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: VUTIUM, 2000, vii, 890-[1064] s. ISBN 80-214-1868-0.
- [8] 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.
- [9] *Elektronová mikroskopie* [online]. 2008 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: http://www.paru.cas.cz/lem/bak/1_2.htm
- [10] ŘÍČAN, D. *Struktura a vlastnosti průvaru oceli AMS 5659 vytvořeného elektronovým svazkem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 104 s., 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Miloslav Kouřil, CSc.
- [11] VOLKER, A., CLAUB, U., DOBENECK, D., KRÜSSEL a LÖWER. *Electron beam welding: The fundamentals of a fascinating technology*. Germany: Probeam AG & Co. KGaA, 2011.
- [12] FORET, Zdeněk. *Návrh koncepce a vývoj jednoúčelového rastrovacího elektronového mikroskopu*. Brno, 2010. 84 l. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Jiří Švejcar, CSc.
- [13] MELEKA, A. H. *Electron-beam welding: Principles and Practice*. Berkshire: McGRAW-HILL, 1971. ISBN 07-094218-8.
- [14] Energy Beam Sciences. *EBSciences* [online]. 2009 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.ebsstore.com/product.aspx?pid=374>
- [15] *Metody analýzy povrchů: elektronová mikroskopie a difrakce*. 1. vyd. Praha: Academia, 1996, 379 s. ISBN 80-200-0329-0.
- [16] 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.
- [17] SCHULTZ, Von H. *Elektronenstrahlschweißen*. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1989. ISBN 38-715-5111-2.
- [18] NEBESÁŘOVÁ, J. *Elektronová mikroskopie pro biology: Vady elektromagnetických čoček* [online]. 2001 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/2.3.html#3>
- [19] KANDUS, B., KUBÍČEK, J. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-857-7181-0.

- [20] Pro-beam: Company. [online]. 2013 [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.probeam.com/en/company.htm>
- [21] SHI, G., HILTON, P., BOOTH a PUNSHON. *Enhancements to power beam welding processes for land transport*. TWI [online]. Osaka Japan, 2004 [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/publishedpapers/enhancements-to-power-beam-welding-processes-for-land-transport-may-2004/>
- [22] VOHLÍDAL, J. *Chemické a analytické tabulky*. 1. vyd. Praha: Grada, 1999, 647 s. ISBN 80-716-9855-5.
- [23] Cais, J. *Elektronová mikroskopie. Metalografie: Metodická příručka*. 1. vyd. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., 2015, ISBN 978-80-86302-67-6
- [24] ZENKER, R., BUCHWALDER, A. *Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung: Inovative Technologien für höchste industrielle Ansprüche*. 2. vyd. Německo: Probeam AG&Co. KGaA, 2010.
- [25] DILTNEY, U. *Welding Technology 1: Welding and Cutting Technologies*. Aachen: Verl. der Augustinus-Buchh, 2005, 217 s. Dostupné z: <http://www4.hcmut.edu.vn/~dantn/WT/>
- [26] ZENKER, R. *Modern thermal electron beam processes: Research and industrial application*. La Metallurgia Italiana. 2009, Aprile, s. 8. Dostupné z: <http://www.metallurgia-italiana.net/prodotto.php?id=120&idc=11>
- [27] KREMER, R. *Ohřev kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1974, 422 s.
- [28] VÁLKA, L. *Stroj pro svařování a povrchové tepelné zpracování s pomocí elektronového svazku PROBEAM K26*. Brno, 2013.
- [29] ROSE, A., WEVER, F. *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen M.B.H., 1961.
- [30] Materiálové listy vybraných ocelí
- [31] LIEDTKE, D., STIELE, H. *Merkblatt 236: Wärmebehandlung von Stahl – Randschichthärten*. Düsseldorf: Stahl-Information-Zentrum im Stahl-Zentrum, 2009. ISBN 0175-2006. Dostupné z: http://www.stahlinfo.de/schriftenverzeichnis/pdfs/MB236_Waermebehandlung_von_Stahl_Randschichthaerten.pdf
- [32] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH. *Kaltarbeits- und Schnellarbeitsstähle*. Witten, 2010. Dostupné z: http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dewstahl.com/documents/Publikationen/Broschueren/005_DEW_Kaltarbeitsstahl_D.pdf
- [33] Firmconsult. [online]. 2012 [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.firmconsult.cz/cz/vykovky-vylisky/>
- [34] MATLÁK, J. *Povrchové kalení zápustek z 19 552*, nepublikováno
- [35] VUTOVA, K., DONCHEV, V., VASSILEVA, V., Mladenov, G. *Thermal processes in electron-beam treatment of metals* (2014) *Metal Science and Heat Treatment*, 55 (11-12), pp. 628-635.

8 Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbole

$2d$	vzdálenost desek kondenzátoru, str. 6	m
a	koeficient tepelné vodivosti, str. 14	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
A	konstanta emise, str. 8	$\text{A cm}^{-2} \text{K}^{-2}$
B	magnetická indukce pole, str. 5	T
c	měrná tepelná kapacita, str. 14	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
d	průměr svazku v místě dopadu, str. 15	mm
$\Sigma \varepsilon_F$	celkové teplo fázových přeměn, str. 15	J
$e\Phi$	výstupní práce z kovu, str. 8	eV
E	intenzita elektromagnetického pole, str. 5	V m^{-1}
E_0	dopadající energie v bodě $r=0$ a čase $t=0$, str. 15	J
E_k	kinetická energie, str. 5	eV
F_L	Lorentzova síla, str. 5	N
I	proud ve svazku, str. 13	A
J	proudová hustota, str. 14	A mm^{-2}
l	délka, str. 6	m
λ	koeficient tepelné vodivosti, str. 5	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
p_A	hustota výkonu, str. 13	W mm^{-3}
P_0	celkový výkon elektronového svazku, str. 13	W
Q	množství dodaného tepla, str. 14	J.mm^{-3}
R	hloubka vniku elektronů, str. 12	μm
ρ	hustota materiálu, str. 15	g cm^{-3}
T	teplota prostředí, str. 14	K
τ	relaxační čas, str. 15	μs
U	urychlovací napětí, str. 5	V
v	rychlost elektronů, str. 5	m s^{-1}
U_V	napětí mezi dvěma deskami kondenzátoru, str. 6	V
x	vzdálenost od povrchu, str. 6	mm
z	poloha v ose z, str. 6	m

Zkratky

AE	Augerovy elektrony
BSE	Zpětně rozptýlené elektrony
EB	Elektronový svazek
Fig	Příčný obrazec – obrazec skenující paprsek kolmo na směr posuvu
FRQ	Skenovací frekvence obrazce Fig
HF	Kalicí obrazec
HV	Urychlovací napětí
KW	Kalibrace – koeficient propojující posuv součásti a deflekcí EB
offset	Defokusace – posun ohniska paprsku nad/pod povrch součásti
PVZH/PVZL	Skenovací frekvence obrazce HF
SE	Sekundární elektrony
SL	Fokusační proud
SQ	Proud paprsku
Slopein	Nabíhání parametrů na procesní hodnoty
Slopeout	Pokles parametrů z procesních hodnot
SWX/SWY	Rozměry kalicího obrazce HF
SWX1/SWY1	Rozměry příčného obrazce Fig