



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
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. et Bc. JIŘÍ MATLÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MILOSLAV KOUŘIL, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. et Bc. Jiří Matlák

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

obor: **Materiálové inženýrství (3911T011)**

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

v anglickém jazyce:

Surface treatment of selected steels using electron beam

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 odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miloslav Kouřil, CSc.

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

V Brně, dne 12.4.2013

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření zakalené vrstvy bez přetavení povrchu pomocí technologie elektronového paprsku na třech vybraných typech materiálů (s odlišným množstvím legujících prvků). Dále je sledován vliv vybraných procesních parametrů na vlastnosti a tvar zhotovených zakalených vrstev. V první části teoretické rešerše jsou popsány vlastnosti elektronového paprsku, možnosti jeho ovlivňování a řízení, včetně jednotlivých komponent k tomu určených. Dále je uveden příklad celkové sestavy generátoru elektronového paprsku. Druhá část rešerše pojednává o možných technologiích využívajících elektronový svazek.

ABSTRACT

The aim of diploma thesis was preparation of hardened layer on three chosen types of materials with different alloying components content without surface melt by using electron beam technology. The influence of chosen process parameters was observed on the prepared hardened layers properties and shapes. In the first part of bibliographic search there are described electron beam properties, possibilities of his influencing and control. There is given example of complete set of electron beam are mentioned in the second part of theoretical research.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektronový paprsek, povrchové zpracování, EB technologie, povrchové kalení, 12 050, 15 142, 19 436, C45, 40CrMo4, X210Cr12

KEYWORDS

electron beam, surface treatment, EB technology, surface hardening, 12 050, 15 142, 19 436, C45, 40CrMo4, X210Cr12

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval.

V Brně dne 24. května 2013

.....
Bc. et Bc. Jiří Matlák

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Miloslavovi Kouřilovi, CSc. a ostatním zaměstnancům FSI, kteří mi pomohli cennými připomínkami a odbornými radami při zpracování materiálů, přípravě vzorků a jejich vyhodnocování.

OBSAH:

1	Úvod a cíle práce	12
2	Elektronový paprsek	13
2.1	Historie	13
2.2	Vlastnosti a chování elektronů.....	14
2.3	Interakce elektronového svazku a pevné látky	15
2.4	Zdroje elektronů.....	18
2.5	Elektronová optika	19
2.6	Vady elektronové optiky	20
2.7	Generátor elektronového paprsku	22
3	Aplikace elektronového paprsku	24
3.1	Svařování a pájení	26
3.2	Vrtání.....	28
3.3	Gravírování	29
3.4	Kalení	30
3.5	Žihání.....	31
3.6	Přetavování	32
3.7	Legování, dispergování, nanášení	33
4	Experimentální část.....	36
4.1	Zařízení pro ohřev elektronovým svazkem	36
4.2	Experimentální materiál	38
4.3	Materiály vhodné pro EBH.....	38
4.3.1	Uhlíková ocel.....	40
4.3.2	Konstrukční nízkolegovaná ocel.....	42
4.3.3	Nástrojová ocel	43
4.4	Proměnné veličiny EB zařízení v technologii kalení	46
4.5	Provedení experimentu	47
5	Výsledky experimentů a jejich diskuse.....	48
5.1	Uhlíková ocel.....	48
5.2	Konstrukční nízkolegovaná ocel.....	50
5.3	Vysokolegovaná nástrojová ocel.....	51
5.4	Vliv vybraných parametrů na vlastnosti zakalených vrstev	54
5.4.1	Rychlost posuvu F_s	54
5.4.2	Míra defokusace (offset).....	54
5.4.3	Skenovací frekvence FRQ	55
5.5	Shrnutí	56

6 Závěr.....	57
Použitá literatura.....	58
Seznam použitých zkratek	60
Seznam příloh	61

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Historie technologického využití elektronového svazku trvá přibližně od počátku 20. století. Základním principem je transport energie volným prostorem na určitou vzdálenost, bez kontaktu pevných těles a s velmi dobrou (bodovou) lokalizací. Nositelem energie jsou elektrony o vysoké energii. Ty jsou emitovány wolframovou elektrodou ohřátou na vysokou teplotu a připojenou na záporný potenciál. Elektrony postupují přes mřížku tvořenou tzv. Wehnelovým válcem k anodě. Mezi mřížku a anodu se připojí vysoké urychlovací napětí, které dává elektronům konečnou energii. Tím vzniká svazek elektronů, který může být dále fokusován a vychylován s pomocí tzv. magnetických čoček. Nejznámějšími aplikacemi využívající tento princip jsou vakuové televizní obrazovky a elektronová mikroskopie, kde elektronový svazek přenáší poměrně malé výkony (mW, až W). Druhou oblastí využití jsou silové aplikace, kde výkon přenášený elektronovým svazkem dosahuje velikosti řádu od stovek W až po jednotky MW. Využití těchto výkonů je pro gravírování, povrchové úpravy a svařování (10^2 až 10^5 W) a pro velkokapacitní přetavování většinou těžko tavitelných kovů (10^6 W).

Vznik elektronového paprsku a práce s ním vyžaduje přiměřené vakuum z důvodu zamezení střetů elektronů s molekulami vzduchu. Vakuum nedostatečné, popř. atmosférický tlak vzduchu, je příčinou oslabení a pohlcení svazku. Potřeba vakua je tedy do určité míry omezujícím faktorem, protože zařízení vyžaduje poměrně drahou vakuovou komoru a proces se prodlužuje o nutnou dobu čerpání komory. Naproti tomu, práce s vakuem se již pomalu řadí mezi přednosti této technologie, protože je tak umožněno zpracování reaktivních materiálů a též odpadají komplikace s oxidací součástí, vnášením nečistot, atp. Mimo to dále odpadají vedlejší náklady za ochranné inertní plyny, které jsou zapotřebí u některých jiných technologií.

Předložená práce shrnuje a hodnotí výsledky pilotních experimentů povrchového zpracování (kalení, popř. přetavení povrchu) i provedených na elektronovém zařízení pro svařování a povrchové tepelné zpracování typu K26 od německého výrobce Pro-beam. Toto zařízení bylo zprovozněno v dubnu tohoto roku a bylo pořízeno v rámci projektu NETME centre na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Experimenty jsou zaměřeny na získání prvních vlastních zkušeností na vzorcích, prozatím tří běžných ocelí. Materiály pro úlohu byly vybrány tak (uhlíková, konstrukční nízkolegovaná a ledeburitická vysokochromová ocel), aby rozdíly ve výsledcích byly nejen kvantitativního, ale i kvalitativního charakteru.

Je nutno podotknout, že dostupných publikovaných informací (nastavených parametrů), použitelných např. pro vytvoření zakalené vrstvy o určité tloušťce na konkrétní oceli, je velmi málo. V regionu funguje a má již se svařováním materiálů pomocí elektronového paprsku zkušenosti Ústav přístrojové techniky AVČR v Brně. Experimenty s tepelným zpracováním se však na tomto pracovišti nikdy neprováděly. V neposlední řadě parametry zařízení na Ústav přístrojové techniky a stroje zakoupeného v rámci projektu NETME centre jsou výrazně odlišné.

2 ELEKTRONOVÝ PAPERSEK

Svazek elektronů pohybujících se vakuem přibližně stejným směrem a rychlostí je chápán jako elektronový paprsek (EB). Od doby svého objevení byl již využit v řadě technických aplikací. Mezi nejstarší a zároveň dodnes nejrozšířenější z nich patří vakuové elektronky a obrazovky. Elektronky byly postupně již vytlačeny, ale s obrazovkami označovanými jako CRT (zkratka anglického pojmenování „Catode Ray Tube“) je možno se setkat celkem běžně i v dnešní době. [7] [33]

2.1 Historie

Základy pro technologii elektronového paprsku pocházejí z poloviny 19. století, kdy Johann Wilhelm Hittorf a William Crookes experimentovali s katodovými paprsky (rychlé elektrony vystupující z katody doutnavky) ve zředěných plynech (1869). Poznatku, že záření při interakci s pevnou látkou předává materiálu většinu kinetické energie ve formě tepla, si vědci povšimli a roku 1879 využili tohoto fenoménu k tavení kovu. Dále s katodovým zářením experimentovali Wilhelm Conrad Röntgen (1895), Silvanus Phillips Thompson (1897) a Robert Andrews Millikan (1905), kteří vyslovili domněnku, že záření má částicovou povahu a je vlastně tvořeno rychle se pohybujícími elektrony. Tímto dali základ k označení pojmu elektronový paprsek. [8] [33]



**Obr. 2.1 Zvlákňovací hlava na výrobu skleněných vláken;
25 600 otvorů o průměru 0,55 mm [25]**

První zmínka o průmyslovém využití elektronového paprsku jako zdroje energie pro tavení tantalového prášku ve vakuové komoře pochází z roku 1905. Jednalo se o aparaturu sestavenou německým fyzikem Marcellem Stefanem Piranim. Tento počín odstartoval širší vědecký zájem o problematiku a výsledkem bylo několik nových aplikací. Příkladem může být vrtání pomocí elektronového svazku. Zvlákňovací hlava na skleněná vlákna s otvory vyrobenými právě touto technologií je uvedena na **Obr. 2.1 [25]**. Zřejmě nejvýznamnější aplikací elektronového paprsku v první polovině 20. století konstrukce elektronového mikroskopu. Tento přístroj přinesl revoluční změny v mnoha vědních oborech a většina dalšího výzkumu elektronové optiky byla tedy směřována právě na zlepšení mikroskopu. Studium a pokusy s tepelnými účinky elektronového paprsku byly zjednodušeně řečeno vedlejším produktem prací na elektronových mikroskopech a prováděli je většinou jejich konstruktéři (např. Manfred von Ardenne, Ernst Ruska, Bodo von Borries, atp.). [8] [26]

Zlom ve zpracování materiálů elektronovým paprskem nastal v 50. letech 20. století, když roku 1958 německý fyzik Karl-Heinz Steigerwald objevil efekt hlubokého svařování. Tato technologie byla celkem záhy využita v praxi, neboť v oblasti letectví a jaderné energetiky bylo zapotřebí spojovat nové materiály, které byly klasickými technikami jen velmi obtížně svařitelné, nebo úplně nesvařitelné (např. zirkon). Největší rozvoj elektronových svářeček nastal v 60. letech minulého století, kdy se také k vývoji významnou měrou připojila naše tehdejší republika. Jmenovitě se jednalo o pracoviště Výzkumného ústavu zvaračského v Bratislavě a Ústav přístrojové techniky v Brně (tou dobou pod záštitou ČSAV, dnešní AV ČR). [8] [33]

2.2 Vlastnosti a chování elektronů

Již na počátku 19. století bylo dokázáno, že atomy chemických prvků se skládají z kladně nabitých atomových jader a záporně nabitého obalu. Absolutní hodnoty nábojů jsou shodné, a tedy navenek se atomy chovají jako elektroneutrální. Většina hmotnosti atomů je koncentrována v jádře a představována hmotností pozitivně nabitých protonů a téměř shodně těžkých elektroneutrálních neutronů. Záporně nabité elektrony vyskytující se v obalu mají přibližně o tři řády nižší hmotnost, ačkoliv tvoří většinový objem atomů. **Tab. 2.1 [14]** uvádí pro porovnání některé z vlastností elementárních částic. [14]

Tab. 2.1 Vybrané vlastnosti elementárních částic [14]

Elementární částice	Objevitel (rok)	Hmotnost [kg]	Náboj [C]	Symbol
Proton	Rutherford (1920)	$1,672\ 52 \cdot 10^{-27}$	kladný $1,602\ 10 \cdot 10^{-19}$	p^+ nebo ${}_1^1p$
Neutron	Chadwick (1932)	$1,674\ 82 \cdot 10^{-27}$	bez náboje	n^0 nebo ${}_0^1n$
Elektron	Thomson (1897)	$9,109\ 1 \cdot 10^{-31}$	záporný $1,602\ 10 \cdot 10^{-19}$	e^- nebo ${}_{-1}^0e$

Elektrony jsou elektricky nabitě částice, a proto je možné jejich pohyb ovlivňovat (a tedy měnit jejich trajektorii) působením vnějšího elektrického a/nebo magnetického pole.

Časově neproměnné elektromagnetické pole vyvíjí na pohybující se elektron sílu, která bývá označována jako Lorentzova:

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

kde představuje q_e náboj elektronu, \mathbf{E} vektor elektrické intenzity, \mathbf{v} vektor rychlosti pohybu elektronu a \mathbf{B} vektor magnetické indukce vnějšího magnetického pole. Díky existenci této síly je možné pomocí elektromagnetického pole měnit jednak velikost a jednak směr rychlosti elektronů. [11] [33]

Velikost kinetické energie, kterou elektron průchodem elektromagnetickým polem ztratí či získá je určena vztahem:

$$E_k = |U_A q_e|, \quad (2.2)$$

kde U_A představuje urychlovací napětí. Rychlost elektronů v urychlených z klidu je v nerelativistickém přiblížení definována jako:

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

kde m_e představuje klidovou hmotnost elektronu. V oblasti částicové fyziky se běžně používá elektronvolt (eV) jako jednotka energie, která představuje energii získanou jedním elektronem urychleným v elektrickém poli o velikosti 1 V ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Pro energie využívané při svařování nebo tepelném zpracování je často pro výpočty nutné brát v potaz, že částice dosahují již relativistických rychlostí a dochází k značným odchýlkám v jejich chování. Např. již při urychlovacím napětí 50 kV dosahují elektrony rychlosti $v = 1,24 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (přibližně 0,4 násobek rychlosti světla), přičemž nerelativistický model poskytuje hodnotu $v = 1,33 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [7] [33]

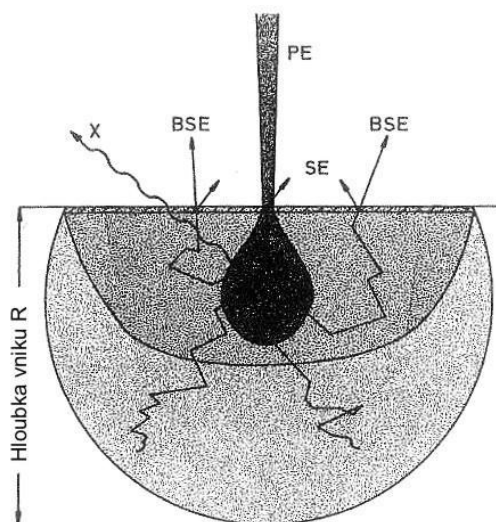
2.3 Interakce elektronového svazku a pevné látky

Interakcí se v případě problematiky této práce myslí především mechanismus penetrace elektronů a transfer energií do pevného materiálu. Elektronový svazek lze využívat pro obrábění a svařování materiálů, kde je zapotřebí pracovat s elektrony o energiích pohybujících se v hodnotách od 10^4 do 10^5 eV. Pro tyto hodnoty energií lze brát v úvahu dva základní typy interakcí s atomy. Jednou z možností je kolize záporně nabitě částice s atomovým jádrem. Vzhledem k malé velikosti jader i elektronů je pravděpodobnost tohoto jevu značně malá a navíc nedochází k výraznému přenosu energie, a tedy se jedná o srážku pružnou. Je tedy zřejmé, že podstatně pravděpodobnější, a tedy běžnější bude střet částic paprsku s elektrony ve vnějším atomovém obalu. Velikost a hmotnost částic je v tomto případě stejná, a proto i předaná hybnost, a potažmo i energie, bude podstatně vyšší. [7]

Energie lokálně dodaná materiálu elektronovým paprskem se dále šíří do celého objemu formou postupných srážek mřížkových fononů. Důsledkem tohoto jevu je postupný nárůst teploty ozařované látky. [7]

Převod kinetické energie elektronového svazku na tepelnou energii ozařovaného materiálu ovšem není absolutní. Ztráty vycházejí z dalších možných interakcí (**Obr. 2.2** [7]) dopadajících primárních elektronů (PE). Část záření může být pružnými srážkami zpět odražena, nebo mohou být emitovány:

- **zpětně rozptýlené elektrony** – Pronikají pod povrch, kde ovšem ztrácí minimum energie, a pružnými srážkami jsou opět vráceny zpět nad povrch materiálu. Tyto elektrony bývají označovány zkratkou BSE, která vychází z anglického pojmenování „backscattered electron“.
- **sekundární elektrony** – Primární elektrony se občas srazí s elektrony uspořádanými okolo atomů matričního materiálu. Tyto elektrony, označované jako sekundární elektrony (SE), se uvolňují a jsou vyzařovány z materiálu.
- **Augerovy elektrony** – Principem jejich vzniku je Augerův jev. Nejprve dochází k vyrazení elektronu z vnitřní energetické hladiny atomu, na jehož místo přeskočí částice z bohatší hladiny za současné emise energetického přebytku. Energie může být pohlcena dalším elektronem a v případě, že je její hodnota dostatečná na uvolnění elementární částice ze své polohy, dochází k jejímu vyzáření (Augerovy elektrony).
- **rentgenové záření** – Při uvolnění SE vzniká v elektronovém obalu díra, která má nižší energii než část elektronů obsažených v atomovém obalu. Proto dochází k přeskokům elektronů na nižší energetickou hladinu a přebytek energie je vyzářen např. jako rentgenové záření s vlnovou délkou 10^{-9} až 10^{-12} m.
- **tepelné záření, světelné záření, atd.** – Záření vznikající stejným způsobem jako rentgenové, jen s jinou energií, resp. vlnovou délkou. [7]



Obr. 2.2 Interakce elektronového paprsku se základním materiálem [7]

V místě dopadu elektronového svazku dochází v důsledku interakce s materiálem také k uvolňování rentgenového záření (X). Jeho energie a intenzita rychle rostou se stoupajícím urychlovacím napětím svazku, a proto u zařízení pracujících s napětími vyššími než 60 kV je zapotřebí dbát zvýšené radiační bezpečnosti. U nižších napětí dochází k dostatečnému

odstínění stěnami pracovní komory nebo speciálními skly v průzorech. Vakuové komory u strojů s vyšším napětím jsou konstruovány ze silnějších materiálů a případně se přistupuje k olověnému opláštění. [7]

Za účelem předpovězení hloubky penetrace rychlých elektronů do materiálu byl vytvořen model, který byl i následně experimentálně ověřen. Přitom bylo zjištěno, že elektrony jsou schopny do materiálu vnikat a předávat svoji kinetickou energii jen na velmi krátkou vzdálenost v řádu několika setin až desetin milimetrů. Pro odhad hloubky byl sestaven empirický vztah:

$$d_v = 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{U_A^2}{\rho}, \quad (2.3)$$

kde ρ představuje hustotu základního materiálu. Po dosazení proměnných v základních jednotkách SI vychází hloubka penetrace v řádech μm . V **Tab. 2.2** [28] jsou uvedeny příklady penetračních hloubek u vybraných materiálů. [33]

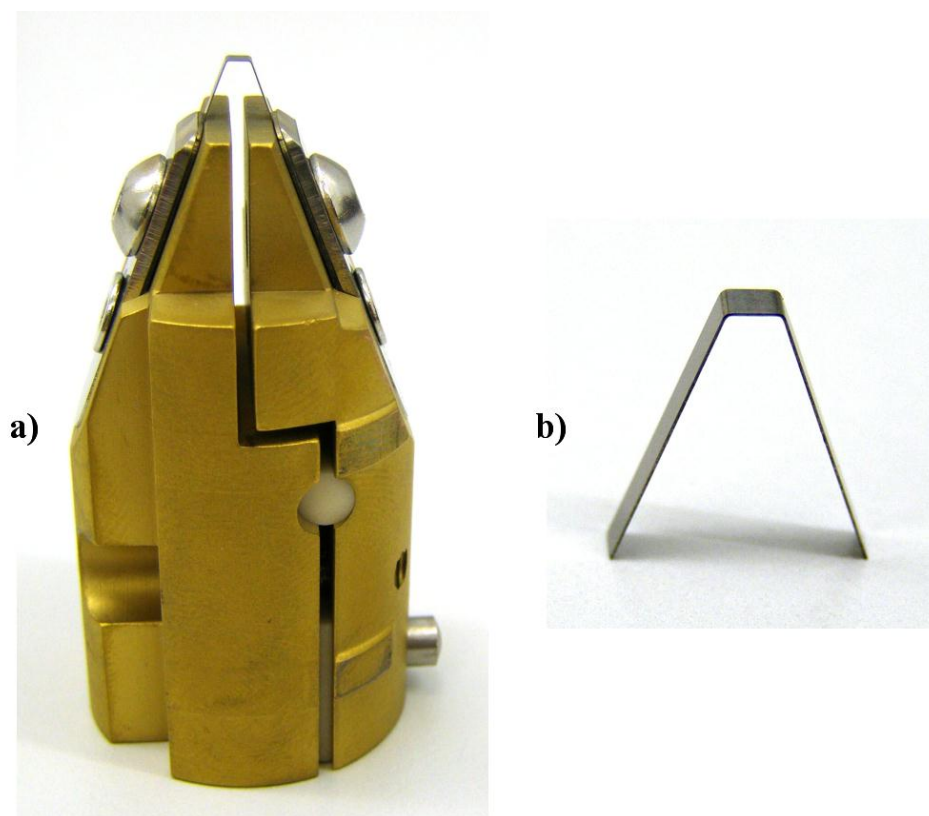
Tab. 2.2 Hloubka vniku elektronů (v μm) pro vybrané materiály a urychlovací napětí vypočítaná dle vztahu (2.3) [28]

Materiál	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Urychlovací napětí [kV]			
		60	100	120	150
Wolfram	19 263	3,9	10,9	15,7	24,5
Molybden	10 218	7,4	20,6	29,6	46,2
Tantal	16 654	4,5	12,6	18,2	28,4
Měď	8 960	8,4	23,4	33,8	52,7
Hliník	2 699	28,0	77,8	112,0	175,1
Olovo	11 340	6,7	18,5	26,7	41,7
Uhlíková ocel 12 050	7 870	9,6	26,7	38,4	60,0
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
Křemenné sklo	2 200	34,4	95,5	137,5	214,8
Korund	4 022	18,8	52,2	75,2	117,5
Teflon	2 175	34,8	96,6	139,0	217,2
Polyethylen	855	88,4	245,6	353,7	552,6
PVC	1 455	52,0	144,3	207,8	324,7

2.4 Zdroje elektronů

Jako zdroj elektronů slouží katoda, ze které je možné elektrony získávat různými způsoby. Prakticky je ovšem možné využít pouze jevu autoemise a termoemise. Autoemisní zdroje uvolňují elektrony z katody v důsledku působení silného elektrického pole. Tato konstrukce ale vyžaduje ultravakuum (tlak 10^{-5} – 10^{-10} Pa), což značně limituje její možnosti uplatnění. Mezi další nevýhody patří problematické dosažení vysokého celkového výkonu, a proto nalézá uplatnění pouze v oborech, kde je požadován nižší výkon, jako např. u elektronových mikroskopů. [9][19]

Pro elektronové svazky v řádech jednotek až desítek miliampér jsou podstatně více vyhovující zdroje termoemisní. Elektronový paprsek je generován z povrchu katody zahřáté na vysokou teplotu. Aby mohlo docházet k emitaci částic, je nutné dodat dostatek energie, též nazývané jako výstupní práce kovu, na překonání potenciálové bariéry, která se pohybuje v řádech elektronvoltů. Každý materiál má svou charakteristickou energetickou bariéru a je tedy snaha vybírat takovou matici, která ji bude mít co nejnižší a zároveň bude mít vysokou teplotu tavení. V praxi to znamená, že se používají pouze katody z čistých kovů. Nejčastěji se jedná o wolfram ($T_f = 3\,422$ °C; výstupní práce cca 4,8 eV) či tantal ($T_f = 3\,017$ °C; výstupní práce cca 4,4 eV). Na **Obr. 2.3** je vyobrazena termoemisní katoda včetně vlastního výměnného wolframového pásku. [9] [19]



Obr. 2.3 a) těleso termoemisní katody b) vlastní žhavený výměnný wolframový pásek

Hustotu termoemisního proudu elektronů j_s (o rozměru $A \cdot cm^{-2}$) lze spočítat pomocí Richardsonova zákona:

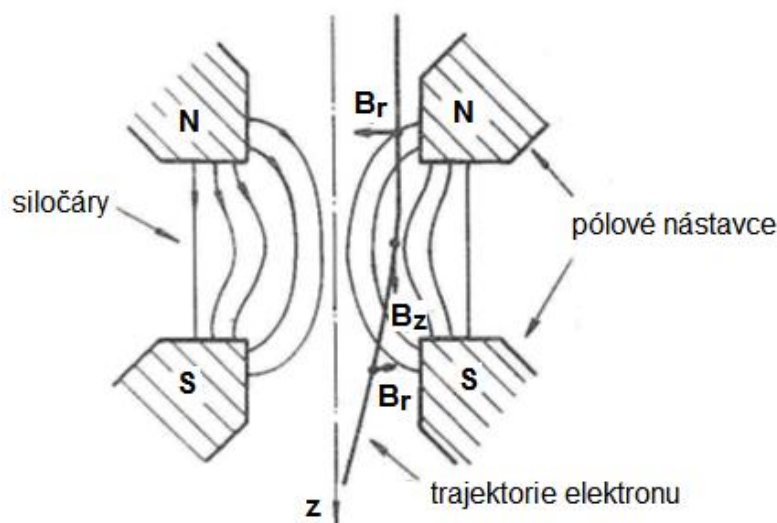
$$j_s = AT^2 \exp\left(\frac{-e\Phi}{kT}\right), \quad (2.3)$$

kde A je konstanta emise závisající na emitujícím povrchu, T absolutní teplota katody, $e\Phi$ výstupní práce kovu a k Boltzmanova konstanta. [7]

2.5 Elektronová optika

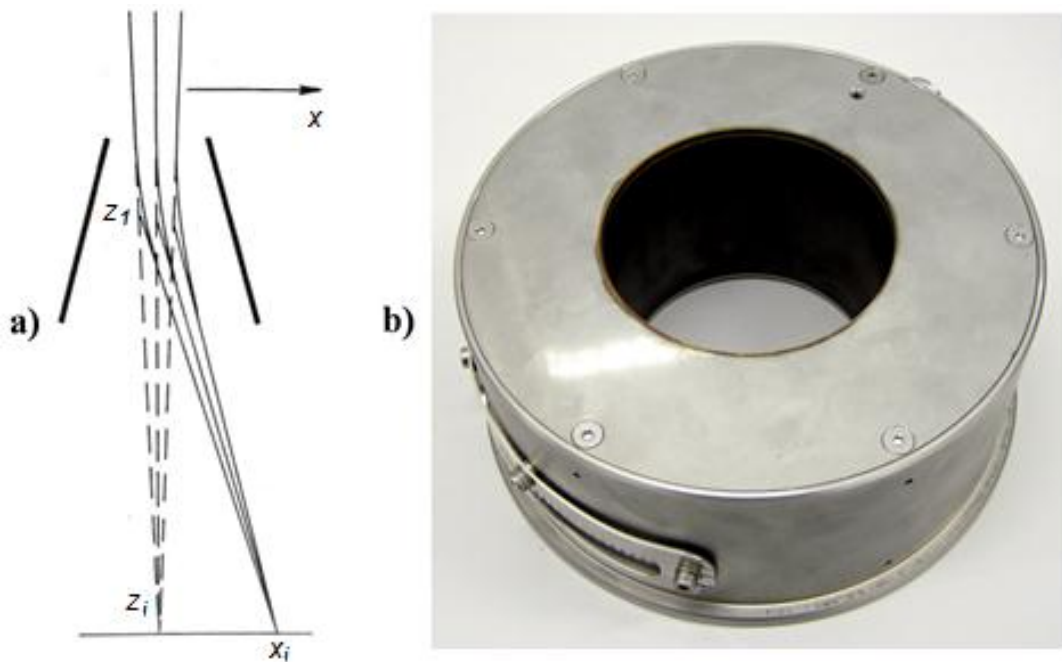
Elektronový svazek vygenerovaný zdrojem je zapotřebí navést do místa použití. Za tímto účelem dochází k fokusaci, homogenizaci a směřování paprsku pomocí několika prvků, jež jsou souhrnně označovány jako elektronová optika.

K fokusaci svazku se používá magnetická čočka, která je tvořena válcovou budicí cívkou opláštěnou ferromagnetickým materiálem. Elektrický proud procházející cívkou vyvolá magnetické pole, které mění pouze směr pohybu elektronů, ale rychlost částic, a tedy i energie, zůstává nezměněna. Dráhy letu elektronů jsou fokusací upraveny, aby docházelo k protínání trajektorií v určitém bodě rotační osy symetrie svazku nazývaném jako křižiště. Princip funkce magnetické čočky je znázorněn na **Obr. 2.4** [20]. Na rozdíl od čoček používaných ve světelné optice umožňují magnetické čočky rychlou modulaci ohniskové vzdálenosti pouhou změnou budicího proudu. [7]



Obr. 2.4 Princip magnetické čočky. Vektory B_r a B_z představují složky magnetického pole [20]

Dalším elektronickým prvkem patřícím do elektronové optiky je deflektor. Jeho funkcí je koncové vychylování osy svazku do požadované oblasti na povrchu materiálu. Nejčastěji bývá tvořen dvěma páry cívek a uspořádání je voleno tak, aby vznikala dvě na sebe kolmá, téměř homogenní, magnetická pole. Uvedené uspořádání umožňuje nasměrování paprsku do libovolného místa operačního prostoru a změnami napájecích stejnosměrných proudů lze vést paprsek po určené trajektorii. **Obr. 2.5** [7] schematicky vysvětluje funkci deflektoru a uvádí příklad deflekcí cívky. [7]



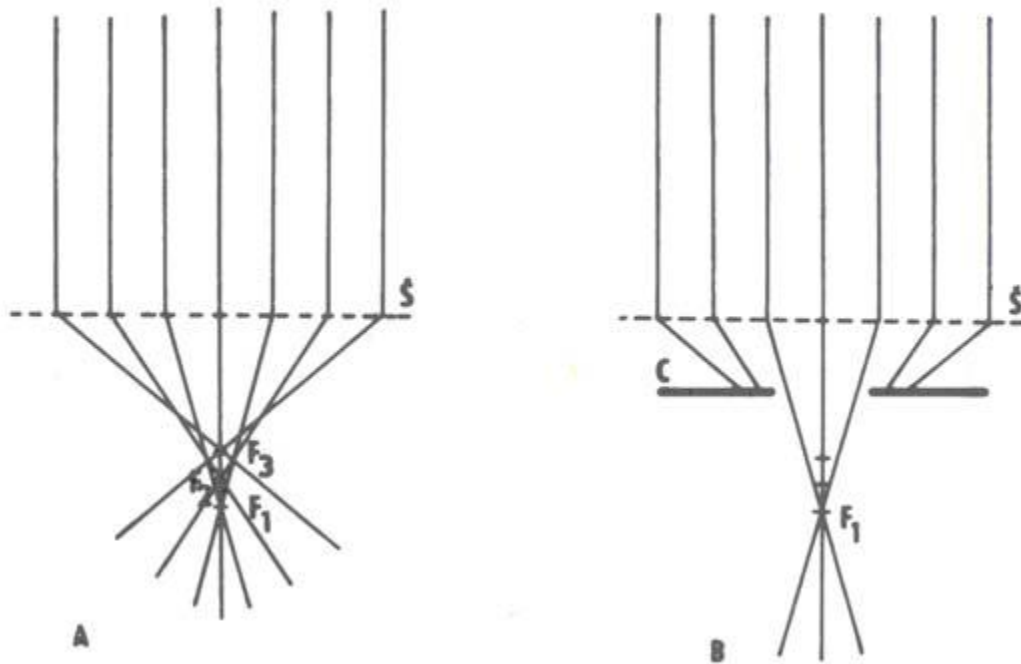
Obr. 2.5 a) princip funkce deflektoru [7]; b) deflekční cívka

Centrovací systém je dalším prvkem používaným v technice elektronového paprsku. Princip funkce opět spočívá v generování homogenního magnetického pole a změnami proudů v centrovacích cívkách se korigují odchylky elektronového svazku od fokusační osy. Při vysokých nárocích na kvalitu a homogenitu paprsku, které jsou u technologií zpracování materiálu od svazku vyžadovány, se využívají další elektronické prvky eliminující vady svazku. O základních vadách elektronového paprsku a obvyklých řešeních pojednává následující kapitola.

2.6 Vady elektronové optiky

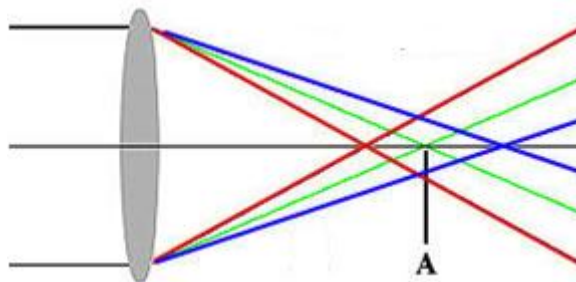
Elektronová optika je v mnoha aspektech podobná se světelnou. Magnetické čočky jsou zatíženy shodnými vadami, které zatěžují a zhoršují vlastnosti procházejícího záření. Mezi nejznámější a nejvíce ovlivňující patří:

- **sférická (kulová) vada** – jedná se o neschopnost čočky fokusovat záření do jednoho bodu. Elektrony procházející těsně u středu optické osy jsou zaostřeny dál, nežli elektrony procházející okrajem čočky. Princip vzniku vady ilustruje **Obr. 2.6** [18]. Velikost sférické vady závisí na ohniskové vzdálenosti čočky a s rostoucí vzdáleností se také zvětšuje. V elektronové mikroskopii se tento typ chyby projevuje tím, že obraz má jiné zvětšení ve středu a na okrajích. Potlačení sférické vady se provádí pomocí clony, která odstiňuje záření na okrajích. [21]



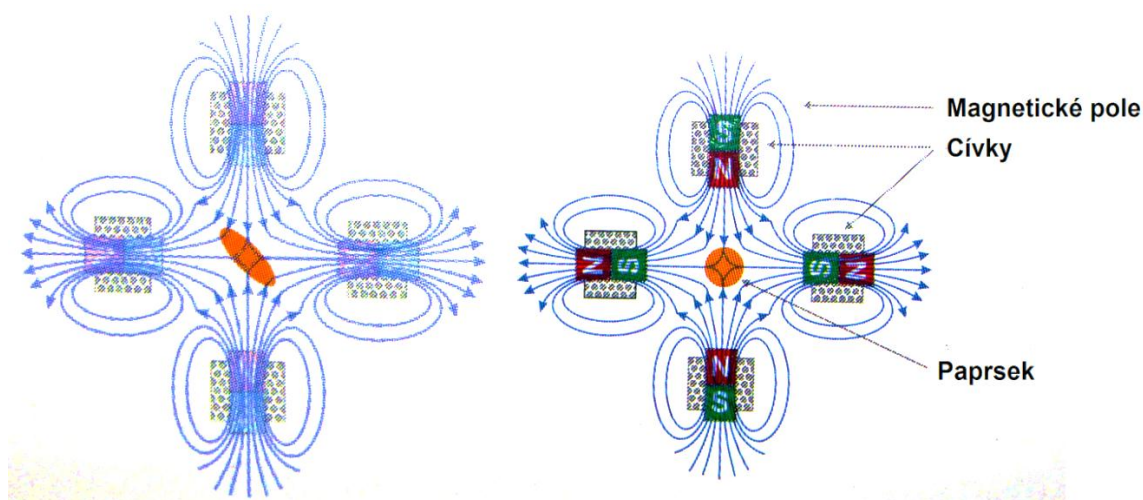
Obr. 2.6 Princip vzniku (A) a potlačení (B) sférické vady pomocí clony (C) [18]

- **chromatická (barevná) vada** – vzniká jako projev nerovnoměrnosti energií ve svazku. Elektronů, které se pohybují pomalejší rychlostí, jsou fokusovány elektromagnetickou čočkou do jiného místa nežli elektronů rychlejší, a tím vzniká spektrum ohnisek o daných energiích, jak naznačuje Obr. 2.7 [12]. Tuto vadu nelze korigovat pomocí dalšího členu elektronové optiky, ale lze ji pouze snížit maximální možnou stabilizací urychlovacího napětí, čímž dochází ke zlepšování koherence záření i jeho monochromatickosti. [21]



Obr. 2.7 Princip chromatické vady [12]

- **osový astigmatismus** – je způsoben asymetrií magnetického pole působícího na elektronový svazek. Tato vada se projevuje různou fokusací elektronů procházejících čočkou v různých rovinách, a tedy kruhový profil se změní na eliptický. Příčinou bývají nedokonalosti čoček a také nečistoty na vnitřních částech optické soustavy. Nečistoty, které jsou obvykle nevodivé, se nabíjí a poté vytváří vlastní rušivé pole, jež ovlivňuje trajektorie elektronů. Pro korekci tohoto fenoménu se do optické soustavy zařazuje prvek nazývaný jako stigmátor, který svým magnetickým polem kompenzuje uvedenou vadu. Obr. 2.8 [29] zachycuje princip a korekci osového astigmatismu. [21]



Obr. 2.8 Osový astigmatismus čočky se projevuje protažením obrazu objektu (vlevo). Po korekci stigmátorem se objekt rozostřuje rovnoměrně (vpravo). [29]

2.7 Generátor elektronového paprsku

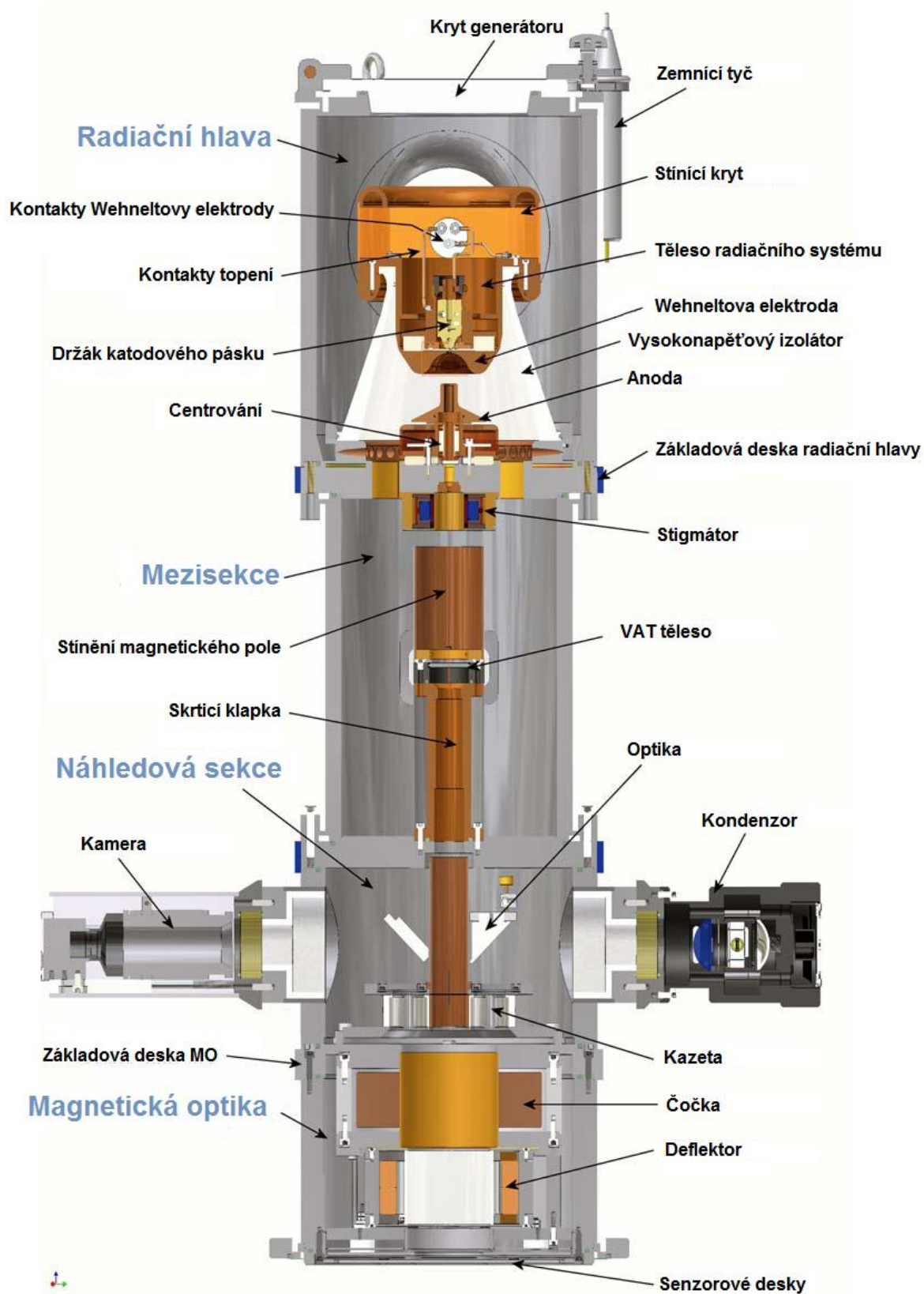
Celková sestava generátoru elektronového paprsku (elektronové dělo) je komplikovaný celek mnoha komponent, jež jsou na vysoké technické úrovni. Základními stavebními kameny elektronového děla jsou zmíněné a popsány prvky zdroje elektronů a elektronové optiky, tj.:

- systém termoemisního zdroje elektronů
- centrovací systém elektronového svazku
- fokusační magnetická čočka
- deflektor
- stigmátor, aj.

Na Obr. 2.9 [23] je uvedeno schéma již reálné sestavy generátoru. Princip rastrovacího elektronového mikroskopu spočívající v přesném vychylování elektronového svazku a analýze nepohlcených elektronů je možné využívat také při obrábění materiálů k přesnému navádění osy elektronového svazku do ovlivňované zóny. Pro analýzu nepohlcených elektronů slouží v nejspodnější části sestavy senzorové desky. Pro hrubé navedení součásti do oblasti vlivu elektronového svazku lze také využít obrazu získaného pomocí CCD kamery, která je i s pomocným osvětlením včleněna do řetězce elektronového děla. Tento prvek ovšem také umožňuje sledovat a nahrávat průběh technologického procesu prováděného pomocí EB.

K provozu zařízení jsou zapotřebí ovšem další komponenty, které nejsou na schématu zachyceny. Mezi ně patří například:

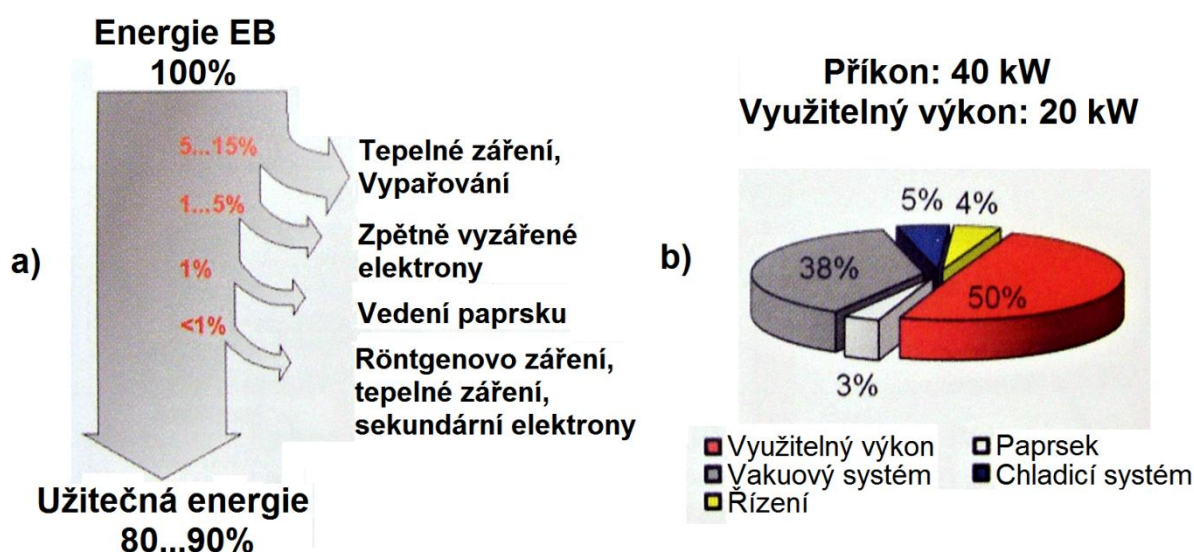
- **výkonný vakuový systém** – Vnitřní prostor elektronového děla i pracovní komory musí být vyčerpán na hluboké vakuum, aby nedocházelo k nechtěným srážkám elektronového paprsku s molekulami plynů.
- **generátor vysokého napětí** – Elektronové dělo pracuje s vysokým napětím, které je zapotřebí generovat z nízkého napětí v rozvodné síti.
- **chladicí systém** – Odpadové teplo vznikající provozem zařízení je potřebné odvádět.
- **řídící a ovládací systém, bezpečnostní systém, atd.**



Obr. 2.9 Generátor elektronového paprsku [23]

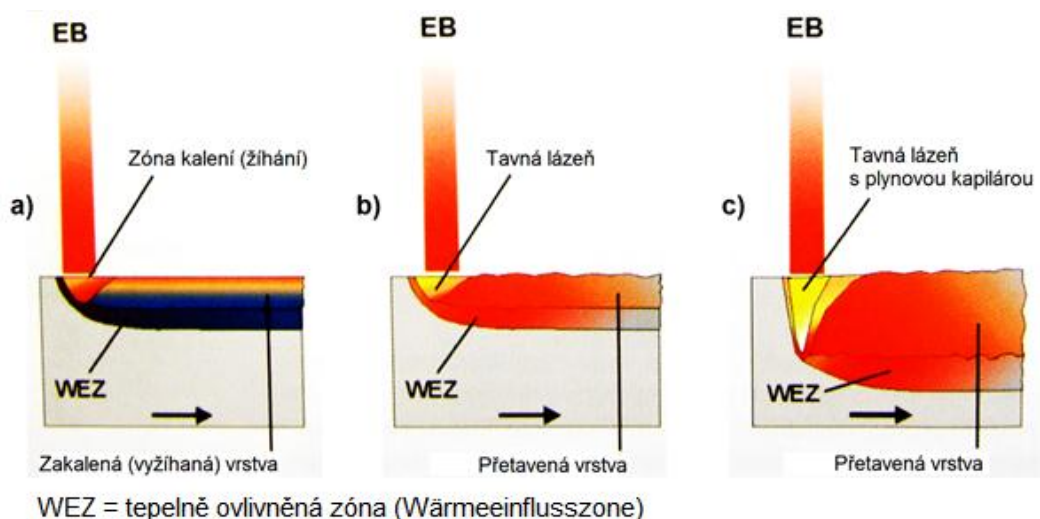
3 APLIKACE ELEKTRONOVÉHO PAPRSKU

Prvotní uplatnění našel elektronový paprsek v elektronové mikroskopii, díky které šel jeho vývoj značně kupředu. Ovšem tato diplomová práce se zaměřuje na aplikace svazku o vyšších výkonech, nežli se využívá v mikroskopii. Cílenou interakcí elektronů se základním materiálem je přeměna kinetické energie na tepelnou. K ohřevu materiálu dochází při dosažení dostatečné energetické hustoty, tj. 10^4 až 10^5 W·cm⁻². Technologie povrchového tepelného zpracování dále využívá rychlého odvodu tepla (10^3 až 10^4 K·s⁻¹) do zbylého objemu dílce, čímž dochází k samozakalení s minimální velikostí tepelně ovlivněné oblasti. Obecně energetická bilance povrchového zpracování pomocí elektronového paprsku vychází velmi příznivě jak v rámci procesu samotného, tak i provozu celého zařízení (**Obr. 3.1 [32]**). Účinnost technologií využívající elektronový svazek vychází oproti CO₂ laseru lépe až o 5 %, polovodičovému laseru o 10 až 20 %, v případě diskových laserů dokonce téměř o 50 %. [32]



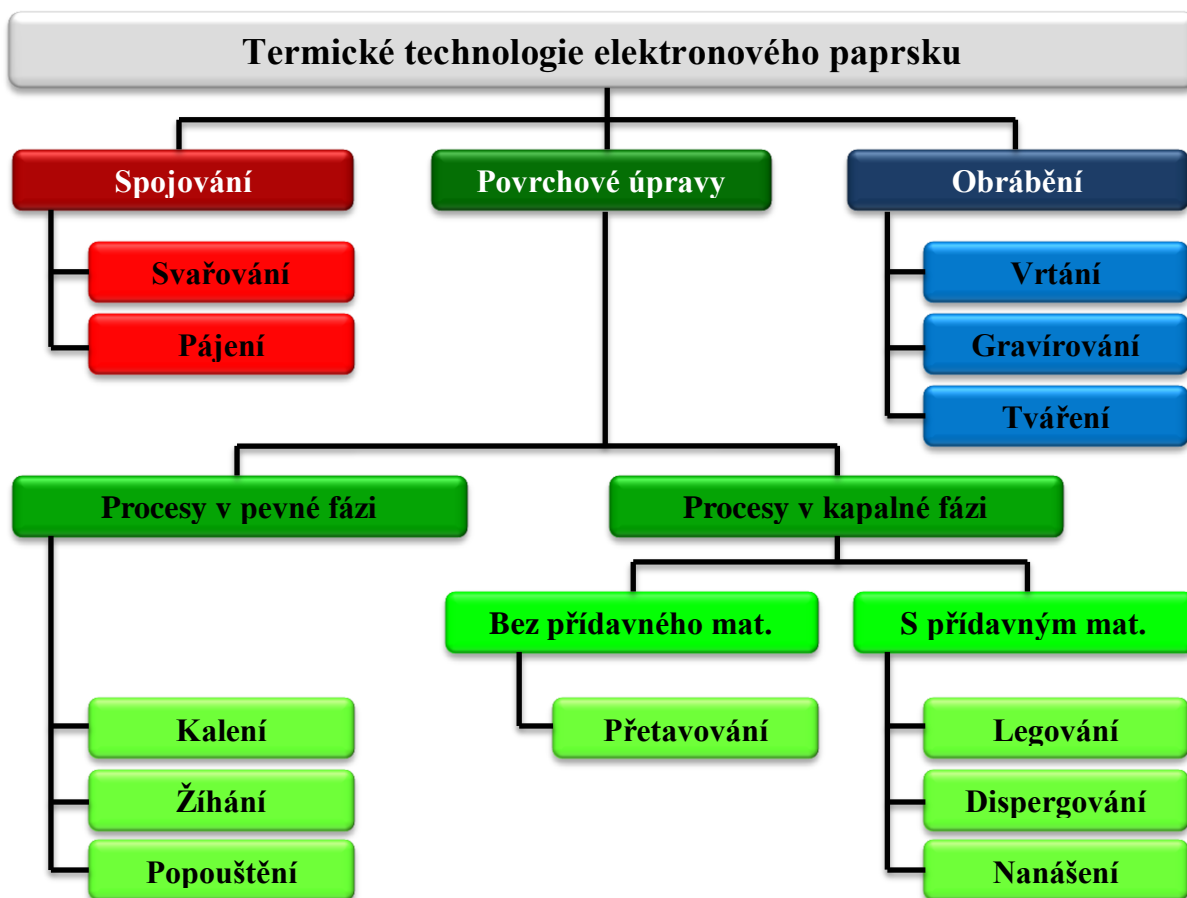
Obr. 3.1 Energetická bilance EB procesu povrchového zpracování:
a) interakce s materiálem; b) technologického systému [32]

V závislosti na energetické hustotě připadající na ozařovanou plochu probíhají v materiálu různé změny, čímž se navzájem jednotlivé procesy odlišují (**Obr. 3.2 [32]**). V případě, že nedojde k překročení teploty tání, zůstává materiál v pevném skupenství a pouze se transformuje za vzniku pevnějších fází. Při překonání teploty tání vzniká stejně jako u svařování tavná lázeň, která po přerušení působení paprsku rychle tuhne. Když je hustota energie natolik vysoká, že dojde k dostatečnému přehřátí taveniny, popřípadě až na bod varu, dochází k intenzivnímu vypařování a jako v případě hlubokého svařování vzniká plynová kapilára. I v tomto případě po ukončení působení elektronového svazku nebo jeho posunutí, dochází ke vzniku ztuhlé vrstvy, která je ovšem výrazně silnější než v případě bez plynové kapiláry. [32]



Obr. 3.2 Procesy přeměn materiálů v závislosti na rostoucí energetické hustotě EB: a) kalení, žihání; b) tavení bez plynové kapiláry; c) tavení s plynovou kapilárou [32]

Technologie využívající termických účinků elektronového paprsku lze tedy rozdělit na spojování, obrábění a povrchové úpravy, jak naznačuje **Obr. 3.3** [32]. Technologie povrchového zpracování se dále dělí v závislosti na vztahu teploty zpracování (T_z) a teploty tání základního materiálu (T_t) na procesy v tuhé ($T_z < T_t$), respektive kapalné ($T_z > T_t$) fázi. Nejznámějším a nerozšířenějším postupem je povrchové kalení.

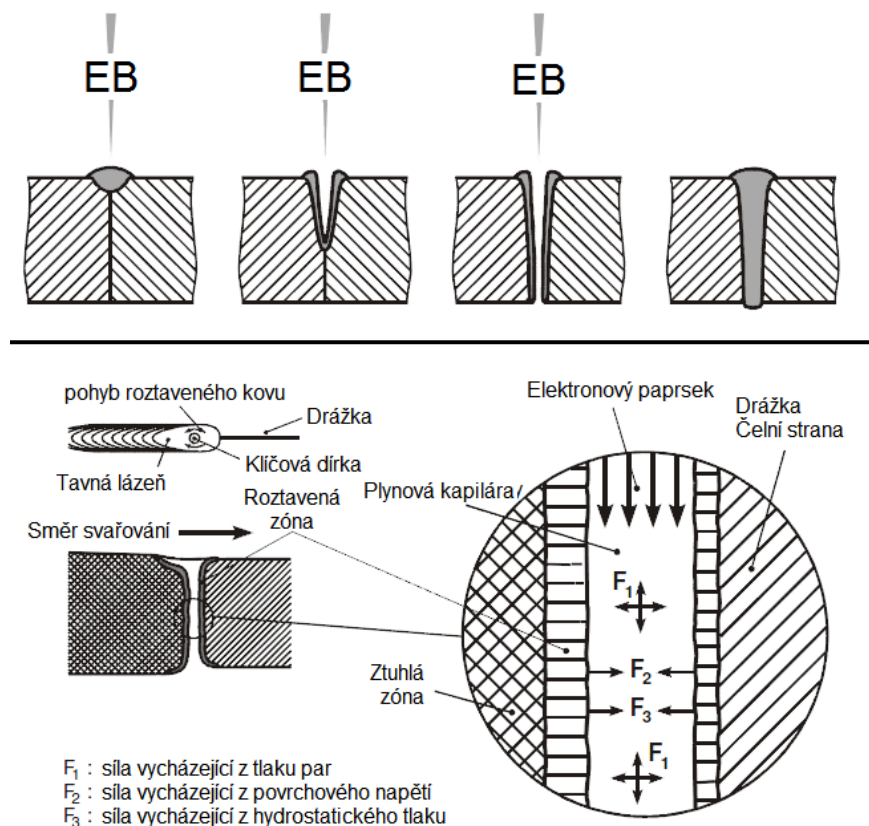


Obr. 3.3 Přehled metod termických technologií elektronového paprsku [32]

3.1 Svařování a pájení

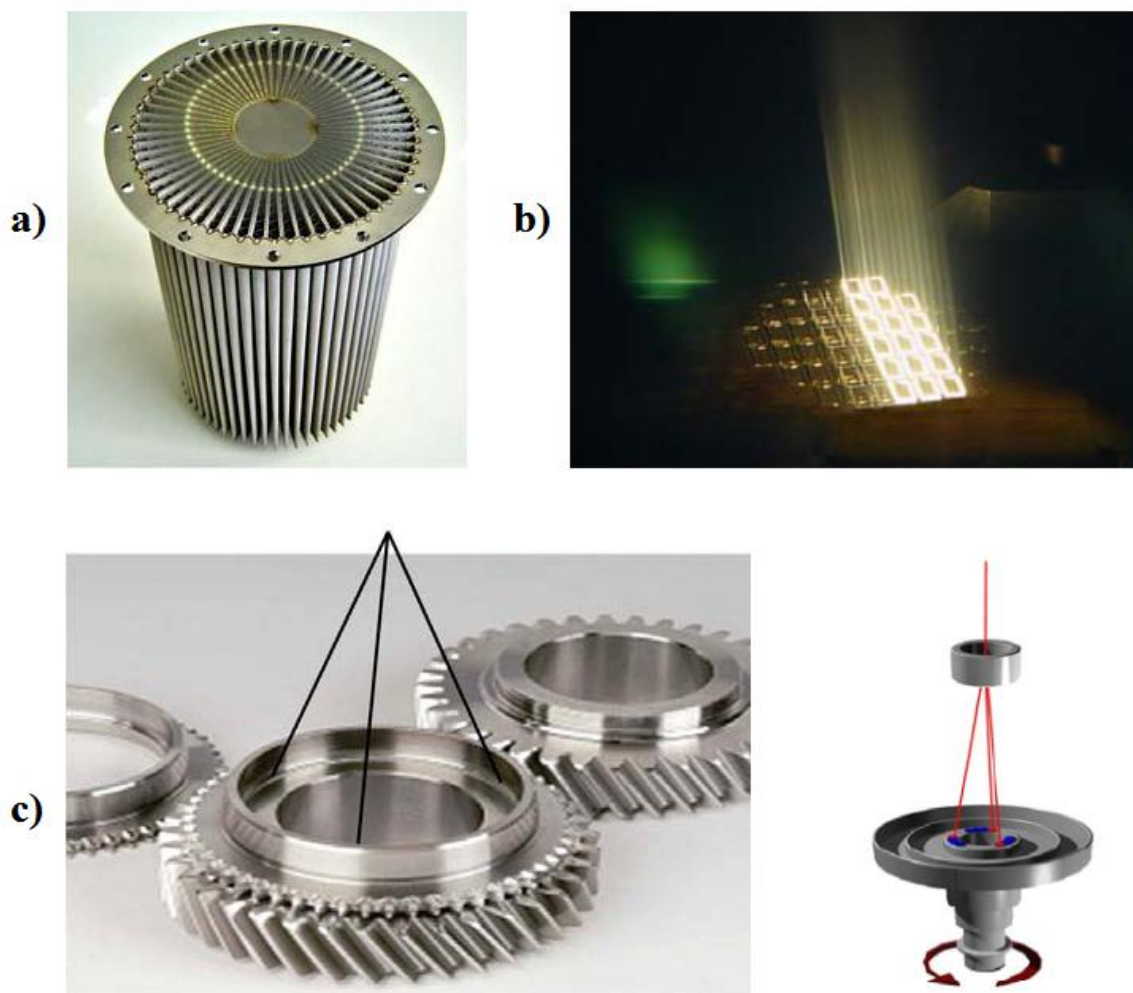
Svařování elektronovým paprskem lze zřejmě v dnešní době označit jako nejznámější a nepoužívanější EB technologie. Zaostřený elektronový svazek dopadající na povrch zahřívá materiály na teplotu vyšší, než je teplota tání svařovaných materiálů. Jsou-li materiály správně sesazeny a paprsek zaměřen, tak dochází na rozhraní k promísení obou matričních kovů (většinou bez nutnosti přidávat další materiál) a po zchlazení vzniká pevný svarový spoj charakteristického nožovitého tvaru. Ačkoliv elektrony penetrují do hloubky jen několika milimetrů, díky tzv. hloubkovému efektu (anglicky nazývaný jako „deep penetration effect“) mohou na dnešních moderních zařízeních vznikat průvary až 300 mm v nerezavějící oceli a 200 mm v mědi na jeden průchod. Svary vytvořené EB technologií jsou charakteristické minimální velikostí tepelně ovlivněné zóny a poměrem šířky k hloubce svaru 1:30. Na druhou stranu jiné typy zařízení mohou vytvářet mikrosvary o submilimetrových až milimetrových rozměrech. [7] [33]

Princip hloubkového efektu spočívá v tom, že materiál je zahřát na výparnou teplotu a vznikající pára vytlučuje taveninu do stran. Vzniká tím kapilára (v literatuře často označována jako klíčová dírka – keyhole), jež umožňuje elektronovému paprsku pronikat do podstatně větších hloubek. Princip vzniku kapiláry a silové působení uvnitř kapiláry nastiňuje **Obr. 3.4** [3]. Je zřejmé, že rychlost penetrace tepla směrem do hloubky výrazně vyšší než odvod tepla do stran, což se také projevuje vznikem úzké tepelně ovlivněné oblasti. Díky malému tepelnému ovlivnění lze EB svařování mimo jiné využít při potřebě vytvořit svar v blízkosti části citlivé na zvýšenou teplotu (např. pájených spojů). [7]



Obr. 3.4 Princip procesu hlubokého svařování (nahore) díky tvorbě kapiláry (klíčová dírka) a schématické naznačení podmínek v plynové kapiláře (dole) [3]

Díky rozvoji elektroniky lze vyvíjet na poli svařování elektronovým paprskem nové techniky, které jsou výjimečné a jinými zařízeními neproveditelné. Velmi rychlé vychylování paprsku umožňuje vytvořit a udržovat současně několik tavných lázní a provádět tzv. vícebodové (multikapilární) svařování (anglicky označované jako „multipoint“ nebo „multipool welding“). Mezi přední výhody tohoto procesu patří minimalizace deformací vznikajících v důsledku tepelného ovlivnění svařovaných součástí. Několik případů použití vícebodového svařování je uvedeno na **Obr. 3.5** [30].



Obr. 3.5 Příklady souběžného multikapilárního svařování: a) filtr pevných částic se šedesáti svary; b) tepelný výměník; c) ozubené kolo automatické převodovky (vlevo) svařené 3 paprskovou technologií schematicky naznačenou vpravo [30]

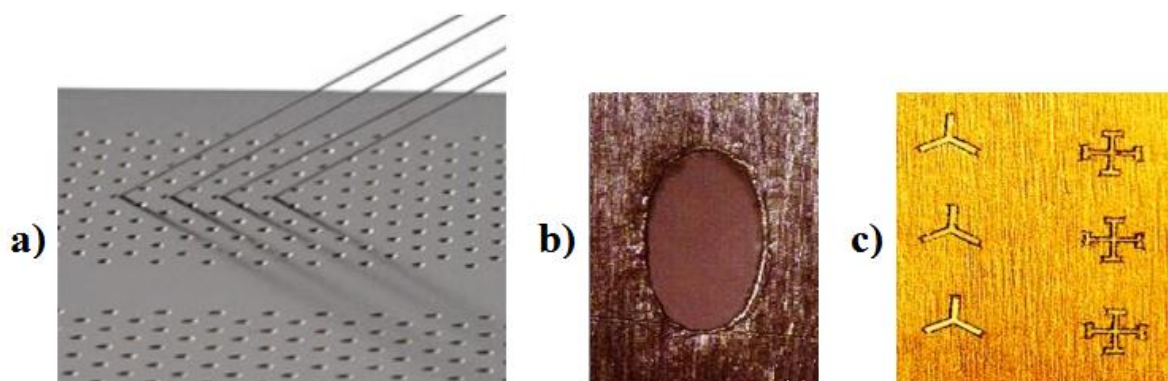
Významnou pozici si také svařování EB vydobylo na poli spojování materiálů s rozdílnými vlastnostmi. Potřeba použití odlišných materiálů může vycházet z vysoké náročnosti dané aplikace (např. při vysokém tepelném zatížení funkční plochy lze použít wolfram, molybden nebo tantal), z ekonomických důvodů, lepší obrobitelnosti nebo jiných důvodů. Bohužel některé kombinace kovů (např. hliník-titan, nikl-stříbro, měď-ocel) nelze konvenčními technologiemi svařit. Podklady dále uvádí, že pomocí EB lze spojovat také ocel s wolframem, tantalem a molybdenem, či ocel s hliníkem. [4] [33]

3.2 Vrtání

První otvory, které se podařilo vyvrtat do tenké kovové fólie, vznikly počátkem 40. let minulého století. Byly provedeny na elektronovém mikroskopu, ze kterého byly vyjmuty clonící prvky za účelem zisku dostatečného výkonu. První otvory vyrobené na přístroji k tomu určenému, který byl používán především na výrobu diamantových ložisek do hodinek, pocházejí z roku 1953. [33]

Pro účely děrování se i dnes konstruují speciální zařízení, neboť je zapotřebí svazek velmi přesně fokusovat pro dosažení vysoké energetické hustoty. Proto se často volí elektronová optika s dvoučočkovým systémem, který umí lépe korigovat vady svazku. Průměry zhotovených otvorů se poté pohybují v řádech setin až jednotek milimetrů. Charakteristickým rysem této technologie je výrazný poměr šířky a hloubky otvorů, který může dosahovat hodnot vyšších jak 1 : 25. Změnami parametrů svazku lze také ovlivňovat profil finálního vývrtnu (od cylindrických po kuželové). Pro zmenšení tepelně ovlivněné oblasti se provozují zařízení většinou v pulzních režimech, neboť mezi pulzy dochází k odvedení tepla do objemu materiálu. [7]

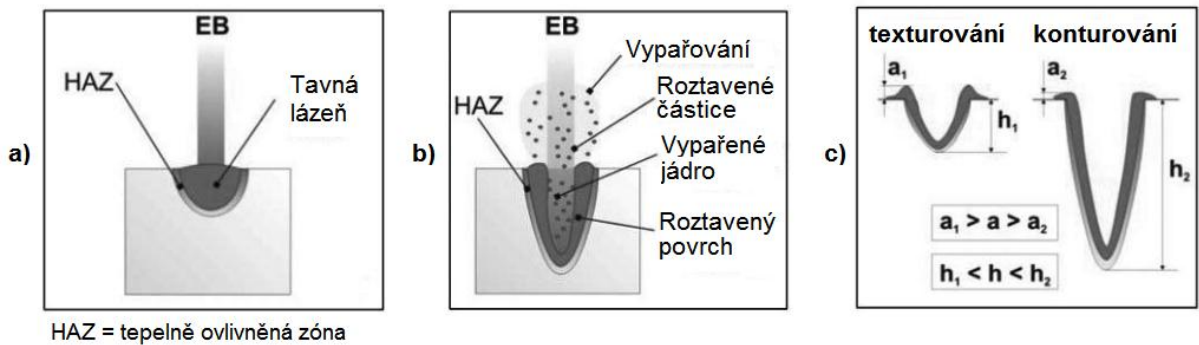
Mezi výhody vrtání pomocí elektronového svazku patří také možnost vytvářet otvory šikmo k vrtanému povrchu. Dalším pozitivem technologie je vysoká rychlost děrování (až 3 000 děr za sekundu) a tedy i produktivita. Díky postupnému vylepšování elektroniky byla vyvinuta zajímavá metoda tzv. vrtání za letu (z anglického „drill on fly“). Součást rotačního tvaru se pohybuje a elektronový paprsek kopíruje její pohyb. Díky tomu svazek dopadá stále na jedno místo za vzniku kruhového otvoru. Je tedy zřejmé, že přesným naváděním paprsku je možno vytvořit otvory i jiných složitějších tvarů (např. elipsy či křížky). Příkladem radiálního vrtání může být zvlákňovací hlava na **Obr. 2.1** [25]. Vývrty vedené šikmo k obráběnému povrchu a otvory s komplikovanějším průřezem jsou vyobrazeny na **Obr. 3.6** [1] [22]. [7]



Obr. 3.6 Příklady možností vrtání materiálů: a) otvory o průměru 0,5 mm pod úhlem 30° k povrchu v oceli [22]; b) otvor s elipsovitým průřezem o délce 3 mm a šířce 1,5 mm c) vývrty s komplikovanými tvary v průřezu [1]

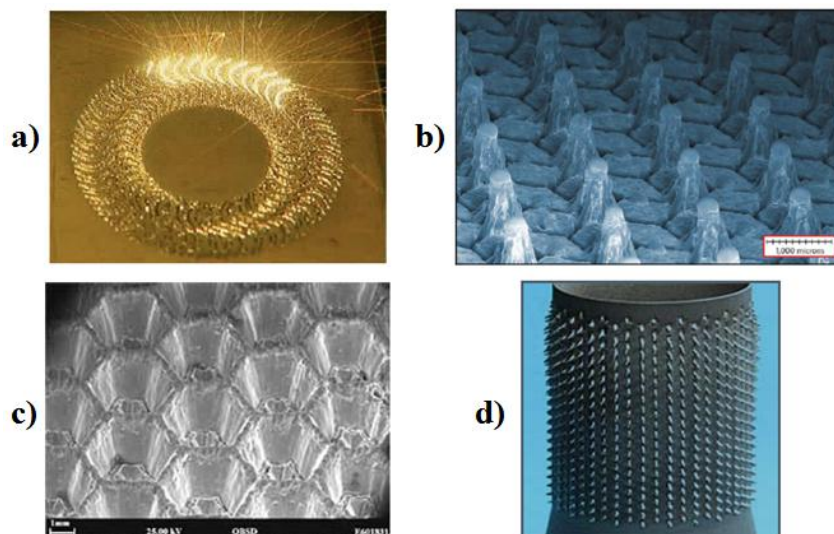
3.3 Gravírování

Smyslem gravírování je vytvoření textury na povrchu základního materiálu. Princip metody je vysvětlen na **Obr. 3.7** [31]. V první fázi je malá plocha materiálu ozařována elektronovým paprskem a v důsledku toho dochází k natavení povrchu matrice. Hustota dodávané energie je vysoká, a proto dochází k vypařování kovu a vzniku kapiláry. Část kovu se vypaří a část vystřikuje ven z kapiláry a tím v závislosti na materiálu vznikají prohlubně nebo výstupky. [31]



Obr. 3.7 Princip gravírování: a) natavení povrchu; b) vytvoření plynové kapiláry; c) tvorba prohlubní a výstupků [31]

Společnost TWI vyvinula zajímavou metodu úpravy povrchu zvanou Surfi-Sculpt™. Roztavený materiál je přemísťován působením pohybujícího se elektronového paprsku a opakovanými průchody EB vznikají na povrchu prohlubně a výstupky. Vhodným řízením svazku je možné vytvářet komplikovanější struktury o rozměrech až několika milimetrů. **Obr. 3.8** [7] uvádí příklad povrchu upraveného pomocí technologie Surfi-Sculpt™. Gravírovací technologie vytvářející na povrchu obrobku texturu se využívají v technické praxi například pro zlepšení tribologických vlastností, zvětšení stykové plochy chladicích vložek. [7] [33]

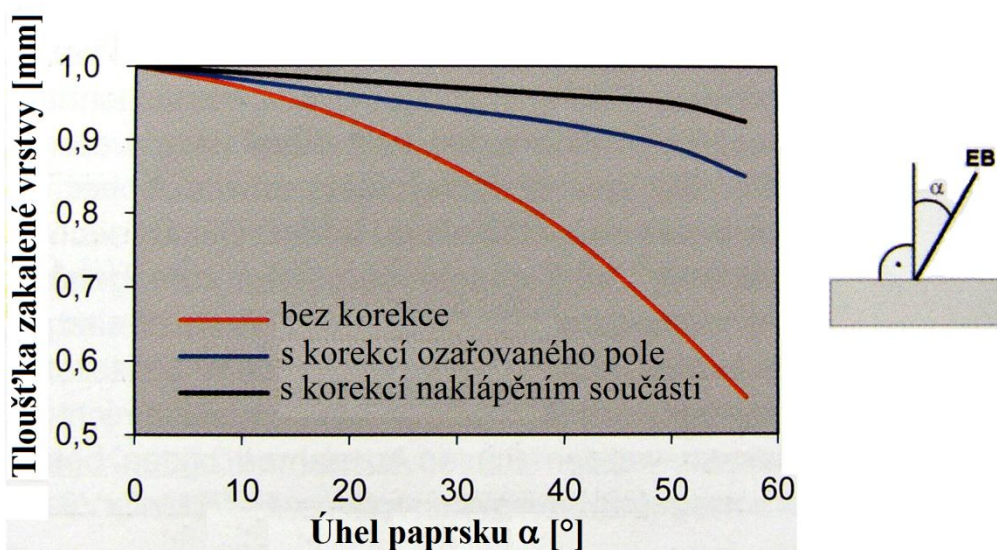


Obr. 3.8 Technologie Surfi-Sculpt™: a) postup vytváření; b) detail struktury-hroty; c) plástvová struktura, d) válec pokrytý hroty [7]

3.4 Kalení

Kalení (EBH) je asi nejvýznamnější technologií s využitím EB v tuhé fázi. Na počátku procesu dochází k prohřátí základního materiálu do určité hloubky (0,1 až 2 mm) na teplotu (těsně) pod bodem tání. Dále následuje krátká výdrž na teplotě (od desetin až po jednotky sekund) a poté velmi rychlé ochlazení vnitřním odvodem tepla způsobující martenzitickou transformaci. Finální tvrdost u objemového kalení, popř. u jiných metod povrchového kalení (plamenem, indukční, ...), závisí na použitém kalicím médiu. Při pomalém chlazení nelze dosáhnout požadované tvrdosti. U procesu EBH tento vliv odpadá, protože proces probíhá ve vakuu a k ochlazení dochází pouze odvodem tepla do zbývajícího objemu materiálu. V závislosti na tloušťce ohřáté vrstvy, teplotě kalené součásti a tepelné vodivosti materiálu se může jednat o rychlosti až $10^4 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$.

Množství tepla, které je schopen materiál odvést z ovlivňované zóny, má přímý dopad na sílu zakalené vrstvy a závisí na celkovém objemu součásti, respektive tloušťce materiálu. V případě, že dodávaná energie nemůže být dostatečně rychle odváděna, dochází k ohřívání součásti, což vede ke snížení teplotního gradientu mezi povrchem a jádrem, a rychlost ochlazení nedosahuje potřebné kritické hodnoty pro vznik martenzitu. Tloušťka zakalené vrstvy závisí ale také na úhlu dopadu paprsku na povrch součásti. Energetické ztráty v ovlivňované zóně při úhlu dopadu 60° činí bez dalších opatření přibližně 50 %. Množství ztrátového tepla lze částečně korigovat úpravou ozařovaného pole nebo naklápěním součásti. Graf na **Obr. 3.9** [32] představuje míru ztrát energie (vyjádřeno pomocí poklesu tloušťky zakalené vrstvy) v závislosti na úhlu dopadu včetně případů, kdy byly využity korekce. [32]

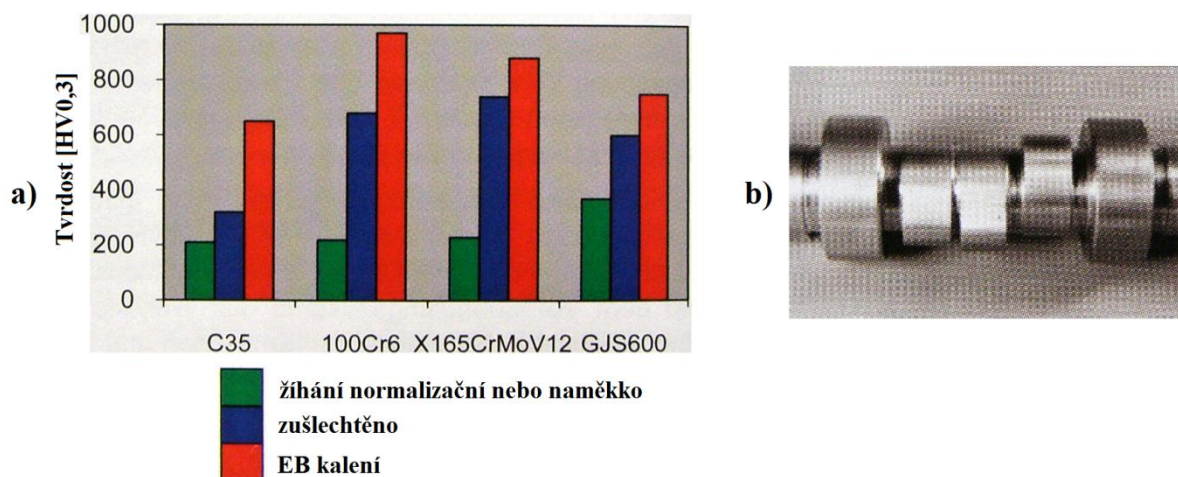


Obr. 3.9 Závislost maximální dosažitelné hloubky zakalené vrstvy na dopadovém úhlu elektronového paprsku [32]

Povrchové kalení se provádí za účelem získání tvrdé povrchové vrstvy o určité tloušťce na jádru, které zůstává houževnaté a plastické. Díky EBH vznikají povrchy s výrazně vyššími tvrdostmi, než v případě jiných technologií, což demonstruje **Obr. 3.10a** [32]. Jak se již ukázalo, modifikovat vlastnosti povrchové vrstvy pomocí EB je možné nejen u kovů, ale také i u polymerních látek. Důkazem může být práce [13] prováděná na poly(methyl methakrylátu). Působení dostatečné elektronové hustoty paprsku způsobí v materiálu

transformační procesy a vzniká tím modifikovaná vrstva, jež má např. zvýšený modul pružnosti z původních 5,6 GPa na hodnotu 22,9 GPa.

V průmyslové praxi si EBH našlo uplatnění především v automobilovém průmyslu (sedla ventilů, vačkové a klikové hřídele), ale také i v jiných odvětvích strojírenství (např. na kluzné plochy). Na **Obr. 3.10b** [5] je uveden příklad kaleného vačkového hřídele.



Obr. 3.10 a) porovnání povrchové tvrdosti materiálů dosažené konvenčním tepelným zpracováním a kalením pomocí EB [32]; b) vačkový hřídel se zakalenými kontaktními plochami pomocí elektronového paprsku [5]

3.5 Žihání

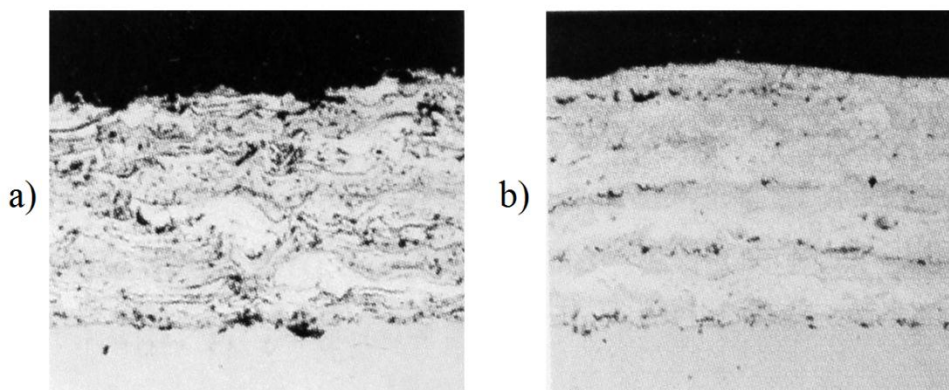
Další významnou technologií zpracování materiálů v tuhé fázi je žihání. Využití nachází například u slitin hliníku či hořčíku, kdy se na povrchu součásti vytvoří velmi jemnozrná vrstva, která slouží jako lokální ochrana proti korozi nebo také únavě. Jinou výhodnou aplikací může být lokální zlepšování tvářitelnosti u austenitických ocelí, díky rychlému zahřátí materiálu na teplotu přibližně $0,4 \cdot T_t$ a při následném rychlém ochlazení vzniká jemná tvárná rekrystalizovaná struktura. Při procesu je zapotřebí dodat materiálu přesně definované množství energie, jinak velmi rychle dochází k hrubnutí zrna nebo i k nechtěnému natavení. Jako další případ využití lze uvést například rekrystalizační žihání již ohnutých tenkostěnných plechů, ale také lze díky rekrystalizaci plechy ohýbat na přesně definované úhly. Posledně zmíněná technologie ovšem je velmi náročná na přesné nastavení technologických parametrů (dodaná energie, velikost ozařované plochy, intenzita atd.) [32]

Aplikace technologie žihání pomocí elektronového paprsku na velké objemy materiálů či na dlouhodobá žihání potřebná pro difúzní pochody na dlouhé vzdálenosti je stejně jako u jiných vysokoenergetických zdrojů nevýhodné a neefektivní.

3.6 Přetavování

Základní technologii povrchového zpracování materiálů v kapalně fázi je přetavování. Tato metoda byla patentována Marcellem Piranim v roce 1905, tedy již v první fázi objevu a vývoje technologie elektronového svazku. Mezi výhody přetavování pomocí EB patří díky práci s vysokoenergetickým zdrojem ve vakuu možnost zpracovávat obtížně tavitelné nebo vysoce reaktivní kovy či slitiny, jako např.: titan, wolfram, molybden, tantal, niob, vanad, platina, aj. Vlivem dodávky vysoké hustoty energie dochází k rychlému ohřevu materiálu a jeho natavení. Následuje krátká výdrž na teplotě (maximálně několik sekund) a poté je dodávka energie ukončena. Vlivem odvodu tepla do zbylého objemu materiálu dochází k rychlému ochlazení součásti. Vysoké rychlosti ohřevu a ochlazení způsobí vznik jemnozrnné struktury v ovlivňované oblasti. Takto upravená vrstva vykazuje lepší odolnost proti některým druhům koroze (např. u hořčíkových slitin), ale také vyšší tvrdost. Zatím bylo dosaženo maximálně dvojnásobné tvrdosti. Ovšem u některých materiálů, jako například u vytvrzených hliníkových slitin, může docházet naopak k poklesu tvrdosti. [7] [32]

Technologie EB přetavování nalézá také uplatnění u více či méně porézních materiálů (např. hliníkové slitiny, slinuté materiály, atp.) případně vrstev (např. žárové nástřiky). Rychlým termickým cyklem dochází k vytvoření (téměř) neporézní přetavené mikrostruktury, což je způsobeno rychle se pohybující tavnou lázní v okolí plynové kapiláry a vakuem jako procesní atmosférou. Tento efekt je demonstrován **Obr. 3.11** [32], na němž je zobrazen nástřik ložiskového bronzu na oceli, následně přetavený pomocí EB. I v případě přetavování dochází ke zjemnění zrna v ovlivněné oblasti, což se obvykle projevuje zvýšením povrchové tvrdosti a zlepšením korozního chování. Dále u žárových nástřiků dochází navíc ke snižování obsahu oxidů a také díky natavení k lepšímu propojení se základním materiálem. Příkladem může být práce [6], v níž je sledován vliv procesu přetavování na chování oxidů ve vrstvě MCrAlY (kde M je buď Co, Ni, nebo Co/Ni). [32]

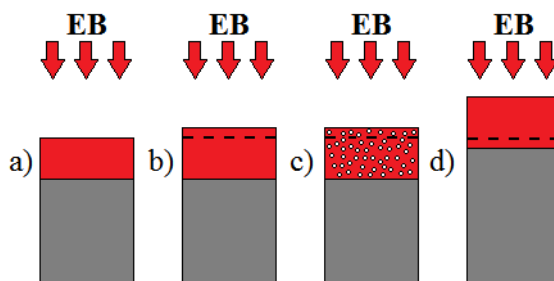


Obr. 3.11 Žárový nástřik ložiskového bronzu na oceli (a), u kterého došlo ke snížení pórovitosti díky přetavení vrstvy pomocí elektronového paprsku (b) [32]

U slitin železa dochází vlivem rychlého ochlazení k transformačnímu vytvrzování. Toho lze využít nejen u ocelí, ale především u litin. Příkladem může být zpracování litiny s lupínkovým grafitem, kdy se nataví povrchová vrstva a rychlým ochlazením vzniká jemná ledeburitická struktura. Mezi výhody takto připravené vrstvy patří vysoká odolnost proti opotřebení.

3.7 Legování, dispergování, nanášení

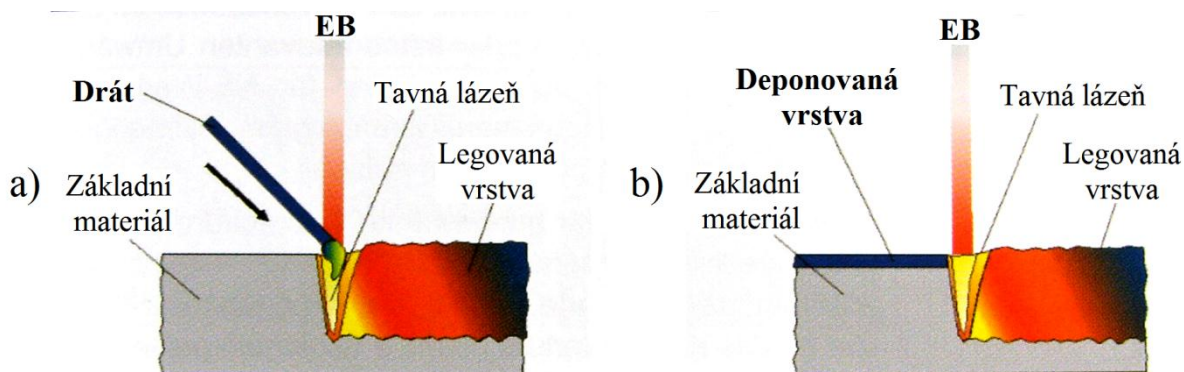
V případě legování, dispergování i nanášení se jedná o EB technologie povrchového zpracování materiálů v kapalně fázi s přidavkem příměsového materiálu, kde **Obr. 3.12 [32]** se snaží postihnout základní rozdíl mezi jednotlivými metodami.



Obr. 3.12 Princip a rozdíl mezi technologiemi povrchového zpracování pomocí EB v kapalně fázi: a) přetavování (bez přidavného materiálu); b) legování; c) dispergování d) nanášení [32]

Technologie povrchového legování (**Obr. 3.12b [32]**) je velmi podobná procesu přetavování pomocí EB (**Obr. 3.12a [32]**), jen v tomto případě je do tavné lázně přidáván legující materiál. Materiály v kapalně fázi se díky difúzi promíchají a po ztuhnutí vzniká na povrchu vrstva se změněným chemickým složením, která tedy vykazuje odlišné chování oproti matici. Značnou výhodou povrchového legování je možnost výběru z různých kombinací základního a přidavného materiálu, díky čemuž lze součást lépe uzpůsobit pro požadovanou aplikaci. Je ale také samozřejmé, že některé kombinace materiálů nejsou vhodné z důvodu špatné rozpustnosti legujícího prvku, tvorby fází, atd. **Tab. 3.1 [32]** uvádí příklad několika použitelných příměsových materiálů pro vybrané matrice. [32]

Depozice přidavných materiálů se u povrchového legování rozlišuje na jednostupňovou a dvoustupňovou [**Obr. 3.13 [32]**]. V prvním případě je příměs dodávána přímo do tavné lázně ve formě drátu či drátu plněného práškovou příměsí. Jednostupňový proces se volí v případě, že jsou vytvářeny malé oblasti odolné proti opotřebení či korozi a/nebo je zapotřebí přidávat lokálně relativně velké množství materiálu. U dvoustupňové technologie se nejprve přidavný materiál nanáší na povrch součásti (žárový nástřik, sítotisk, slinování, atp.) a následně je povrch i s příměsí přetaven pomocí elektronového paprsku. Tento přístup se volí v případě, že má být zpracovávána velká plocha součásti, přidavný materiál není dostupný ve formě odpovídajícího drátu, či tvar součásti neumožňuje přivádění drátu.



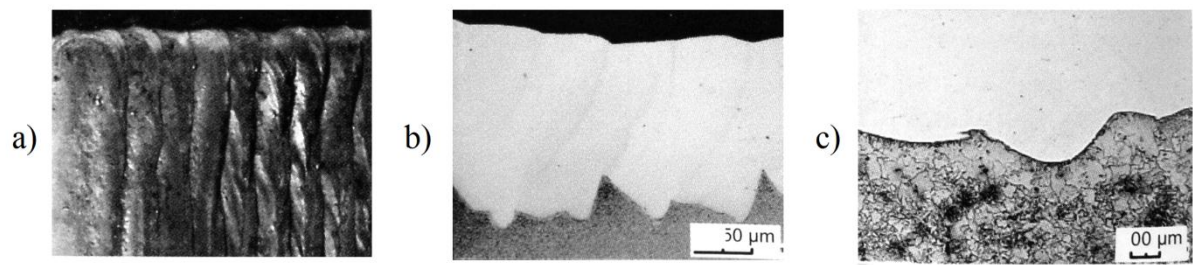
Obr. 3.13 Depozice přidavných materiálů pro povrchové legování pomocí EB: a) jednostupňová; b) dvoustupňová [32]

Tab. 3.1 Výběr přídavného materiálu pro EB legování pro rozdílné matrice [32]

Přídavný materiál		Báze základního materiálu			
Báze	Příměs	Fe	Al	Mg	Ti
Al	Mo				X
	Ti			X	
	Si		X	X	
	Zr			X	
Ni	Cr-B-Si, Cr-Al	X			
	Al		X		
	Cr, Cr-Fe	X	X		
Fe	Al, Al-Cr		X		
	Cr-C-V-W, +B	X			
Cu	Ni, Ni-Cr		X		X
Co	Cr-Fe-Ni-Mo, + W		X		
Ti	Al		X	X	

Technologie dispergování je principem velmi podobná legování. I v tomto případě dochází k natavení povrchové vrstvy materiálu do určité hloubky (od desetin po jednotky milimetrů). Ovšem u technologie dispergování se přidávají k základnímu materiálu nerozpustné tvrdé částice, které se v tavenině rozptýlí (**Obr. 3.12c [32]**). Jakmile je dodávka energie přerušena, dochází k rychlému odvodu tepla a natavená vrstva s disperzí tuhne. Za přídavný materiál se velmi často volí tvrdé částice karbidů (např. WC, VC, Cr₃C₂, TiC, atp.), nitridů (AlN), boridů (AlN), či vybraných oxidů (Al₂O₃). [32]

Technologický proces nanášení je také velmi podobný legování. V tomto případě ale vzniká nová povrchová vrstva, která je tvořena téměř výhradně přídavným materiálem (**Obr. 3.12d [32]**). Pro zajištění soudržnosti nanášeného a základního materiálu dochází také k natavení povrchu součásti, ale jedná se o velmi malé hloubky (od 0,05 do 0,25 mm). Vyráběná vrstva i v tomto případě neobsahuje žádné póry či praskliny. Nanášený přídavný materiál, běžně dodávaný ve formě drátu nebo prášku, se obvykle vybírá podle specifických požadavků, které jsou v dané aplikaci vyžadovány, jako např. vysoká odolnost proti kavitačnímu (elektrárenské turbíny, atp.) či abrazivnímu opotřebení. Na **Obr. 3.14 [32]** je uveden příklad vrstvy nanášené na oceli. [32]



Obr. 3.14 Vrstva NiCrBSi nanesená na oceli a) nánosové housenky; b) řez nanesenou vrstvou; c) přechod vrstva a základní materiál [32]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Již v úvodu bylo nastíněno, že hlavním úkolem této diplomové práce je vytvoření co možná nejhlubší zakalené vrstvy u tří typů materiálů. Zadání specifikuje, že experimenty mají být provedeny na uhlíkové, konstrukční nízkolegované a nástrojové oceli a byly tedy zvoleny materiály odpovídající těmto kritériím. Technologie povrchového kalení elektronovým paprskem disponuje mnoha parametry, které lze na zařízení měnit a ovlivňovat tím proces. V rámci diplomové práce byl tedy dále sledován vliv vybraných veličin na velikost, tvar a vlastnosti zhotovené zakalené vrstvy.

4.1 Zařízení pro ohřev elektronovým svazkem

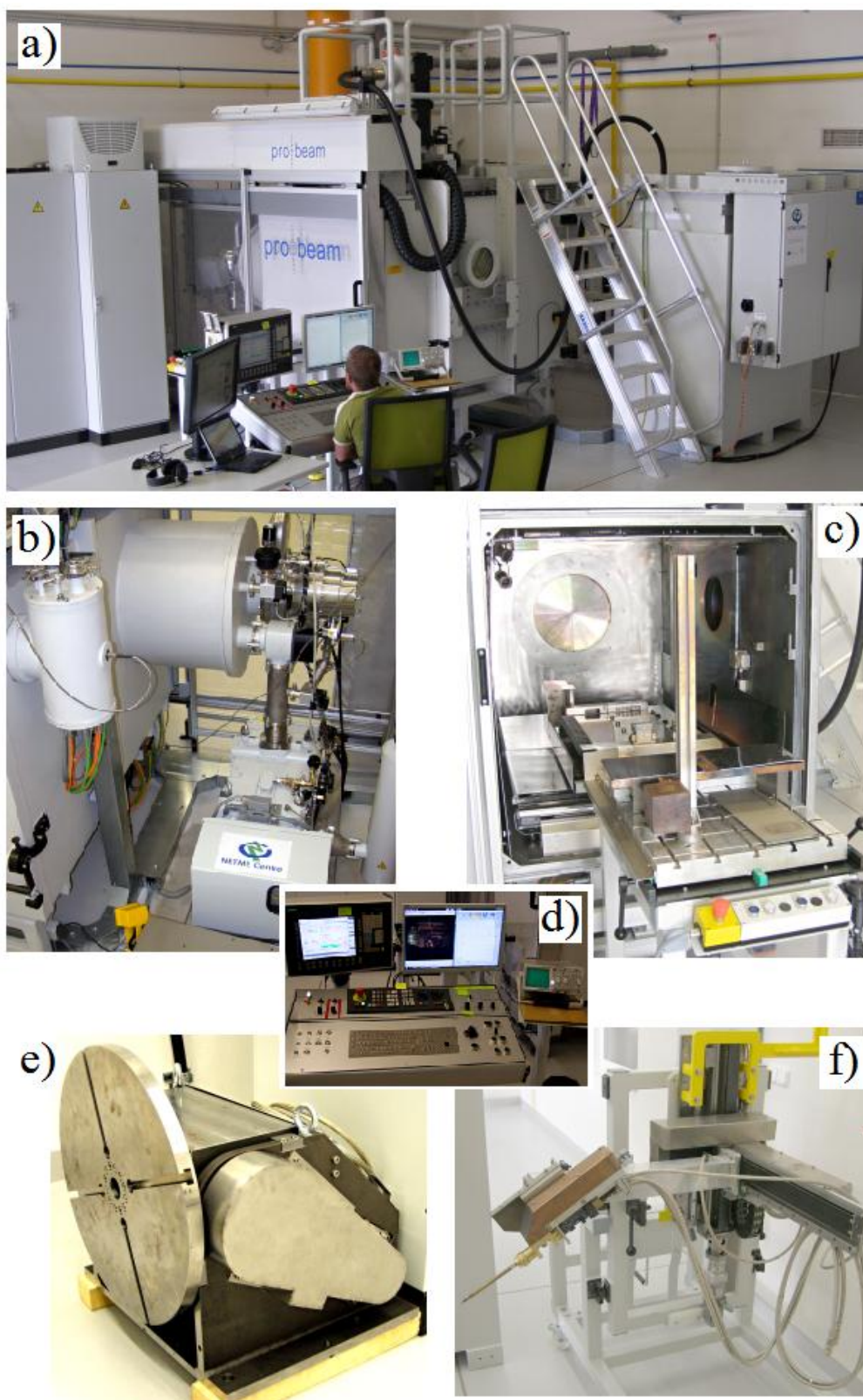
V rámci projektu NETME centre v Brně bylo zakoupeno nové zařízení pro svařování a povrchové tepelné zpracování s pomocí elektronového paprsku. Dodaný stroj nese označení **PROBEAM K26** a disponuje numericky řízeným polohovacím systémem operujícím ve dvou (stůl X-Y) až čtyřech (stůl X-Y + polohovací zařízení A-B) osách. Zmíněné polohovací zařízení se umísťuje na X-Y stůl a umožňuje náklon součástí v rozmezí 0° až $+90^\circ$ a dále rotaci kolem osy kolmé na osu náklonu s rychlostí otáčení až $100 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Zařízení také disponuje systémem pro podávání drátu do oblasti působení elektronového paprsku s možností vlastního pohybu ve třech nezávislých osách (XD, YD, ZD). **Tab. 4.1 [27]** doplňuje další technické parametry zařízení. [27]

Tab. 4.1 Základní technická specifikace zařízení elektronového paprsku [27]

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

V případě potřeby je možné do vakuové komory zavádět procesní a inertní plyny nebo chladičí vodu (pouze příprava formou dostatečného množství potřebných průchodek do komory). Celé zařízení je ovládáno pomocí průmyslového řídicího systému Sinumerik dodávaného společností Siemens AG. Stroj umožňuje využívat veškeré EB technologie zmíněné v kapitole 3 vyjma vrtání. Předností stroje je možnost umístění elektronového děla

do dvou základních pozic a provádět tak technologické operace jak ve vertikálním, tak i horizontálním směru. Na **Obr. 4.1** je uvedeno několik snímků daného zařízení.



Obr. 4.1 Zařízení pro ohřev elektronovým svazkem: a) celkový pohled; b) vakuový systém komory; c) pohled do komory s x-y stolem; d) ovládací pult; e) polohovací zařízení; f) demontovaný systém podávání drátu

4.2 Experimentální materiál

V této kapitole budou nejprve popsány materiálové vlastnosti významné pro EBH. Dále následuje popis materiálů vybraných dle zadání práce (uhlíková, konstrukční nízkolegovaná a nástrojová ocel) a použitých při experimentech.

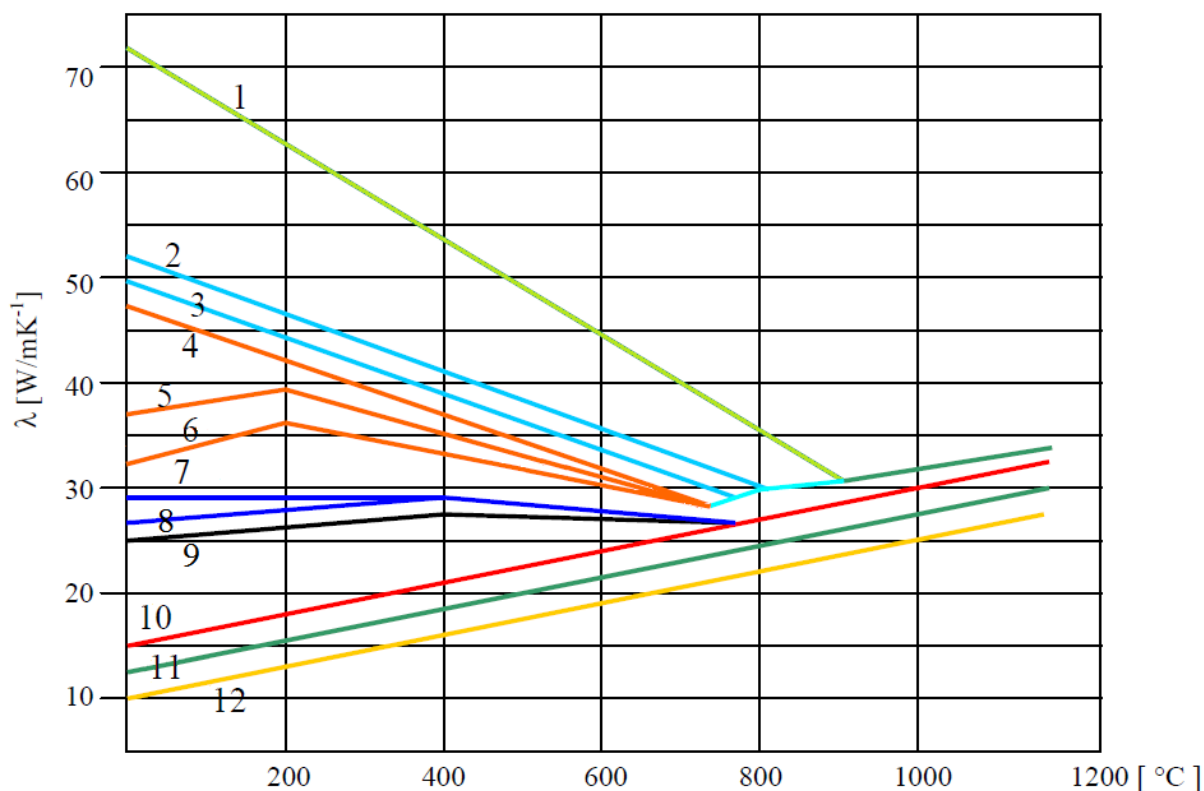
4.3 Materiály vhodné pro EBH

Aby bylo možné nelegované oceli kalit, je zapotřebí minimální obsah uhlíku 0,2 %. V případě, že ocel se obsahuje více než 0,35 % uhlíku, pak lze označit za dobře kalitelnou. U legovaných materiálů dochází k ovlivnění pohyblivosti uhlíku. Tento efekt se v konečném důsledku projevuje snížením potřebného obsahu uhlíku k tomu, aby byla ocel dobře kalitelná.

V případě EBH dochází k ochlazování materiálu odvodem tepla do zbývajících objemu součásti, a proto je potřeba, aby byl materiál dostatečně tepelně vodivý. Tepelná vodivost závisí na chemickém složení a s rostoucím obsahem legujících prvků klesá. Jak naznačuje schéma na **Obr. 4.2 [16]**, platící pro materiály uvedené v **Tab. 4.2 [16]**, vodivost je také funkcí teploty. V případě čistých kovů nebo slitin s nízkým obsahem legujících prvků dochází k poklesu vodivosti, ale v případě vysokolegovaných ocelí je tomu naopak. Ve stavu homogenního austenitu je tepelná vodivost většiny ocelí téměř shodná.

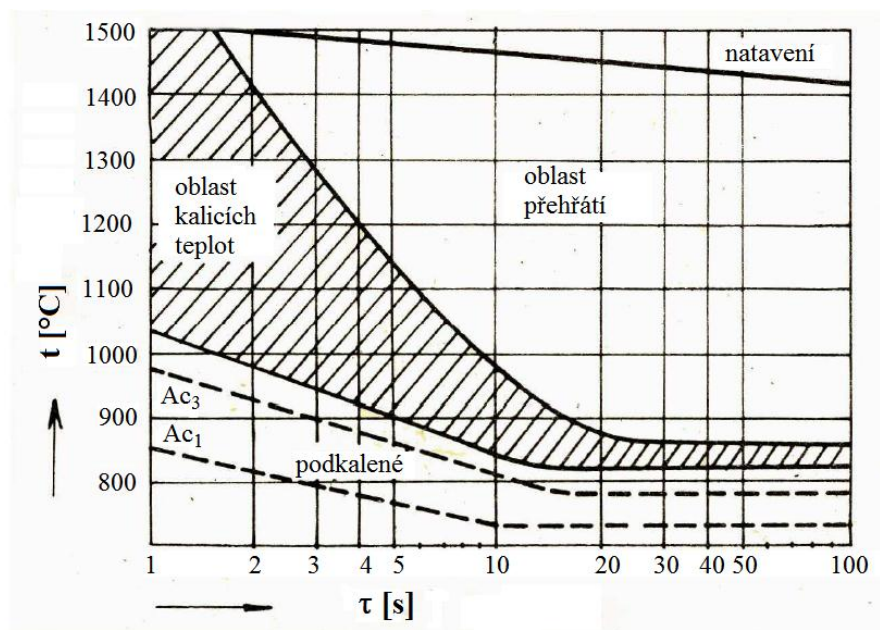
Tab. 4.2 Hodnoty tepelné vodivosti pro různé druhy ocelí za pokojové teploty [16]

Číslo	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	W [%]	V [%]	$\lambda_{20\text{ }^\circ\text{C}}$ [W·m ⁻¹ K ⁻¹]	Skupina ocelí
1	—	—	—	—	—	—	—	—	72	Čisté železo
2	0,23	0,11	0,63	—	—	—	—	—	52,5	Uhlíkové
3	0,43	0,20	0,69	—	—	—	—	—	50	Uhlíkové
4	0,31	0,20	0,69	1,09	—	—	—	—	48	Nízkolegované
5	0,32	0,18	0,55	0,78	3,50	—	—	—	37	Nízkolegované
7	0,34	0,27	0,55	0,78	3,50	0,39	—	—	33	Nízkolegované
8	0,13	0,17	0,25	13,00	0,14	—	—	—	27,5	Cr antikorozi
9	1,27	0,18	0,28	13,70	0,20	—	0,25	—	25,5	Cr antikorozi
10	0,71	—	0,25	4,30	—	—	18,40	1,1	24	Rychlořezné
11	0,08	0,68	0,37	19,10	8,10	—	0,60	—	16	Cr-Ni antikor.
12	1,22	0,22	13,00	—	—	—	—	—	13	Hedfieldova
13	0,46	1,30	1,20	15,20	26,90	—	2,8	—	10	Žárovzdorné



Obr. 4.2 Teplotní závislosti tepelné vodivosti pro oceli z Tab. 4.2 (schematicky) [16]

Dalším důležitým parametrem pro technologii kalení je teplota kalení, na kterou se materiál před ochlazením musí zahřát. U rychlých ohřevů, jako je tomu také v případě EBH, dochází k posunu teplot k vyšším hodnotám. Příkladem může být diagram oceli 12 050 na Obr. 4.3 [15], jenž zobrazuje závislost kalicích teplot na době ohřevu.



Obr. 4.3 Kalicí teploty v závislosti na době ohřevu pro mat. 12050 [15]

Prokalitelnost je spíš technologický parametr materiálů udávající hloubku, do které sahá zakalená vrstva za daných technologických podmínek kalení. Za zakalený se považuje materiál se strukturou tvořenou minimálně 50 % martenzitu. Prokalitelnost velmi závisí na chemickém složení oceli a je podmíněna tvarem ARA diagramu. Protože se ale austenit začíná rozpadat na hranicích zrn, je také pro tento parametr důležitá velikost zrn. Prokalitelnost se nejčastěji stanovuje pomocí Jominiho čelní zkoušky (ČSN EN ISO 642).

4.3.1 Uhlíková ocel

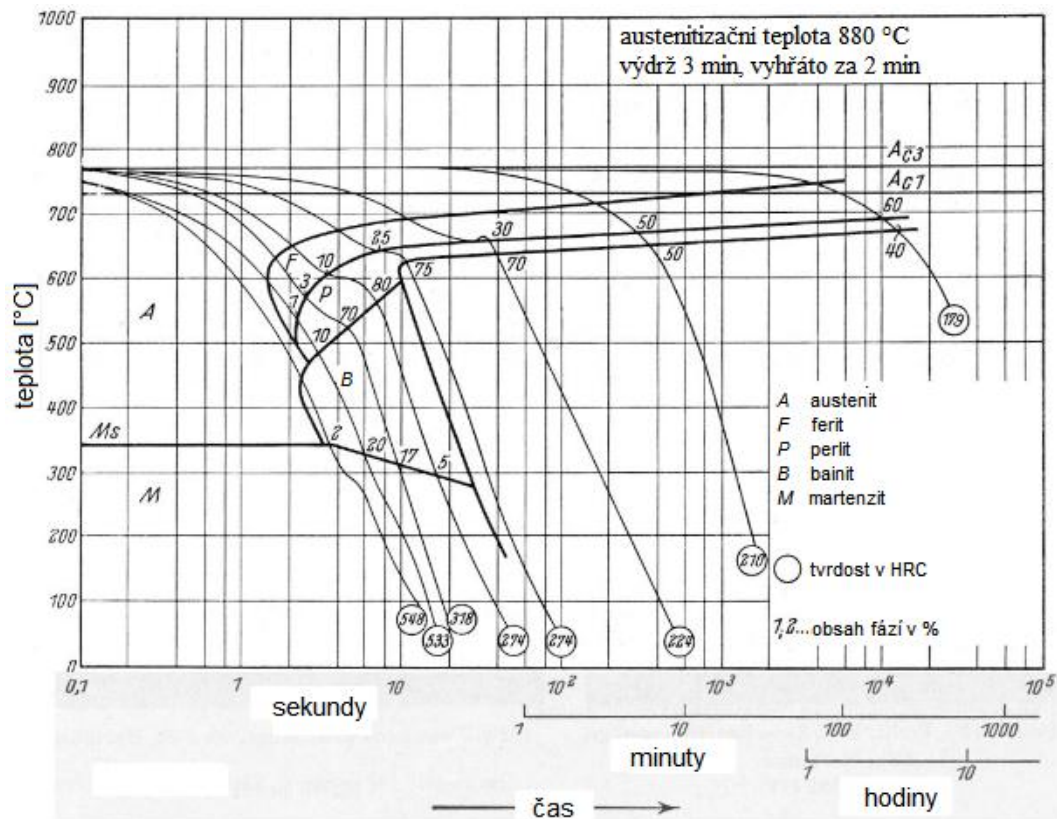
Pokusy na nelegované uhlíkové oceli (ocel 1) byly prováděny z důvodu jejích vlastností a chování při kalení, díky kterým se řadí na počátek pomyslného spektra kalitelných materiálů. Chemické složení použitého materiálu bylo analyzováno pomocí optické emisní spektrometrie s doutnavým výbojem, zkráceně GD-OES a protokol uveden v příloze 2. Ocel 1 svým chemickým složením odpovídá materiálu 12 050 (dle značení evropské normy C45), jak ukazuje **Tab. 4.3**.

Tab. 4.3 Naměřené chemické složení oceli 1 a porovnání s ocelí 12 050

Prvek	Obsah naměřený v oceli 1 [%]	Předepsaný obsah v oceli 12 050 [%]
C	0,46	0,42–0,50
Mn	0,68	0,50–0,80
Si	0,33	max. 0,40
P	0,025	max. 0,045
S	0,028	max. 0,045
Cr	0,08	max. 0,40
Mo	0,008	max. 0,10
Ni	0,06	max. 0,40

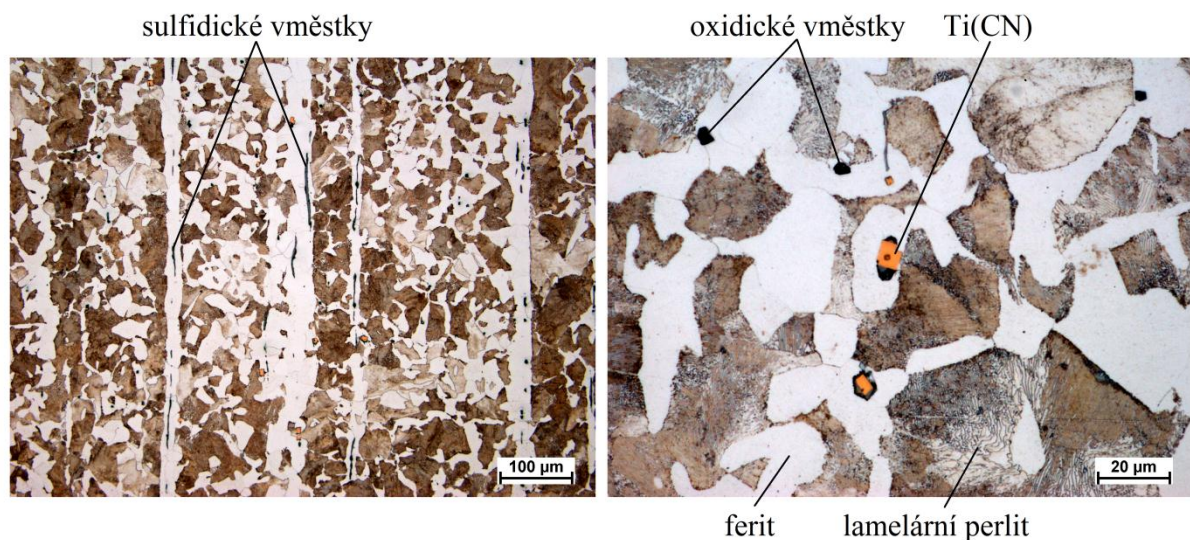
Ocel 1 je nelegovaná a jeho hloubka prokalitelnosti je nízká. Aby mohl být materiál zakalen, je zapotřebí vysokých ochlazovacích rychlostí, jak je zřejmé z ARA diagramu oceli 12 050 na **Obr. 4.4 [24]**.

Na vzorcích oceli 1 v přírodním stavu byla měřena tvrdost. Její hodnota se průměrně pohybuje okolo hodnoty 230 HV. Ocel 1, dle materiálového listu oceli 12 050 uvedeného v příloze 1, by měla mít tepelnou vodivost přibližně $49 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. V materiálovém listu je dále uvedeno, že kalení se u konvenčních technologií provádí do vody či do oleje. Výsledná povrchová tvrdost poté dosahuje hodnoty minimálně 560 HV (olej, pásy silnější jak 2 mm).



Obr. 4.4 ARA diagram oceli 12 050 [24]

U použitého vzorku oceli 1 byl zhotoven metalografický výbrus a analýza. Materiál je tvořen feritem a lamelárním perlitem, přičemž je pozorováno výrazné řádkovité uspořádání feritické fáze (**Obr. 4.5**). Ze struktury je dále zřejmé, že ocel nebyla normalizačně vyžihána, neboť se zde vyskytují odlišně veliká zrna s nerovnoměrnou distribucí. V materiálu lze také pozorovat celkem vysoký obsah sulfidických vměstků protažených ve směru tváření. Jsou též přítomny další nečistoty jako karbonitridy titanu Ti(CN) či oxidické vměstky. Z uvedených poznatků vyplývá, že materiál odpovídal své specifikaci a byl běžné čistoty.



Obr. 4.5 Výchozí struktura oceli 1

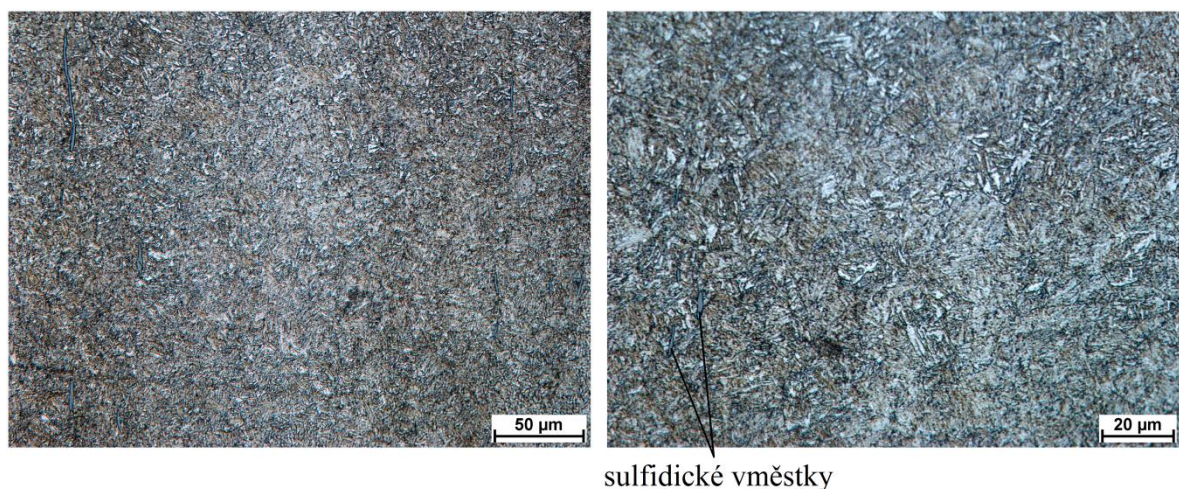
4.3.2 Konstrukční nízkolegovaná ocel

Za představitele konstrukčního nízkolegovaného materiálu (ocel 2) byl vybrán vzorek, jenž svým chemickým složením odpovídá oceli 15 142 (dle evropského značení 42CrMo4), jak je vidět z **Tab. 4.4**. Materiál byl dodán ve stavu zušlechťeném (po kalení do vody z teploty 860°C a následném popuštění při teplotě 600°C).

Tab. 4.4 Chemické složení oceli 2 měřené na GD-OES a porovnání s ocelí 15 142

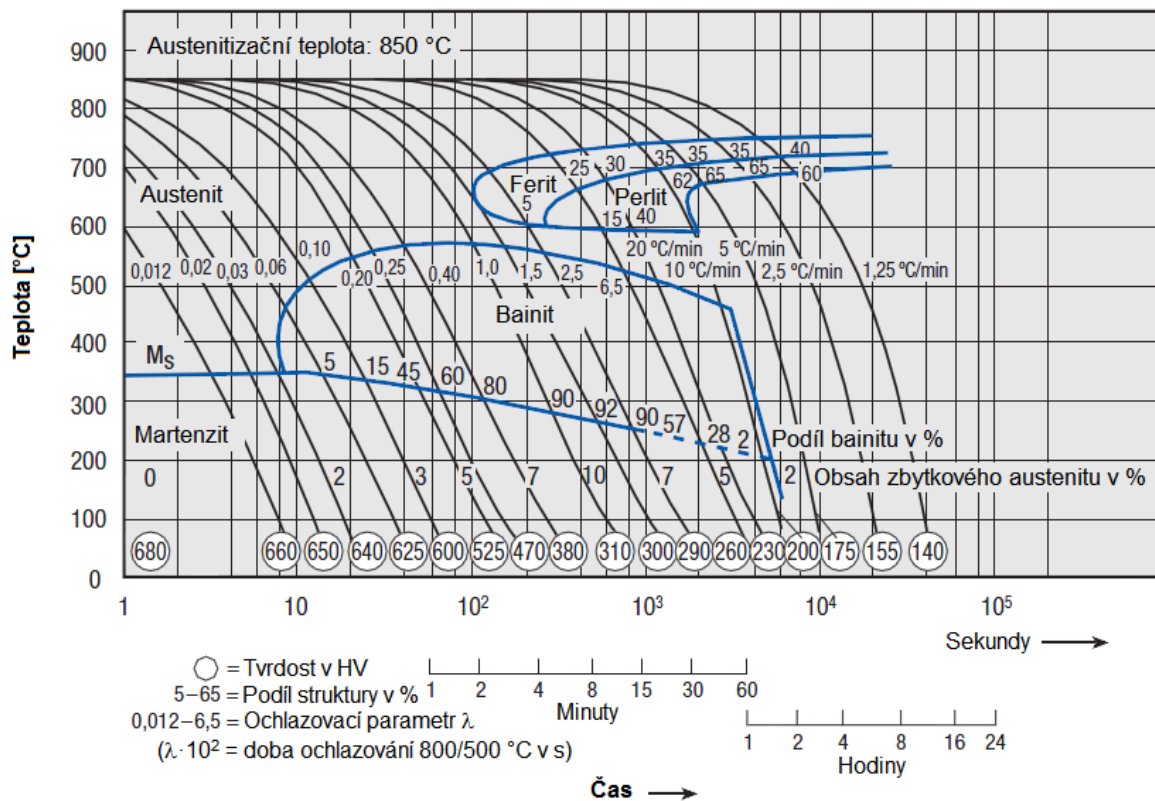
Prvek	Obsah naměřený v oceli 2 [%]	Předepsaný obsah v oceli 15 142 [%]
C	0,44	0,38–0,45
Mn	0,74	0,50–0,80
Si	0,19	0,17–0,37
Cr	1,03	0,90–1,20
Ni	0,03	max. 0,50
Mo	0,16	0,15–0,30
P	0,019	max. 0,035
S	0,026	max. 0,035

Na vstupním materiálu byl proveden metalografický výbrus. Struktura je tvořena martenzitem popuštěným na vysokou teplotu (sorbit). Také je možné pozorovat řádkové uspořádání sulfidických vměstků. **Obr. 4.6** představuje snímky výchozí struktury oceli 2 pořízené světelným mikroskopem. U materiálu byla měřena povrchová tvrdost a stanovena průměrná hodnota 280 HV. Konvenčním kalením oceli, dle materiálového listu uvedeného v příloze 1, lze dosáhnout povrchové tvrdosti okolo 600 HV.



Obr. 4.6 Výchozí struktura oceli 2

Experimenty na nízkolegované oceli 15 142 byly navrženy z důvodu, že se jedná o materiál široce používaný pro řadu účelů (povrchové kalení, zušlechťování, nitridace). Oproti oceli 1 vykazuje lepší prokalitelnost, ale na druhou stranu poněkud horší tepelnou vodivost ($42 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$). ARA diagram oceli 15 142 na **Obr. 4.7** [17] dokazuje potřebu nižších ochlazovacích rychlostí nutných pro zamezení difúzních přeměn.



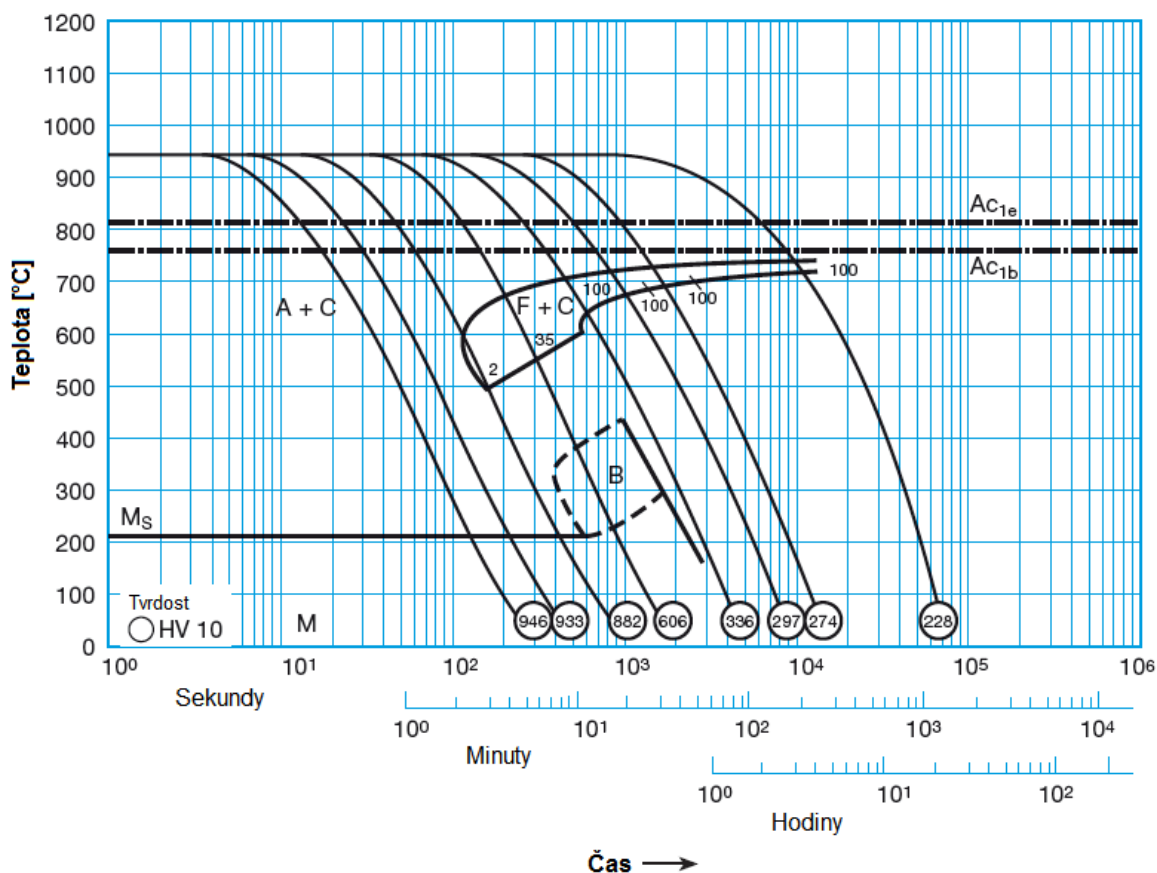
Obr. 4.7 ARA diagram oceli 15 142 [17]

4.3.3 Nástrojová ocel

Ze skupiny nástrojových ocelí byla vybrána ledeburitická vysokochromová nástrojová ocel (ocel 3) jako příklad materiálu úplně odlišného od dvou předchozích. Chemické složení tohoto materiálu (GD-OES) je uvedeno v **Tab. 4.5** a odpovídá typu oceli 19 436 (dle EN X210Cr12). Ocel obsahuje vysoký podíl chromu, který způsobuje, že martenzitická přeměna v materiálu proběhne i při nízkých ochlazovacích rychlostech. To dokazuje ARA diagram uvedený na **Obr. 4.8** [2]. Materiál tedy disponuje vysokou prokalitelností a minimum inkubační doby rozpadu austenitu v tomto případě přesahuje sto sekund (pro porovnání u oceli 1 šlo přibližně o jednu sekundu). Vysoká úroveň legování dále výrazně snižuje hodnotu tepelné vodivosti, jež se pohybuje dle materiálového listu okolo hodnoty $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Tab. 4.5 Chemické složení oceli 3 a porovnání složení s ocelí 19 436

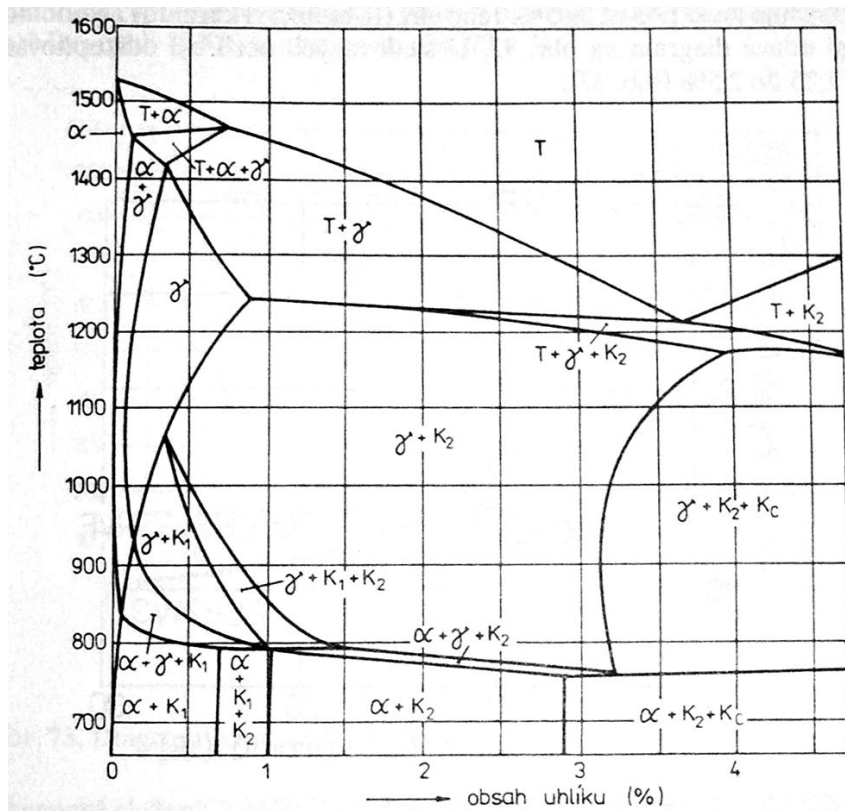
Prvek	Obsah naměřený v oceli 3 [%]	Předepsaný obsah v oceli 19 436 [%]
C	2,05	1,80–2,05
Mn	0,54	0,20–0,45
Si	0,86	0,20–0,45
P	0,021	max. 0,030
S	0,015	max. 0,035
Cr	10,93	11,0–12,5
Ni	0,18	max. 0,50



Obr. 4.8 ARA diagram oceli 19 436 [2]

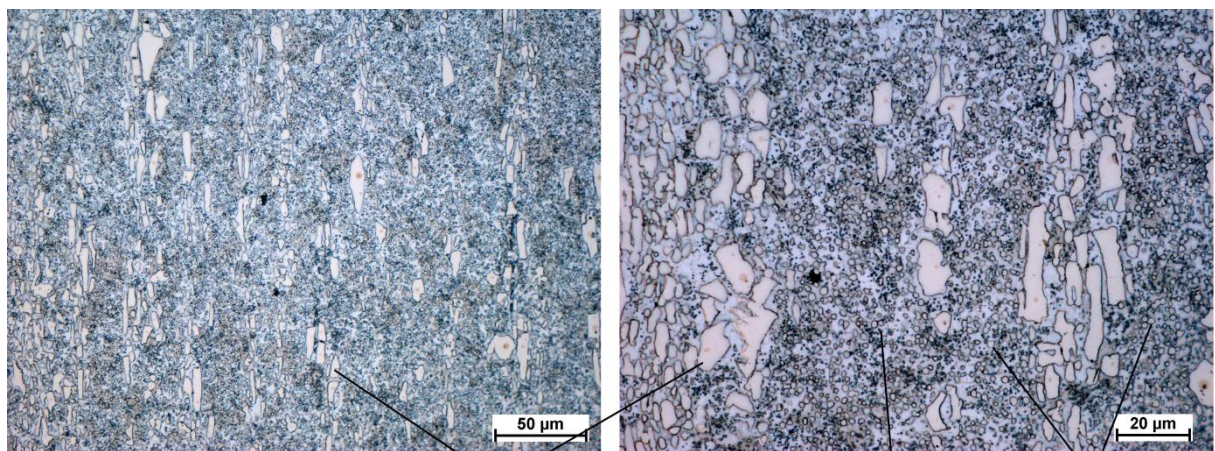
Strukturální složení lze přibližně odhadnout díky řezu diagramem Fe-C-Cr při obsahu 13% chromu uvedeném na **Obr. 4.9** [10]. Námí použitá ocel 3 je svým chemickým složením blízká. Při chladnutí materiálu vzniká eutektikum tvořené legovaným austenitem a karbidy chromu typu $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$. Uspořádání eutektika je velmi podobné ledeburitu ze soustavy Fe-Fe₃C, a proto bývají často vysokolegované chromové oceli nazývány jako ledeburitické.

Dalším pomalým ochlazováním transformuje legovaný austenit na směs legovaného feritu a karbidy. V případě rychlého ochlazení se vytváří martenzitická struktura. [10]



Obr. 4.9 Vertikální řez diagramem Fe-C-Cr při 13 % chromu [10]

Karbidy typu M_7C_3 jsou poměrně velké a tvrdé. Tvářením za tepla se karbidická kostra drtí, avšak zůstává zachována karbidická řádkovitost, jenž je viditelná i na metalografickém výbrusu oceli 3 na Obr. 4.10. Pozorováním struktury bylo dále zjištěno, že materiál byl zřejmě vyžhán naměkko, čemuž i odpovídá tvrdost pohybující se okolo 300 HV. Vlivem žhání ferito-karbidická směs obsahuje zrnité sekundární karbidy a drobné zrnité karbidy jako pozůstatek perlitu.



řádkovité karbidy typu M_7C_3

ferito-karbidická směs se zrnitými sekundárními karbidy a drobnými zrnitými karbidy

Obr. 4.10 Výchozí struktura vysokolegované nástrojové oceli

4.4 Proměnné veličiny EB zařízení v technologii kalení

Technologie povrchového kalení pomocí EB závisí na mnoha parametrech, které ovlivňují vlastnosti, tvar a velikost získané zakalené vrstvy. Část z nich souvisí s vlastnostmi zpracovávaného materiálu (tepelná vodivost, chemické složení, atd.), tvarem součásti, celkovou velikostí dílce, aj., které jsou výchozí a obvykle pro danou úlohu neměnné. Samotné zařízení elektronového paprsku ovšem disponuje několika proměnnými parametry (uvedenými v **Tab. 4.6** bez parametrů ovlivňující kvalitu EB) a je úkolem operátora jejich modulací nalézt správné hodnoty, které umožňují vznik zakalené vrstvy požadovaných vlastností. U některých veličin je zřejmý dopad na technologii, ale v jiných případech tomu tak není


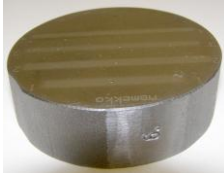

Tab. 4.6 Parametry nastavované na EB zařízení

Proměnná veličina	Značka	Poznámka
Urychlovací napětí	HV	
Proud paprsku	SQ	
Posun stolu	Fs	
Fokusační proud	SL	proud fokusující na povrch součásti
Defokusace	offset	posun ohniska paprsku nad/pod povrch součásti
Kalibrace	KW	koeficient propojující posuv součásti a deflekcí EB
Kalicí obrazec	HF	obrazec skenující paprsek rovnob. na směr posuvu
Rozměry HF	SWX/SWY	
Frekvence HF	PVZH/PVZL	skenovací frekvence obrazce HF
Příčný obrazec	Fig	obrazec skenující paprsek kolmo na směr posuvu
Rozměry Fig	SWX1/SWY1	
Frekvence Fig	FRQ	skenovací frekvence obrazce Fig
Slopein	Slopein	nabíhání parametrů na procesní hodnoty
Slopeout	Slopeout	pokles parametrů z procesních hodnot

4.5 Provedení experimentu

V prvotní fázi byla v dílnách z polotovarů vybraných materiálů zhotovena experimentální tělesa s rovnou obroušenou plochou určenou k tepelnému zpracování. Tvary a rozměry jednotlivých typů vzorků jsou uvedeny v **Tab. 4.7** včetně snímku daných komponent po provedení experimentu

Tab. 4.7 Vzorky jednotlivých materiálů používané při experimentech

Materiál	Rozměry	
Uhlíková ocel	80x80 – 30	
Konstrukční nízkolegovaná ocel	ø 65 – 20	
Vysokolegovaná nástrojová ocel	ø 45 – 15	

Aby bylo možné zařízení pro ohřev elektronovým paprskem ovládat, byl za tímto účelem nejprve napsán řídicí program v systému Sinumerik (příloha 3) využívající skenované obrazce HF i Fig předdefinované dodávající firmou. Tento jednoduchý program umožňuje vytvoření přímých EBH pásů o definované šířce a délce rovnoběžně buď s osou pohybu X, nebo Y.

V prvotní fázi experimentu bylo zapotřebí odhadnout parametry technologie zadávané do řídicího programu zařízení. U některých hodnot, jako např. u rozměrů skenovaného obrazce HF, bylo možné vycházet z doporučení výrobce. Po provedení pokusu následovala vizuální kontrola povrchu, kdy bylo určeno, zda nedošlo k natavení. Snahou bylo optimalizovat proces kalení nastavením proudu paprsku SQ s cílem nalézt nejvyšší možnou hodnotu parametru (s přesností na desetiny mA), při níž za daných podmínek ještě nedochází k natavení povrchu. Poté byl změněn jeden vybraný technologický parametr a proces optimalizace opakován. Seznam všech provedených experimentů je uveden v příloze 4.

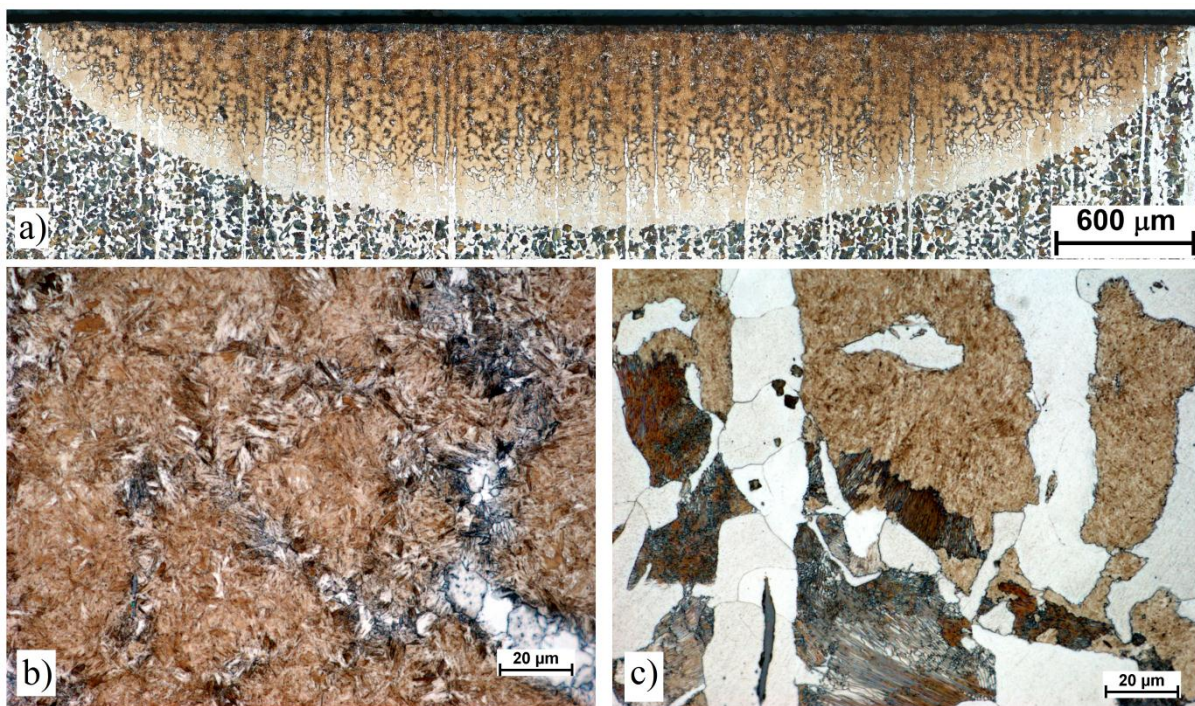
Po vyhotovení vzorků byla u všech provedených experimentů naměřena povrchová tvrdost. U vybraných vrstev byl proveden příčný řez a metalografická analýza. Dále byl naměřen profil tvrdosti směrem do základního materiálu, z něhož byla určena tloušťka zakalené vrstvy, a napříč zakalenou vrstvou 0,2 mm pod povrchem. Hloubka vrstvy byla odečtena v místě, kde tvrdost klesla na hodnotu základního materiálu zvětšenou o 50 HV. V případě jednoho experimentu provedeného na oceli 3 byl také zkoumán obsah zbytkového austenitu pomocí RTG difrakce.

5 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ A JEJICH DISKUSE

Následující část práce popisuje vlastnosti zakalených vrstev na daných materiálech. Analyzovány byly především vzorky s optimalizovanými procesními parametry. Vlastnosti získaných vrstev u jednotlivých ocelí byly podobné a jsou demonstrovány pomocí zvolených reprezentantů. V další části je analyzována závislost vybraných parametrů technologie na vlastnosti zakalené vrstvy.

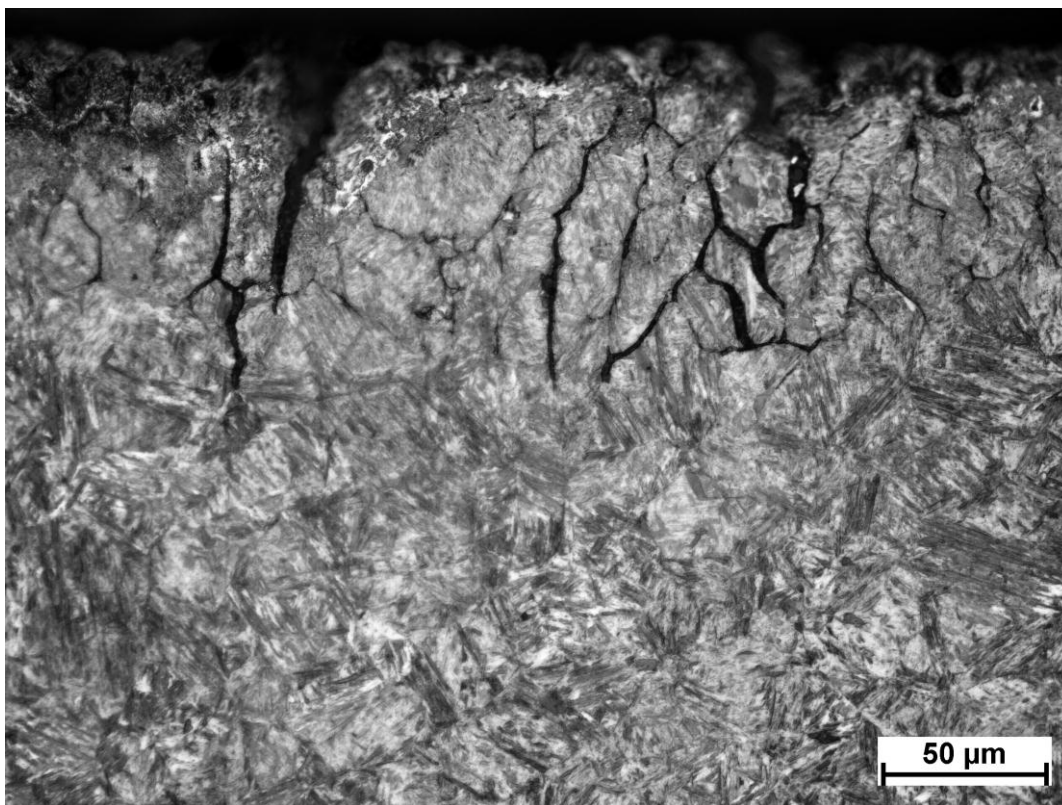
5.1 Uhlíková ocel

U oceli 1 se výchozí struktura feritu a lamelárního perlitu změnila na strukturu martenzitického typu (tvrdość vyšší jak 700 HV), jak je vidět na **Obr. 5.1**. Protože nejvyšších teplot bylo dosaženo v oblasti povrchu vzorku (vlivem jeho ohřevu), docházelo zde zřejmě částečně k hrubnutí zrna. V důsledku tohoto jevu vznikla pod povrchem hrubá martenzitická struktura, která se směrem do jádra se zjemňuje. Dále na metalografickém výbrusu jsou patrné zbytky po vyřádkování feritické fáze pocházející z výchozího stavu materiálu. Mezi feritickými a martenzitickými zrny se vyskytuje snáze leptatelná oblast s menším obsahem uhlíku. Lze předpokládat, že ochuzená oblast vznikla během austenitizace rychlým zastavením rozpouštění feritické fáze, neobsahující téměř žádný uhlík. Důkaz o rychlém přerušení difúzního procesu v důsledku náhlého ochlazení lze také nalézt na rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu (**Obr. 5.1c**). Vyskytují se zde zrna, která jsou tvořena z části výchozí perlitickou a částí zakalenou strukturou.



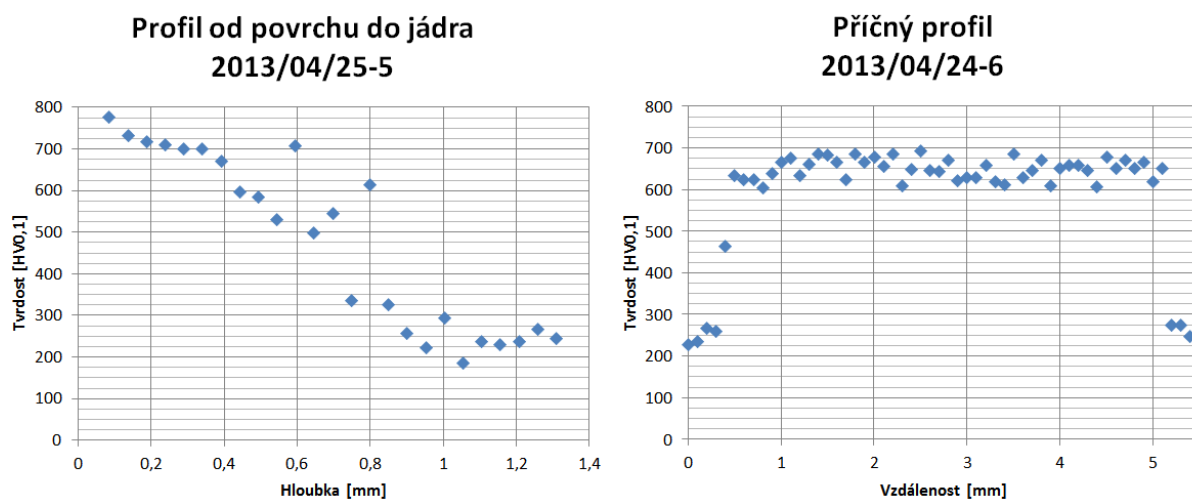
Obr. 5.1 a) zakalená povrchová vrstva na oceli 1; b) detail martenzitické struktury se zbytkem vyřádkované feritické fáze; c) detail přechodu zakalené vrstvy a základního materiálu

V případě experimentů, kdy byla ocel lokálně natavena, došlo k porušení materiálu. Trhliny se vyskytovaly uprostřed zakalené vrstvy. Příklad porušeného materiálu je uveden na **Obr. 5.2**.



Obr. 5.2 Povrchové trhliny v oceli 1

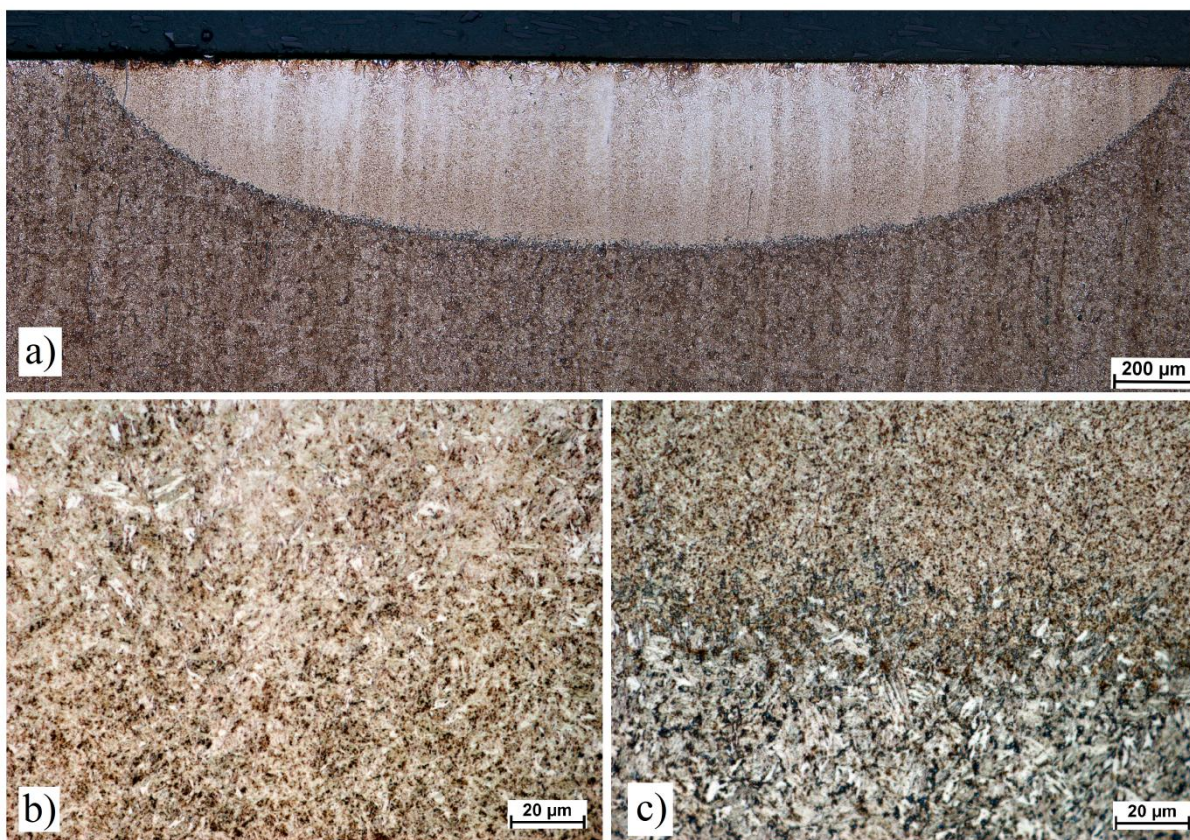
V případě oceli 1 bylo dosaženo maximální zakalené hloubky 0,85 mm, jak je zřejmé ze záznamu tvrdosti na **Obr. 5.3**. V literatuře [32] se uvádí, že technologií EBH je možné na tomto typu materiálu získat vrstvy o tloušťce cca. 1,5 mm. Příčný profil tvrdosti (**Obr. 5.3**) dokazuje dobrou homogenitu vrstvy s přibližně konstantními vlastnostmi a šířkou přibližně 5 mm. Nejvyšších tvrdostí bylo dosaženo ve všech případech na povrchu vzorku a maximální hodnoty se blížily hodnotě 800 HV_{0,1}.



Obr. 5.3 Profily tvrdosti zakalených vrstev na oceli 1

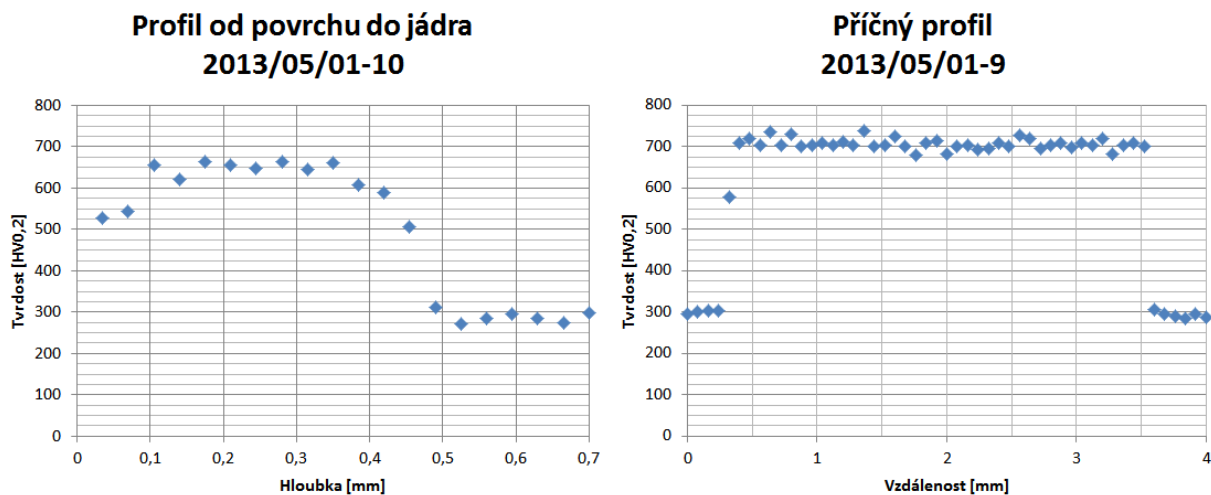
5.2 Konstrukční nízkolegovaná ocel

Pomocí EBH byla na zušlechtěné oceli 2 vytvořena zakalená vrstva tvořená strukturou martenzitického typu (viz **Obr. 5.4**). Z metalografického výbrusu je také patrné, že ve vrstvě v podpovrchové oblasti došlo ke zhrubnutí zrna.



Obr. 5.4 a) zakalená povrchová vrstva na oceli 2; b) detail zakalené martenzitické struktury; c) detail přechodu zakalené vrstvy a základního materiálu

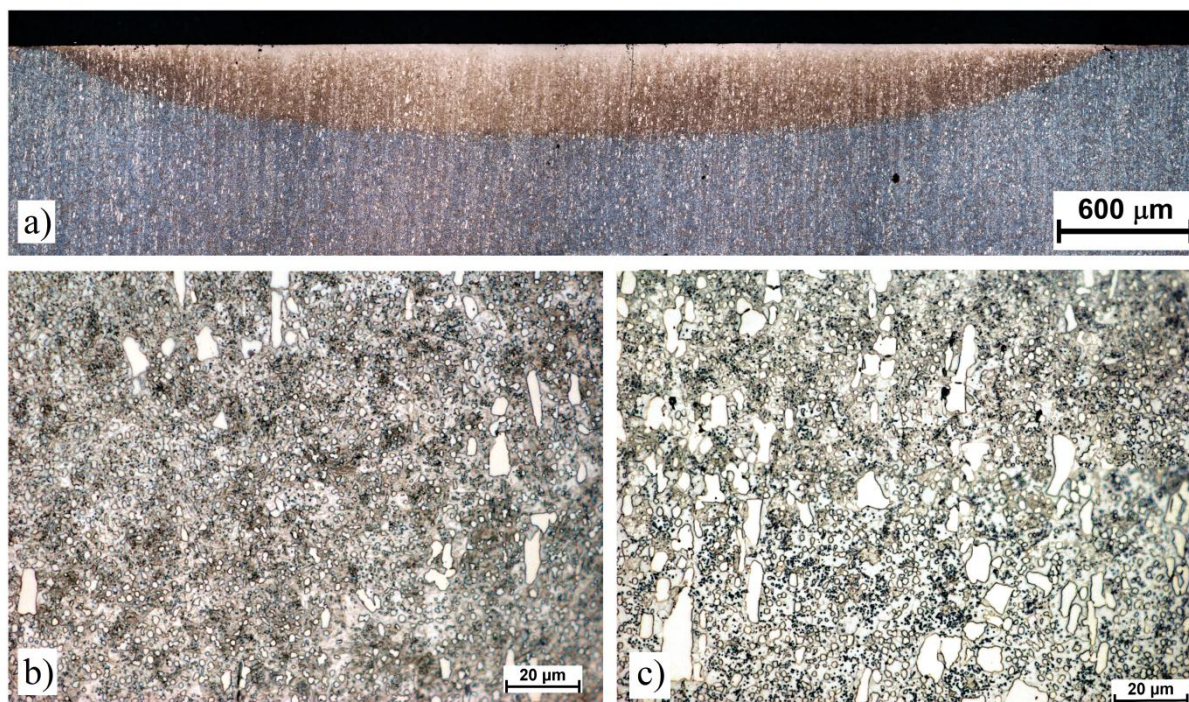
V případě konstrukční nízkolegované oceli byla zhotovena zakalená vrstva o maximální hloubce 0,49 mm. Bohužel nebyly nalezeny literární podklady pojednávající o možnostech EBH na tomto materiálu. Nejvyšší hodnoty tvrdosti se pohybovaly v rozmezí od 630 do 730 HV_{0,2} a byly naměřeny až hlouběji v materiálu (**Obr. 5.5**). Pokles tvrdosti těsně pod povrchem, kde byly očekávány maximální hodnoty, byl způsoben zhrubnutím struktury. Neboť již výchozí materiál vykazoval výrazně vyšší míru homogenity vlastností v porovnání s ocelí 1, tak i rozptyl hodnot tvrdosti napříč vrstvou je podstatně menší. Za povšimnutí také stojí, že u všech vrstev po dosažení maximální hodnoty se tvrdost materiálu udržuje stále konstantní až do hloubky přibližně 0,35 mm, kdy poté velmi strmě klesá. V případě oceli 2 byly zhotoveny užší zakalené vrstvy, než tomu bylo v případě jiných materiálů. Stopa byla v závislosti na frekvenci FRQ široká cca 3 mm (30 kHz), respektive 2,3 mm (30 kHz).



Obr. 5.5 Profily tvrdosti zakalených vrstev na oceli 2

5.3 Vysokolegovaná nástrojová ocel

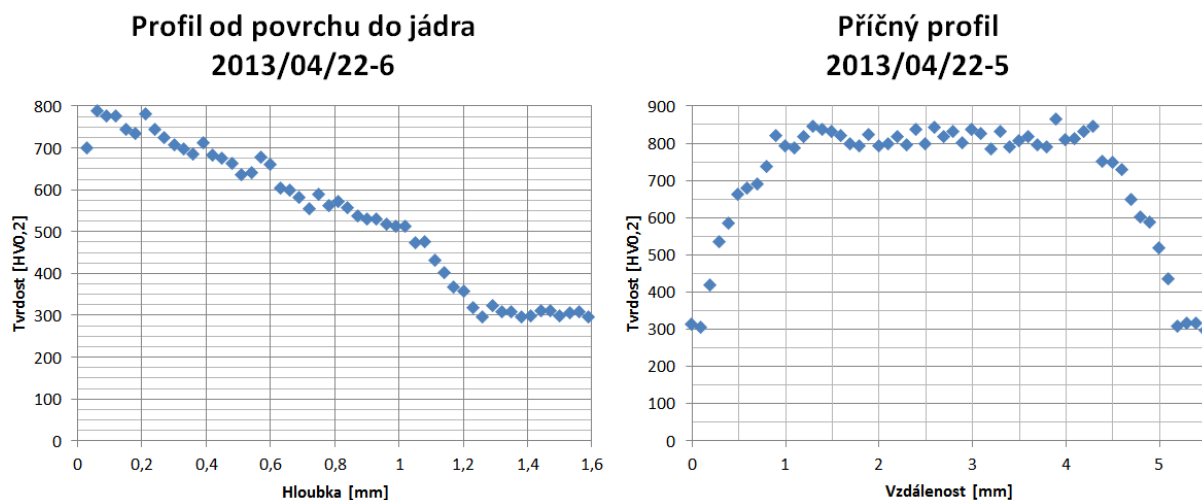
Procesem EBH byla na povrchu materiálu vytvořena zakalená vrstva s martenzitickou strukturou (viz Obr. 5.6). Při austenitizaci materiálu docházelo k rozpouštění karbidické fáze, v důsledku čehož je patrný úbytek drobných zrnitých karbidů (zřejmě pozůstatky po perlitu).



Obr. 5.6 a) zakalená povrchová vrstva na oceli 3; b) detail zakalené martenzitické struktury; c) detail přechodu zakalené vrstvy a základního materiálu

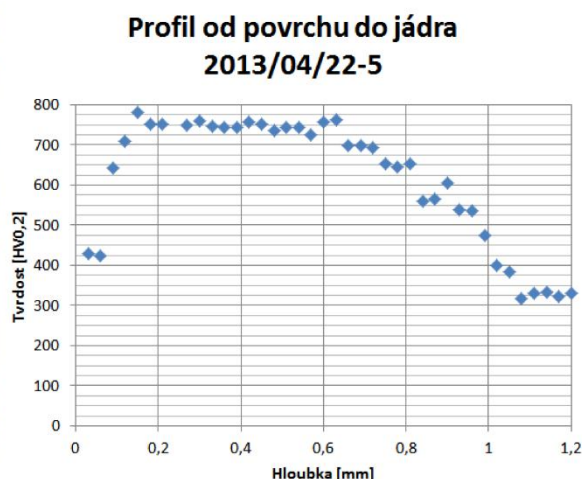
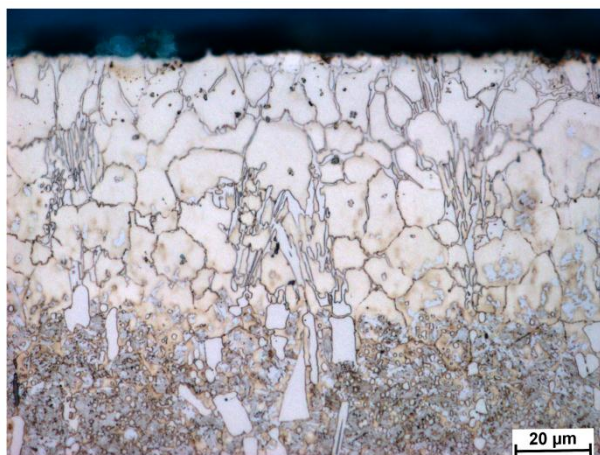
U oceli 3 byla vytvořena zakalená vrstva o maximální tloušťce 1,2 mm, jak je zřejmé z Obr. 5.7. Dle literatury [32] byla tedy u tohoto materiálu dosažena maximální možná hloubka. Tepelně ovlivňovaná oblast byla široká řádově 5 mm. Jak je ovšem z příčného

profilu zřejmé, v případě tlustších zakalených vrstev není přechod na strukturu základního materiálu tak strmý. Zpracovaný pás s přibližně konstantní tvrdostí je široký přibližně 3 mm. V tepelně zpracovaných vrstvách byly měřeny hodnoty maximální tvrdosti nad hranicí 800 HV0,2.



Obr. 5.7 Profily tvrdosti zakalených vrstev na oceli 3

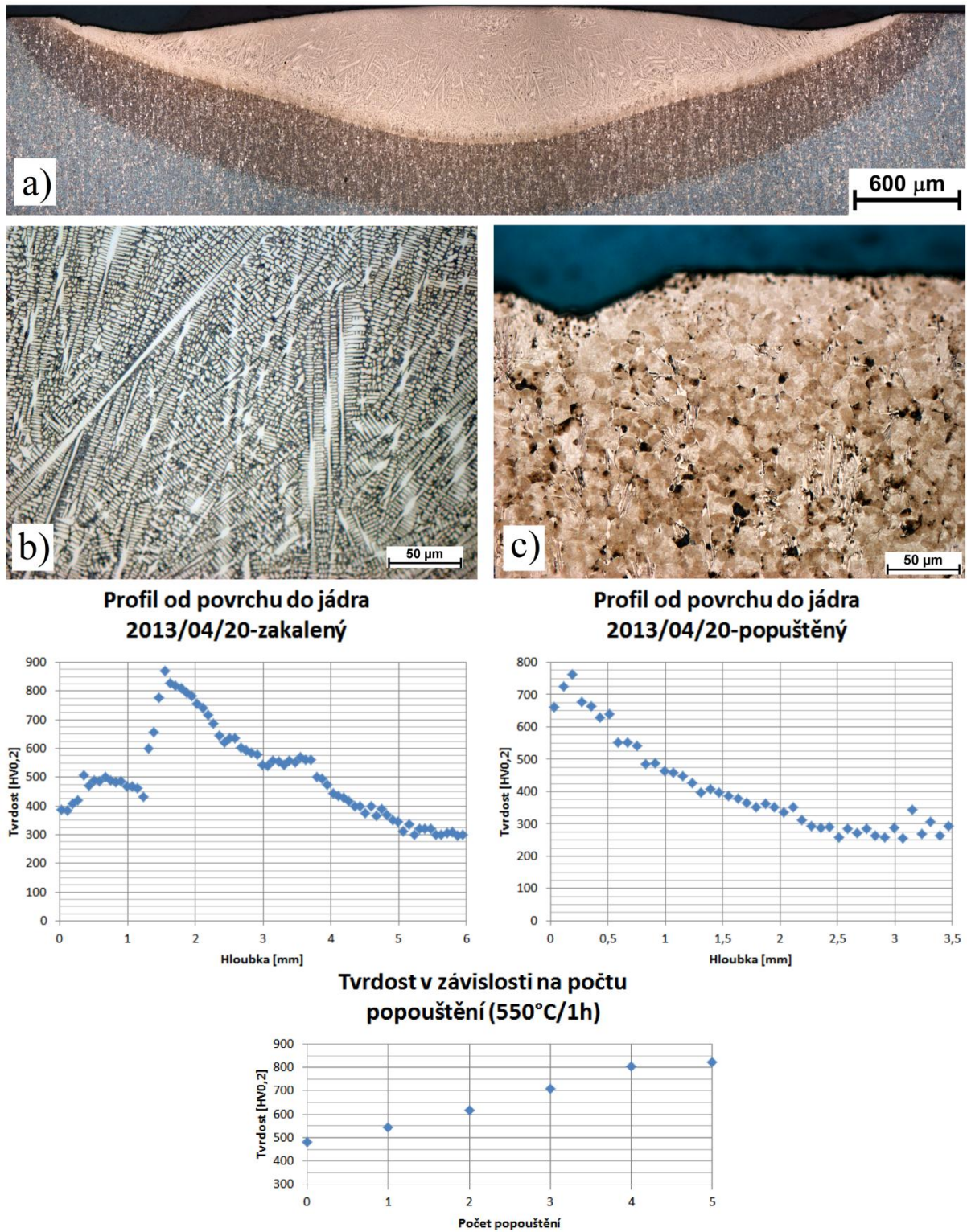
V případě oceli 3 se také podařilo vytvořit vzorek, na jehož povrchu byla zřejmě velmi slabá natavená vrstva (viz **Obr. 5.8**). Přetavená vrstva je charakteristická jednak svou hrubozrnnou strukturou a pak také obsahuje minimum křemíkových fází. Z profilu tvrdosti směrem do jádra materiálu na druhé části **Obr. 5.8** je patrné, že oblast těsně pod povrchem vykazuje nižší hodnoty tvrdosti, které velmi rychle rostou a poté opět pomalu klesají. Pokles povrchové tvrdosti zřejmě souvisí se zvýšeným obsahem zbytkového austenitu. Maximálních hodnot se dosahuje v hloubce přibližně 0,2 mm.



Obr. 5.8 Vzorek oceli 3 s částečně nataveným povrchem

V případě, že dojde k natavení většího objemu materiálu, při tuhnutí se vytváří výrazná dendritická struktura (viz **Obr. 5.9b**) s relativně nízkou tvrdostí. Na přetaveném vzorku s označením 2013/04/20 byla proto provedena RTG fázová analýza a bylo zjištěno, že ovlivněná zóna je tvořena z 94 % austenitu, 5% cementitem a 1 % karbidy typu $Cr_{23}C_6$. Zanalyzovaný vzorek byl poté několikanásobně popouštěn na teplotu 550 °C konvenční

technologií a RTG analýza byla opakována. V popuštěném stavu byla přetavená vrstva tvořena z 69 % martenzitem, 15 % cementitem, 10 % Cr_7C_2 a z 6 % zbytkovým austenitem. Záznamy z RTG analýz jsou uvedeny v příloze 5. Snímky z metalografické analýzy vzorku 2013/04/20 v obou stavech jsou uvedeny včetně průběhu tvrdosti na **Obr. 5.9**.

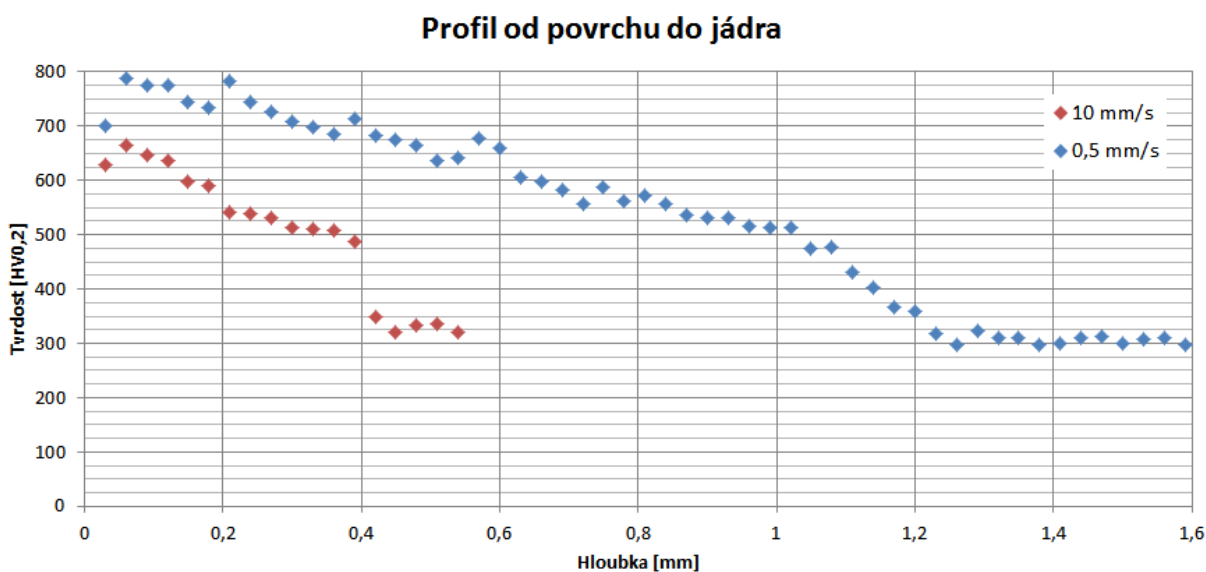


Obr. 5.9 Ocel 3 s přetaveným povrchem do větší hloubky (a) tvořící výraznou dendritickou strukturu (b), která se popouštěním mění (c). Dále závislosti tvrdosti na vzdálenosti do povrchu u přetaveného a popuštěného vzorku včetně závislosti na počtu popouštěcích cyklů.

5.4 Vliv vybraných parametrů na vlastnosti zakalených vrstev

5.4.1 Rychlost posuvu F_s

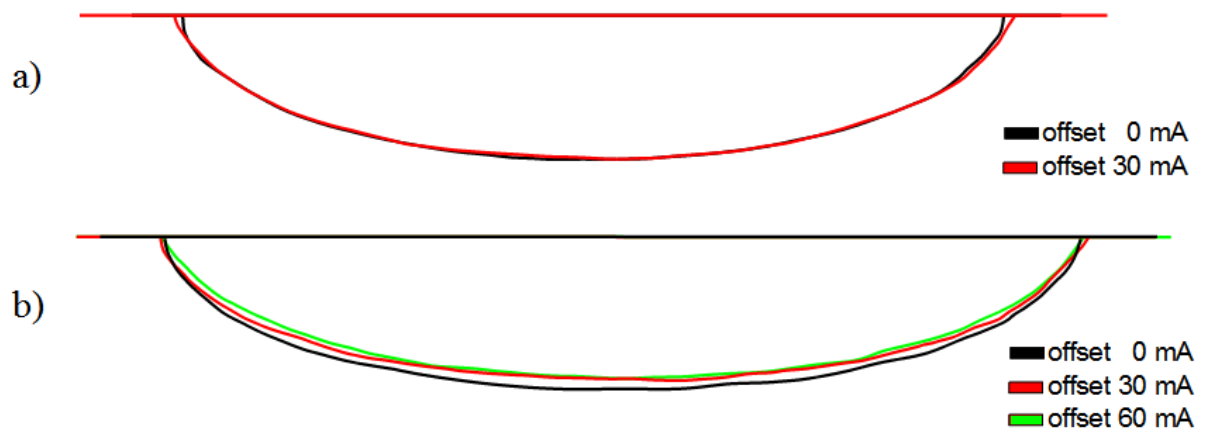
Snížením rychlosti posuvu dochází k prodloužení expozice daného úseku na povrchu součásti, což způsobí prohřátí povrchové vrstvy do větší hloubky díky odvodu tepla. Následným rychlým ochlazením vzniká zakalená vrstva o větší tloušťce. Tento předpoklad byl i experimentálně potvrzen na vysokolegované oceli snížením rychlosti posuvu z původních $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ na $0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (**Obr. 5.10**). Aby byl vliv parametru více patrný, byl také mírně zvětšen rozměr skenovaného obrazce (SWX), čímž došlo k dalšímu mírnému navýšení expoziční doby.



Obr. 5.10 Vliv rychlosti posuvu na hloubku zakalené vrstvy (ocel 3)

5.4.2 Míra defokusace (offset)

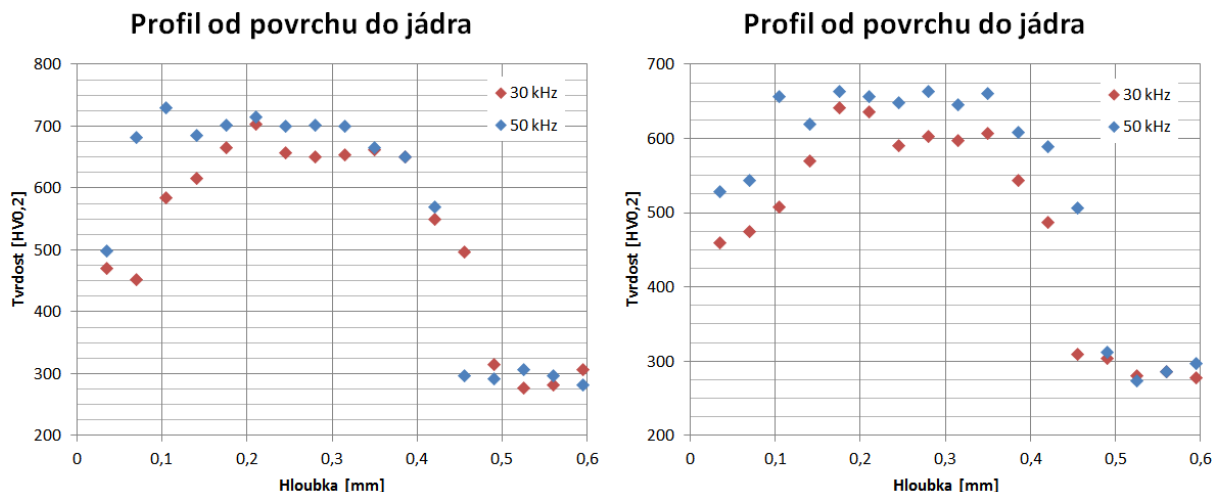
U oceli 1 byl zkoumán vliv defokusace na vlastnosti zakalené vrstvy. Při optimalizovaných parametrech technologie byly provedeny tři pokusy s různou měrou neostrosti elektronového paprsku. Při následné analýze bylo zjištěno, že vrstvy vykazují obdobné hodnoty i průběh tvrdostí směrem od povrchu do jádra materiálu. Proto bylo dále přistoupeno k obrazové analýze metalografických výbrusů. Struktura oceli 12 050 byla k tomuto účelu výhodná, neboť zde bylo dobře viditelné rozhraní mezi tepelně ovlivněnou oblastí a základním materiálem. Obrazovou analýzou uvedenou na **Obr. 5.11** bylo zjištěno, že s rostoucí měrou neostrosti mírně klesá hloubka zakalené vrstvy (patrně v důsledku energetických ztrát). Ovšem rozdíl je natolik malý, že jej lze při použití offsetu zanedbat a říci, že defokusace vlastnosti finální vrstvy neovlivní.



Obr. 5.11 Vliv defokusace na vlastnosti povrchové vrstvy: a) $F_s = 5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; b) $F_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

5.4.3 Skenovací frekvence FRQ

Ačkoliv bylo očekáváno, že vliv parametru na proces bude celkem zanedbatelný, výsledky experimentů ukázaly opak. Pokusy byly provedeny při frekvencích 30 kHz a 50 kHz. Zvýšení hodnoty parametru způsobilo zúžení tepelně ovlivněné zóny. Následkem toho bylo zapotřebí nalézt jiný optimální proud pro provedení pokusu. Po změření průběhu tvrdosti se ukázalo, že s rostoucí frekvencí FRQ také částečně narůstá tvrdost, což je doloženo na **Obr. 5.12**. Tento jev ovšem může také souviset se zúžením zakalené vrstvy, protože u menšího profilu dochází k rychlejšímu ochlazování. Aby mohl být potvrzen předpoklad nárůstu tvrdosti, je zapotřebí provést experiment s modulací rozměru skenovaného obrazce SWY1. Ovšem vliv frekvence FRQ na šířku tepelně ovlivněné oblasti je zřejmý, ale není doposud jasný důvod tohoto děje, jenž byl také diskutován s dodavatelem zařízení.



Obr. 5.12 Vliv skenovací frekvence obrazu FRQ při $F_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (vlevo) a $F_s = 5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

5.5 Shrnutí

V rámci diplomové práce byly provedeny pilotní experimenty povrchového zpracování na zařízení pro svařování a povrchové tepelné zpracování pomocí elektronového paprsku. Na třech zadaných typech materiálů byly vytvořeny povrchově zakalené vrstvy.

Optimalizací parametrů technologie EBH byla na uhlíkové oceli vytvořena zakalená vrstva sahající do hloubky 0,85 mm pod povrch. Literatura ale uvádí jako maximální dosažitelnou hodnotu 1,5 mm [32]. To naznačuje, že stále ještě nebyl vyčerpán veškerý potenciál materiálu. U nízkolegované konstrukční oceli, se podařilo zhotovit vrstvu o tloušťce necelého 0,5 mm. Bohužel nikde nebyly v podkladech nalezeny hraniční limity. Protože se ale ocel díky svému chemickému složení a ostatním vlastnostem nachází mezi již zmíněnými materiály, lze očekávat, že hodnota maximální hloubky zakalení se tam bude také nacházet. Pokud je tento předpoklad správný, tak u dané oceli nebyl vyčerpán veškerý využitelný potenciál.

V případě vysokolegované nástrojové oceli bylo dosaženo hloubky zakalení 1,2 mm, což je dle literatury [32] nejvyšší dosažitelná hodnota. Při vytváření této vrstvy byla ale rychlost posuvu součásti pouze $0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. V technické praxi se technologie těchto parametrů hledala velmi obtížně uplatnění z důvodu nízké produktivity a je zapotřebí dalším výzkumem najít jinou vhodnou kombinaci parametrů, při níž lze dosáhnout stejné hloubky zakalení.

U některých vzorků nástrojové oceli došlo k natavení povrchu a následným tuhnutím se v materiálu vytvořila dendritická struktura. Zajímavostí je, že přetavená struktura byla tvořena z 94 % austenitem, což bylo dokázáno pomocí RTG difrakce. Postupným konvenčním popouštěním došlo k rozpadu austenitu na martenzit a karbidy.

U části experimentů byla snaha postihnout vliv vybraných technologických parametrů na vlastnosti zhotovené zakalené vrstvy. Byl potvrzen předpoklad, že při snížení rychlosti posuvu součásti umožňuje vytvářet vrstvy o větších tloušťkách. Dále bylo zjištěno, že míra rozostření paprsku ve zkoumaném rozsahu má na kvalitu technologie zanedbatelný vliv. Sporným parametrem se stala frekvence skenování obrazce FRQ. S určitostí lze říci, že jejím navýšením dochází k zužování zakalené vrstvy, ovšem nebylo odhaleno, zda je efekt způsoben samotným zařízením EB, či vychází z fyzikální či jiné podstaty. Sporným bodem je též vliv FRQ na výslednou tvrdost vrstvy, která se stoupající hodnotou také částečně roste. Nárůst tvrdosti by totiž mohl vzniknout v důsledku zúžení ovlivňované oblasti a ne vlivem frekvence.

6 ZÁVĚR

Na vzorcích daných materiálů byly vytvořeny zakalené vrstvy technologií kalení pomocí elektronového paprsku. Tloušťky byly stanoveny na základě naměřených profilů tvrdosti materiálu směrem do jádra. Výsledky byly porovnány s údaji uváděnými v literatuře a v jednom případě bylo zjištěno, že bylo dosaženo maximální hloubky zakalení. Dále byl zkoumán vliv rychlosti posuvu, míry defokuse a skenovací frekvence na vlastnosti výsledné zakalené vrstvy.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] CLAUB, U. PRO-BEAM AG & CO. KGAA. Electron Beam (EB) Drilling. Germany, 1998.
- [2] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH. Kaltarbeits- und Schnellarbeitsstähle. Witten, 2010. Dostupné z: http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Broschueren/005_DEW_Kaltarbeitsstahl_D.pdf
- [3] DILTHEY, 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/>
- [4] DOBENECK, D. D. Electron Beam Welding: Examples of 30 Years Job-Shop Experience. Germany: Pro-beam AG&Co. KGaA, 2005.
- [5] DOBENECK, D. Electronbeamwelding: A Key Technology to Construct Vehicles for Road, Rail, Sea, Air and Space. 1. vyd. Germany: pro-beam AG & Co. KGaA, 2007.
- [6] DRAGOS, Utu, Marginean GABRIELA, Brandl WALTRAUT a Cartis IOAN. Improvement of the oxidation behaviour of electron beam remelted MCrAlY coatings. Solid State Sciences. 2005, vol. 7, issue 4, s. 459-464. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2005.01.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1293255805000154>
- [7] 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.
- [8] FISCHER, G. Fischer-Elektronenstrahl [online]. Berlin [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://www.fischer-elektronenstrahl.com/>
- [9] 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.
- [10] FREMUNT, Přemysl. Nástrojové oceli. Brno: Dům techniky, 1994, 229 s.
- [11] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. 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.
- [12] HRDÝ, R. ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE: (SEM, TEM, PŘÍPRAVA VZORKŮ, EDX, WDX). Brno, 2011, 19 s. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/nanoteam/data/soubory/Elektronova%20mikroskopieElektronova%20mikroskopie.doc>
- [13] CHO, Sung Oh a Hye Young JUN. Surface hardening of poly(methyl methacrylate) by electron irradiation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2005, vol. 237, 3-4, s. 525-532. DOI: 10.1016/j.nimb.2005.03.007. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X05002314>
- [14] KLIKORKA, Jiří. Obecná a anorganická chemie. 2. vyd. Praha: SNTL, 1989, 592 s.
- [15] KOUŘIL, M. Indukční ohřev. Brno, 2011.
- [16] KREMER, Rudolf. Ohřev kovů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1974, 422 s.
- [17] LIEDTKE, D. a H. STIELE. Merkblatt 236: Wärmebehandlung von Stahl – Randschichthärten. Düsseldorf: Stahl-Informations-Zentrum im Stahl-Zentrum, 2009. ISBN 0175-2006. Dostupné z: http://www.stahl-info.de/schriftenverzeichnis/pdfs/MB236_Waermebehandlung_von_Stahl_Randschichthaerten.pdf

- [18] MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA, Univerzita Karlova v Praze. Fyzikální praktikum [online]. Praha, 2013 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_331.pdf
- [19] MELEKA, A. H. Electron-beam welding: Principles and Practice. Berkshire: McGRAW-HILL, 1971. ISBN 07-094218-8.
- [20] Metody analýzy povrchů: elektronová mikroskopie a difrakce. 1. vyd. Praha: Academia, 1996, 379 s. ISBN 80-200-0329-0.
- [21] NEBESÁŘOVÁ, J. Elektronová mikroskopie pro biologie: Vady elektromagnetických čoček [online]. 2001 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/2.3.html#3>
- [22] OWENS CORNING RIDGEVIEW. Electron beam drilling process enables precision small hole drilling in various metals [online]. Duncan, 2013 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://www.ebdrilling.com/>
- [23] REMTA. PRO-BEAM AG & CO. KGAA. Generatorsäule 150kV. Germany, 2004.
- [24] ROSE, A. a F. WEVER. Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle. Düsseldorf: Verlag Stahleisen M.B.H., 1961.
- [25] STEIGERWALD STRAHLTECHNIK GMBH. Steigerwald Strahltechnik GmbH - Developer and manufacturer of electron beam machines for welding, drilling and surface treatment [online]. Maisach, 2013 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: http://www.steigerwald-eb.de/downloads/de/pdf/ebopuls_de.pdf
- [26] STEIGERWALD STRAHLTECHNIK GMBH. Steigerwald Strahltechnik GmbH - Developer and manufacturer of electron beam machines for welding, drilling and surface treatment [online]. Maisach, 2013 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: http://www.steigerwald-eb.de/en/infocenter_eb_geschichte.php
- [27] VÁLKA, L. FSI, VUT Brno. Stroj pro svařování a povrchové tepelné zpracování s pomocí elektronového svazku PROBEAM K26. Brno, 2013.
- [28] VOHLÍDAL, Jiří. Chemické a analytické tabulky. 1. vyd. Praha: Grada, 1999, 647 s. ISBN 80-716-9855-5.
- [29] VOLKER, A., U. CLAUß, D. DOBENECK, T. KRÜSSEL a T. LÖWER. Elektronenstrahlschweißen: Grundlagen einer faszinierenden Technik. 1. vyd. Germany: pro-beam AG&Co. KGaA, 2011.
- [30] VRÁBLÍK, F., U. CLAUß a P. STOLAŘ. ELECTRON BEAM WELDING – A KEY TECHNOLOGY TO CONSTRUCT VEHICLES FOR ROAD, RAIL, SEA, AIR AND SPACE. METAL 2010: 19th International Metallurgical and Materials Conference : conference proceedings. Ostrava: Tanger, 2010, s. 6.
- [31] 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>
- [32] ZENKER, R. a A. BUCHWALDER. Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung: Inovative Technologien für höchste industrielle Ansprüche. 2. vyd. Germany: pro-beam AG&Co. KGaA, 2010.
- [33] ZOBAC, 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.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

BSE	Zpětně rozptýlené elektrony
EB	Elektronový paprsek
EBH	Kalení elektronovým paprskem
Fig	Příčný obrazec – obrazec skenující paprsek kolmo na směr posuvu
FRQ	Skenovací frekvence obrazce Fig
GD-OES	Optická emisní spektrometrie s doutnavým výbojem
HAZ	Tepelně ovlivněná zóna
HF	Kalicí obrazec
HV	Urychlovací napětí
KW	Kalibrace – koeficient propojující posuv součásti a deflekcí EB
offset	Defokusace – posun ohniska paprsku nad/pod povrch součásti
PE	Primární elektrony
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 HF
SWX1/SWY1	Rozměry Fig
T _t	Teplota tání základního materiálu
T _z	Teplota zpracování
WEZ	Tepelně ovlivněná zóna

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1

Technické listy analyzovaných materiálů

Příloha 2

Protokoly analýz chemického složení použitých materiálů

Příloha 3

Řídicí program v systému Sinumerik používaný pro ovládání zařízení při kalení

Příloha 4

Technologické parametry všech provedených experimentů

Příloha 5

RTG fázová analýza přetaveného a popuštěného vzorku nástrojové oceli