

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou svařování oceli AMS 5659, používané v průmyslu pro speciální hydraulické válce (viz Obr. 1), pomocí elektronového svazku. V první části této práce je proveden teoretický rozbor svařování elektronovým svazkem a rozbor vlivu vybraných svařovacích parametrů na vlastnosti průvaru. V druhé části jsou vyhodnoceny realizované experimentální průvary na vzorcích dané oceli ve vytvrzeném stavu H1025 a po rozpouštěcím ohřevu. Dále je také provedeno vyhodnocení vlastností na stejných vzorcích, které byly znovu vytvrzeny. Pro evaluaci a komparaci vlastností oceli v oblasti průvaru a tepelně ovlivněné oblasti bylo použito metod světelné mikroskopie (SM), rastrovací elektronové mikroskopie (REM) a metody měření tvrdosti dle Vickerse.

### Klíčová slova

elektronový svazek, elektron, ocel AMS 5659, svařování, precipitace, elektronová svářečka MEWB 60/2

## ABSTRACT

This master thesis deals with the electron beam welding of the AMS 5659 steel used in industry for special hydraulic cylinders (Fig. 1). A theoretical analysis of electron beam welding and analysis of the influence of selected welding parameters on penetration characteristics are in the first part of the thesis. The second part contains an evaluation of the implemented experimental penetrations on samples of the steel in the hardened condition H1025 and after solution heat. It was also done a properties assessment of the same samples that were been hardened again. The light microscopy (SM), the scanning electron microscopy (SEM) and the measurement method of hardness according to Vickers were used for evaluation and comparison of the steel properties in the region of penetration and the heat affected zones properties.

### Keywords

electron beam, electron, AMS 5659 steel, welding, precipitation, electron beam welder MEWB 60/02

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Struktura a vlastnosti průvaru oceli AMS 5659 vytvořeného elektronovým svazkem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....  
Daniel Říčan

### **Poděkování**

Děkuji tímto **Ing. Martinu Zobačovi, Ph.D.** z Ústavu přístrojové techniky AV ČR za pomoc při realizaci experimentu, cenné podklady a rady k vypracování této diplomové práce a za drahocenný čas, který mi tímto věnoval. Dále chci poděkovat mému vedoucímu **Ing. Miloslavu Kouřilovi, CSc.** za pomoc při jednání o vzniku daného tématu a za vedení v průběhu vypracování práce, za cenné připomínky k práci a trpělivost. V neposlední řadě patří velké díky **Ing. Lence Klakurkové Ph.D.** a **Ing. Petru Havlíkovi** za podporu a spolupráci při zpracování experimentální části této práce.

**OBSAH**

<b>ABSTRAKT .....</b>	<b>4</b>
<b>PROHLÁŠENÍ .....</b>	<b>5</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ.....</b>	<b>6</b>
<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>1 VLASTNOSTI ELEKTRONOVÉHO SVAZKU.....</b>	<b>12</b>
1.1 Charakteristické vlastnosti svazku .....	12
1.1.1 <i>Povaha volného elektronu.....</i>	<i>12</i>
1.1.2 <i>Zdroj elektronů .....</i>	<i>13</i>
1.1.3 <i>Hustota výkonu zdroje elektronů.....</i>	<i>14</i>
1.1.4 <i>Vliv elektrického pole na elektrony.....</i>	<i>15</i>
1.1.5 <i>Vliv magnetického pole na elektrony.....</i>	<i>17</i>
1.2 Optické vlastnosti elektronového svazku.....	18
1.2.1 <i>Fokusace .....</i>	<i>18</i>
1.2.2 <i>Optické omezení .....</i>	<i>18</i>
<b>2 INTERAKCE ELEKTRONOVÉHO SVAZKU S MATERIÁLEM .....</b>	<b>21</b>
2.1 Přenos energie.....	21
2.2 Tepelné účinky .....	21
2.3 Proces pronikání svazku do hloubky materiálu .....	24
2.4 Vznik a růst kapiláry .....	26
<b>3 SVAŘOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ.....</b>	<b>28</b>
3.1 Základní části elektronové svářečky .....	30
3.1.1 <i>Elektronové dělo .....</i>	<i>30</i>
3.1.2 <i>Vakuová komora .....</i>	<i>32</i>
3.1.3 <i>Manipulační systém .....</i>	<i>32</i>
3.2 Parametry svařování .....	33
3.2.1 <i>Rychlost svařování.....</i>	<i>33</i>
3.2.2 <i>Proud svazku .....</i>	<i>34</i>
3.2.3 <i>Urychlovací napětí .....</i>	<i>35</i>
3.2.4 <i>Zaostření svazku.....</i>	<i>35</i>
3.2.5 <i>Pracovní tlak .....</i>	<i>38</i>
3.2.6 <i>Optimalizace parametrů .....</i>	<i>38</i>
<b>4 METALURGICKÉ POCHODY PŘI SVAŘOVÁNÍ .....</b>	<b>39</b>
4.1 Teplotní cyklus při svařování.....	39

4.2	Vznik svarového kovu a jeho vlastnosti.....	39
4.3	Přeměny v tepelně ovlivněné oblasti.....	39
4.4	Trhliny a vady ve svarových spojích.....	40
4.4.1	<i>Zkoušení a hodnocení svarů.....</i>	<i>42</i>
<b>5</b>	<b>PRECIPITAČNĚ VYTVRDIRTELNÉ KOROZIVZDORNÉ OCELI .....</b>	<b>42</b>
5.1	Martenzitické precipitačně vytvrditelné oceli .....	43
5.1.1	<i>Precipitace v průběhu vytvrzování .....</i>	<i>43</i>
5.2	Austenitické precipitačně vytvrditelné oceli .....	43
5.2.1	<i>Precipitace v průběhu vytvrzování .....</i>	<i>43</i>
5.3	Semiaustenitické precipitačně vytvrditelné oceli .....	44
5.3.1	<i>Tepelné zpracování semiaustenitických ocelí.....</i>	<i>44</i>
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ, METODY A MATERIÁL .....</b>	<b>45</b>
6.1	Elektronová svářečka MEBW 60/2.....	45
6.1.1	<i>Elektronové dělo .....</i>	<i>46</i>
6.1.2	<i>Pracovní komora a vakuový systém .....</i>	<i>48</i>
6.1.3	<i>Elektronická část.....</i>	<i>49</i>
6.1.4	<i>Software.....</i>	<i>52</i>
6.2	Ocel AMS 5659.....	53
6.2.1	<i>Materiál v „zakaleném“ stavu .....</i>	<i>54</i>
6.2.2	<i>Precipitace v průběhu vytvrzování .....</i>	<i>56</i>
6.3	Metodická část experimentu.....	58
6.3.1	<i>Provedení průvarů .....</i>	<i>58</i>
6.3.2	<i>Příprava vzorků.....</i>	<i>59</i>
6.3.3	<i>Měření mikrotvrdosti .....</i>	<i>60</i>
6.3.4	<i>Světelná mikroskopie .....</i>	<i>60</i>
6.3.5	<i>Rastrovací elektronová mikroskopie .....</i>	<i>60</i>
<b>7</b>	<b>VÝSLEDKY ZKOUŠEK A JEJICH ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>61</b>
7.1	Vliv parametrů svařování na geometrii průvaru.....	61
7.1.1	<i>Rychlost svařování.....</i>	<i>61</i>
7.1.2	<i>Zaostření svazku.....</i>	<i>62</i>
7.2	Vliv parametrů svařování na defekty v průvaru .....	64
7.2.1	<i>Vliv rychlost svařování .....</i>	<i>64</i>
7.2.2	<i>Vliv zaostření svazku .....</i>	<i>66</i>
7.3	Měření tvrdosti .....	68
7.3.1	<i>Průběh tvrdosti průvaru u vzorku ve vytvrzeném stavu.....</i>	<i>68</i>

7.3.2	<i>Průběh tvrdosti průvaru u vzorku po rozpouštěcím ohřevu .....</i>	<i>71</i>
7.3.1	<i>Průběh tvrdosti průvaru u znovu vytvrzeného vzorku .....</i>	<i>74</i>
7.3.2	<i>Průběh tvrdosti průvaru u vzorku vytvrzeného po rozpouštěcím ohřevu.....</i>	<i>77</i>
7.4	Mikrostruktura průvarů a tepelně ovlivněné oblasti .....	80
<b>8</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>84</b>
8.1	Vliv parametrů svařování na geometrii svaru .....	84
8.1.1	<i>Rychlost svařování.....</i>	<i>84</i>
8.1.2	<i>Zaostření svazku.....</i>	<i>85</i>
8.2	Vliv parametrů svařování na defekty v průvaru .....	85
8.3	Měření tvrdosti v oblasti průvaru .....	87
8.3.1	<i>Průběh tvrdosti průvaru u vzorku ve vytvrzeném stavu.....</i>	<i>87</i>
8.3.2	<i>Průběh tvrdosti průvaru u vzorku po rozpouštěcím ohřevu .....</i>	<i>87</i>
8.3.3	<i>Průběh tvrdosti průvaru u znovu vytvrzeného vzorku .....</i>	<i>88</i>
8.3.4	<i>Průběh tvrdosti průvaru u vzorku vytvrzeného po rozpouštěcím ohřevu.....</i>	<i>88</i>
8.4	Mikrostruktura průvaru a tepelně ovlivněné oblasti .....	89
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>90</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>95</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>99</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>100</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>104</b>

## ÚVOD

V současné dynamicky rozvíjející se společnosti využívající k výrobě spotřebních produktů nejmodernějších a nejprogresivnějších technologií rostou s všeobecným vývojem úměrně i nároky na kvalitu a dostupnost produktů, ať už jsou to výrobky pro přímou spotřebu (letadla, automobily, domácí spotřebiče) nebo prostředky vývoje a výzkumu (použití nekonvenčních materiálů a technologií při vývoji reaktoru pro jadernou fúzi, kosmický průmysl apod.). Využití technologie elektronového svazku o vysokém výkonu pro svařování a další účely se vyvíjí už relativně dlouhou dobu. První tyto pokusy byly provedeny již na počátku 20. století. Stále však se v celkovém měřítku nejedná o rutinní záležitost. I přes běžné použití pro svařování a povrchové úpravy některých součástí v automobilovém průmyslu, vakuové technice i výrobě některého spotřebního zboží (vakuové termosky z antikorozi oceli) zde existuje značný potenciál pro aplikovaný i základní výzkum a též pro aplikace při výrobě speciálních součástí v nejrůznějších odvětvích.

Elektronovým svazkem označujeme proud usměrněných elektronů pohybující se ve vakuu rychlostí srovnatelnou s rychlostí světla. Svařování je zajištěno pomocí elektronově optických prvků, které usměřňují proud elektronů na velice malou plochu. Při interakci elektronového svazku s materiálem předávají elektrony svoji kinetickou energii materiálu ve formě tepla, což lze využít v technologických aplikacích k místnímu intenzivnímu ohřevu. Důsledkem je schopnost elektronového svazku protavit se velmi rychle v podstatě jakýmkoli materiálem. Tohoto jevu je v technologických aplikacích využito k intenzivnímu místnímu ohřevu materiálu na rozdíl od jiných metod svařování s minimální tepelně ovlivněnou oblastí. Aplikace elektronového paprsku je v průmyslu využívána pro svařování, pájení, navařování, obrábění, gravírování, tepelné zpracování kovů a nejnověji i 3D tisk.

Oproti klasickým způsobům, ale i dalším nekonvenčním metodám svařování, má tato technologie několik podstatných výhod, kterými je kompenzována poměrně vysoká investiční náročnost zařízení. Mezi tyto výhody patří především velká hloubka průvaru při malé tloušťce svaru, použití vakua, které umožňuje svařování reaktivních kovů a zabraňuje vzniku nečistot ve svarovém kovu a oxidaci povrchu součásti a mnoho dalších.

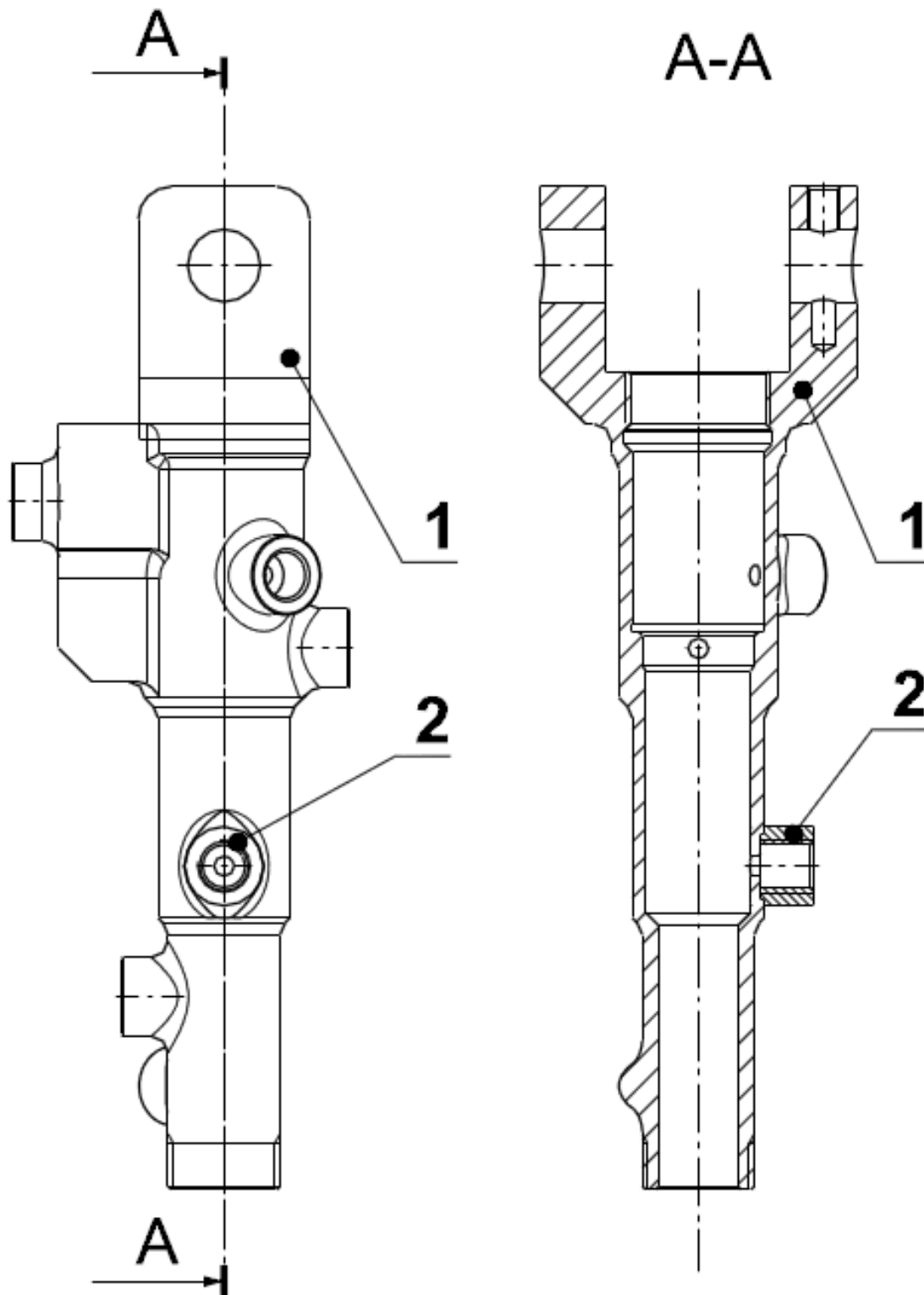
Jelikož svařování elektronovým svazkem v průmyslovém měřítku prozatím zaujímá největší objem, je i tato práce zaměřena tímto směrem.

Impulzem pro její vypracování byl nákup zařízení využívající elektronový svazek pro svařování a zpracování kovových materiálů v rámci projektu NETME Centre v Brně. Zařízení má sloužit k výzkumné činnosti a v pozdější době po získání určitých zkušeností i pro technologický vývoj a zpracování komerčních zakázek.

Téma práce vyplynulo z požadavku návrhu inovativního řešení výrobního procesu hydraulických válců z oceli AMS 5659 (Obr. 1). Stávající výroba probíhá obráběním hydraulického válce z plné kruhové tyče. Díky složitosti jednotlivých hrdel na těle válce se součást obrábí z polotovaru o velkém počátečním průměru. Vlivem rozsáhlých hrubovacích operací dochází k velkým ztrátám materiálu v podobě třísek a nadměrnému opotřebení nástrojů, tedy přídatným nákladům na výrobu.

Inovativní řešení výroby spočívá ve využití elektronového svazku k přivaření jednotlivých hrdel na tělo hydraulického válce, čímž se náklady na výrobu sníží o poměrnou část odpadu ve formě třísek z hrubovacích operací.

Předmětem předkládané práce je přinést náhled na možné problémy při svařování oceli AMS 5659 a zhodnotit využití této metody z hlediska ovlivnění vlastností oceli v oblasti průvaru a tepelně ovlivněné oblasti v závislosti na výchozí struktuře a různých svařovacích parametrech.



Obr. 1 Výkres hydraulického válce [36].



## 1 VLASTNOSTI ELEKTRONOVÉHO SVAZKU

Souhrn vlastností elektronového svazku, na kterých závisí dosažitelné hodnoty hustoty výkonu a charakter interakce svazku s materiálem, jsou určeny charakteristickými vlastnostmi elektronů a jejich zdrojů.

### 1.1 Charakteristické vlastnosti svazku

Důležitou a hlavní charakteristikou zdroje elektronů je tzv. směrová hustota  $R_0$ , která udává výkon  $P_0$  vyzářený do určitého prostorového úhlu  $\Omega$ . Směrová hustota je dána vztahem [1]:

$$R_0 = \frac{P_0}{F_0 \cdot \Omega}, \quad (1.1)$$

kde  $F_0$  je velikost emitující plochy. V případě kruhové emisní plošky o daném poloměru  $r_0$  lze z rovnice (1.1) odvodit vztah [1]:

$$R_0 = \frac{P_0}{\pi \cdot r_0^2 \cdot \pi \cdot \alpha_0^2}. \quad (1.2)$$

V ideálním případě (bez optických vad) lze tento výkon transponovat na povrch materiálu. Pro dosažení co nejvyšší hustoty výkonu svazku elektronů musí mít zdroj elektronů co nejvyšší směrovou hustotu.

#### 1.1.1 Povaha volného elektronu

Elektron je subatomární částice s elektricky záporným nábojem. Základní fyzikální vlastnosti elektronu jsou uvedeny v Tab. 1.1. Nevýhoda malé hmotnosti elektronu je kompenzována záporným nábojem, díky kterému je možné elektron urychlit přiložením elektrického napětí, a tím získat požadované množství energie (při urychlovacím napětí  $1,5 \cdot 10^5$  V, dosáhne elektron rychlosti  $2 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>).

Množství elektronu v atomu závisí na druhu chemického prvku a je dáno atomovým číslem v Mendělejevově periodické soustavě prvků. Jak je známo, elektrony se nacházejí na jednotlivých energetických hladinách. U kovů jsou elektrony na vnějších slupkách k jádru vázány jen slabě a více či méně se mohou volně pohybovat krystalovou mřížkou (výborná elektrická vodivost kovů). Díky kinetické energii elektronu, která je menší než existující energie potenciálové bariéry, nemohou elektrony opustit povrch kovu.

Tab. 1.1 Fyzikální vlastnosti elektronu [1].

Základní veličiny	
Hmotnost	$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ [kg]
Elementární náboj	$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ [C]
Poloměr	$r_e = 2,82 \cdot 10^{-15}$ [m]
Odvozené veličiny	
Energie	$E_E = \frac{1}{2} m_e \cdot v_e^2 = e \cdot U_B = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot U_B$ [Ws]
Vlnová délka	$\lambda_e = \frac{h}{m_e \cdot v_e} \sqrt{1 - \left(\frac{v_e}{c}\right)^2}$

### 1.1.2 Zdroj elektronů

Volné elektrony lze získat dodáním určité energie materiálu a vyvolat tzv. emisi elektronů. Pro získání volných elektronů lze využít čtyři fyzikální druhy emise:

- sekundární,
- fotoelektrická,
- tepelná,
- autoemise.

Z hlediska požadavků na konstrukci a vlastnosti zdroje elektronů pro danou technologii vyhovují prakticky pouze **termoemisní zdroje**.

#### Termoemise elektronů

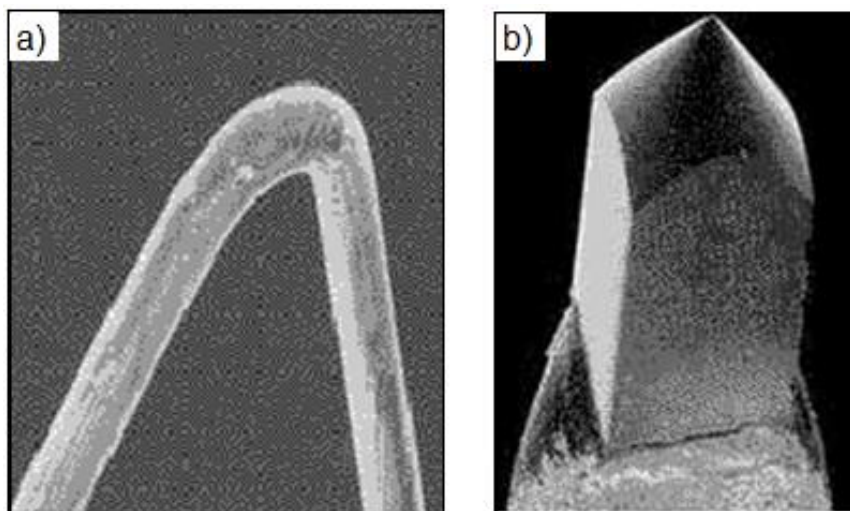
Při termoemisi se z krystalové mřížky kovů uvolňují elektrony, které měly dostatečnou energii na to, aby mohly překonat potenciálové bariéry. Výška potenciálové bariéry je materiálově závislá a pohybuje se v řádu jednotek eV. Na volné elektrony, pro které platí kinetické zákony, lze pohlížet jako na elektronový plyn (velký počet navzájem na sebe nepůsobících elektronů). Kinetickou energii volných elektronů lze vyjádřit vztahem [1]:

$$e \cdot U_T = k \cdot T, \quad (1.3)$$

kde **e** je náboj elektronu, **U<sub>T</sub>** je napětí odpovídající tepelné energii elektronu, **k** je Boltzmannova konstanta a **T** je absolutní teplota.

Hodnota kinetická energie při dané teplotě je např. pro wolframovou katodu rovna 0,37 eV při teplotě 2900 K, nebo 0,1 eV při teplotě 1161 K.

Pro technologická zařízení se využívají katody z čistých kovů (W, Mo, Ta, Nb). Nejčastěji se však používá wolframová katoda (Obr. 1.1a) díky nízké výstupní energii, vysokému bodu tání (3422°C) a nízké hodnotě vakua pro svůj provoz. V současné době se může použít katoda z krystalu LaB<sub>6</sub> (Obr. 1.1b), která emituje 10x více elektronů než W zahřátý na stejnou teplotu. Vyžaduje však daleko vyšší vakuum.



Obr. 1.1 (a) Wolframové vlákno, (b) krystal LaB<sub>6</sub> [3].

Intenzita termoemisního proudu výrazně závisí na teplotě katody, ale také na výstupní práci a vlastnostech použitých materiálů katody. Tuto závislost udává vztah podle Richardsona a Thomsona [4]:

$$J_e = A \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-e \cdot \phi_0}{kT}} \quad [A \cdot cm^{-2}], \quad (1.4)$$

kde  $J_e$  je hustota emisního proudu,  $A$  je konstanta emise (pro většinu čistých kovů má hodnotu 40 až 70  $A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$ ),  $T$  je absolutní teplota katody,  $e \cdot \phi_0$  je výstupní práce elektronu [eV],  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $e$  je základ přirozeného logaritmu.

### 1.1.3 Hustota výkonu zdroje elektronů

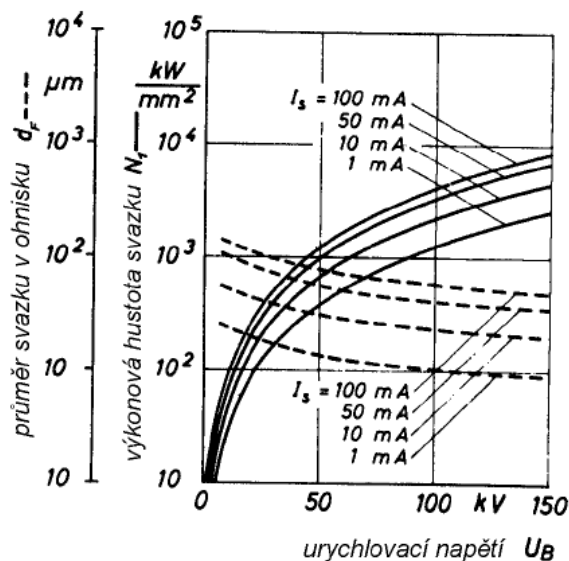
Schopnost dosáhnout určité hustoty svazku elektronu je dána především směrovou hustotou  $R_0$  jeho zdroje (vztah (1.1) v kapitole 1.1).

Hustota výkonu v ohnisku svazku je větší, čím je větší proud elektronů při urychlovacím napětí. Hustota svazku elektronu je samozřejmě ovlivněna vadami elektronové optiky, které je nutné brát v úvahu při výpočtu. Po splnění určitých podmínek lze optimální hustotu výkonu svazku v ohnisku vyjádřit vztahem [1]:

$$N_{lopt.} = 4 \frac{I_s \cdot U_B}{\pi \cdot d_{Fopt}^2} \quad [W \cdot cm^{-2}], \quad (1.5)$$

kde  $I_s$  je stálý proud svazku,  $U_B$  je urychlovací napětí,  $d_{Fopt}$  je optimální průměr svazku v ohnisku.

Grafická závislost zmíněného vztahu je patrná z Obr. 1.2, kde se experimentální výsledky vztahují ke konkrétnímu zařízení. Při urychlovacím napětí 50 až 150 kV a daném proudu svazku se mění hustota výkonu od  $10^7$  do  $10^9 W \cdot cm^{-2}$ . Pro názornost jsou ještě v grafu zaneseny hodnoty průměru svazku v ohnisku. Z grafu je patrné, že např. při napětí 100 kV a zvýšeném proudu svazku na dvojnásobek, z 50 na 100 mA, se zvýší hustota výkonu zhruba o 18 % v důsledku zvýšení průměru svazku o 30 %. Z tohoto pohledu je zřejmé, že pro dosažení vyšší hustoty výkonu je výhodnější zvyšovat urychlovací napětí.



Obr. 1.2 Hustota výkonu elektronového svazku a průměr svazku v závislosti na proudu a urychlovacím napětí s uvážením vlivu „teplotní“ a sférické vady [1].

Dosažitelná hustota výkonu elektronového svazku se pohybuje v hodnotách  $10^8$  až  $10^9$  W.cm<sup>-2</sup>. Uvedené hodnoty (Tab. 1.2) jsou o mnoho řádů vyšší v porovnání s konvenčními způsoby.

Tab. 1.2 Srovnání různých zdrojů tepla [1].

Zdroj tepla	Nejmenší průměr [μm]	Nejvyšší hustota výkonu [W/cm <sup>2</sup> ]
Plynový hořák	1000	$5 \cdot 10^4$
Elektrický oblouk	100	$1 \cdot 10^5$
Elektronový svazek	3 až 20 (dle optiky)	$1 \cdot 10^9$
Laserový svazek	5 až 50 (dle optiky)	$1 \cdot 10^{10}$

Samotná hustota výkonu není rozhodující. Mnohem významnější je energie svazku připadající na jednotku objemu materiálu, protože účinky svazku závisí na délce jeho působení. Energie svazku je výrazně závislá na interakci mezi svazkem elektronů a materiálem. Tato problematika je řešena v kapitole 2. Potřebné hustoty výkonu elektronového svazku pro různé aplikace jsou uvedeny v Tab. 1.3.

Tab. 1.3 Hustoty výkonu elektronového svazku pro různé aplikace [5].

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

#### 1.1.4 Vliv elektrického pole na elektrony

Na elektron umístěný v homogenním elektrickém poli o intenzitě  $E$  vytvořené mezi dvěma deskami působí síla dle vztahu [4]:

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{E} \quad [N], \quad (1.6)$$

kde znaménko určuje, že síla má opačný směr než vektor intenzity elektrického pole.

Práci potřebnou na přemístění náboje z jednoho místa do druhého lze vyjádřit vztahem [4]:

$$A = e \cdot U = e \cdot (U_2 - U_1) \quad [J], \quad (1.7)$$

kde  $U$  je rozdíl potenciálů mezi body 1 a 2 viz Obr.1.3.

Práci spotřebovanou na udělení kinetické energie elektronu lze vyjádřit vztahem [4]:

$$W_k = \frac{m_e \cdot (v^2 - v_0^2)}{2} \quad [J], \quad (1.8)$$

kde  $m_e$  je hmotnost elektronu [kg],  $v$  a  $v_0$  je rychlost elektronu [m.s<sup>-1</sup>] v bodech 1 a 2.

Ze zákona zachování energie vyplývá, že kinetická a potenciální energie pohybujícího se elektronu v elektrickém poli zůstává konstantní, proto [4]:

$$e \cdot U = \frac{m_e \cdot (v^2 - v_0^2)}{2}, \quad (1.9)$$

vzhledem k tomu, že počáteční rychlost elektronu je nulová, lze vztah (1.9) napsat ve tvaru [4]:

$$e \cdot U = \frac{m_e \cdot v^2}{2}, \quad (1.10)$$

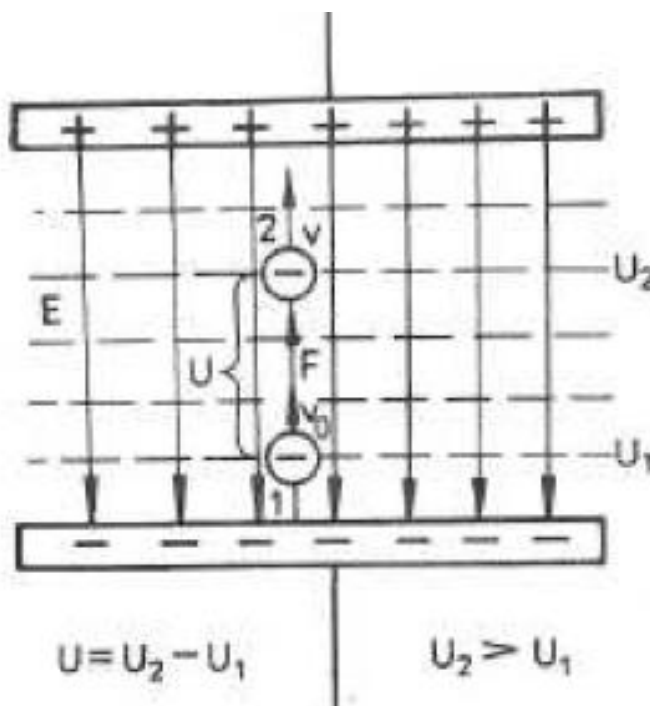
Z uvedených vztahů vyplývá, že energie elektronu je dána hmotností a rychlostí elektronu. Úpravou vztahu (1.10) lze vyjádřit rovnici pro rychlost elektronu, která závisí pouze na urychlujícím napětí [4]:

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m_e} \cdot U} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (1.11)$$

Dosazením potřebných veličin do rovnice (1.11) lze stanovit přibližnou rychlost elektronu dle vztahu [4]:

$$v = 600 \cdot \sqrt{U} \quad [km \cdot s^{-1}] \quad (1.12)$$

Změnou velikosti a směru počáteční rychlosti elektronu, tak i změnou hodnoty a směru působení napětí elektrického pole, je umožněn přesný pohyb elektronu po dané dráze.



Obr. 1.3 Vliv elektrického pole na elektron [4].

### 1.1.5 Vliv magnetického pole na elektrony

Vliv magnetického pole na pohybující se elektron je analogický s vlivem elektrického pole. Síla působící na elektron pohybující se v magnetickém poli se určí ze vztahu [4]:

$$F = B_e \cdot v \cdot \sin \alpha \quad [N], \quad (1.13)$$

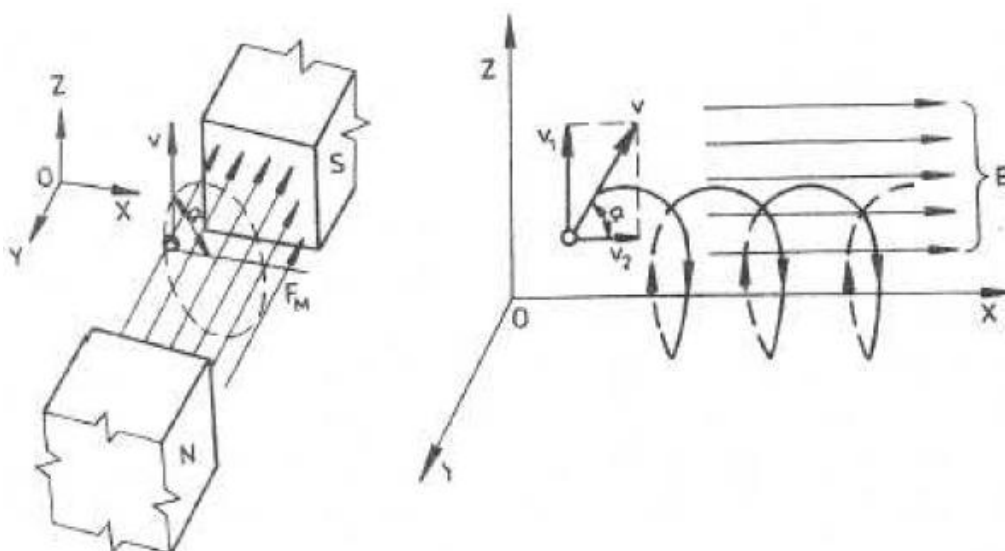
kde  $B_e$  je magnetická indukce [T],  $\alpha$  je úhel mezi směrem vektoru rychlosti a směrem magnetických siločar [°] a  $v$  je velikost rychlosti elektronu [ $m \cdot s^{-1}$ ].

Ze vztahu plyne, že na elektron pohybující se rovnoběžně se směrem magnetických indukčních siločar ( $\alpha = 0$ ) nepůsobí žádná síla a pohybuje se počáteční rychlostí. V případě nenulového úhlu  $\alpha$  dochází k ovlivnění elektronu. Je-li vektor počáteční rychlosti kolmý na vektor magnetické indukce ( $\alpha = \pi/2$ ), potom je síla rovna vztahu [4]:

$$F = B_e \cdot v \cdot \sin \frac{\pi}{2} = B_e \cdot v \quad [N]. \quad (1.14)$$

Směr uvedené síly se určuje pravidlem levé ruky. Síla je vždy kolmá na směr okamžité rychlosti elektronu a na směr siločar magnetického pole. Uvedená síla uděluje elektronu o hmotnosti  $m_e$  zrychlení  $B_e \cdot v / m_e$  [4]. Jestliže je zrychlení kolmé na rychlost elektronu, elektron se vlivem dostředivého zrychlení bude pohybovat po kruhové dráze kolmé na směr magnetických siločar.

Rychlost elektronu nemusí být vždy kolmá na siločáry magnetického pole (Obr. 1.4). V tom případě pohyb elektronu určují dvě složky počáteční rychlosti  $v_1$  a  $v_2$ . Složka vektoru rychlosti  $v_1$  směřuje kolmo na siločáry magnetického pole a elektron se pohybuje po kružnici. Vektor rychlosti  $v_2$  je rovnoběžný se směrem siločar a elektron se pohybuje paralelně se siločarami. Díky působení obou složek je dráha elektronu ve tvaru šroubovice. Možnost změny dráhy elektronu pomocí magnetického pole lze využít k fokusaci a řízení elektronového svazku.



Obr. 1.4 Vliv magnetického pole na pohybující se elektron [4].

## 1.2 Optické vlastnosti elektronového svazku

Dosáhnutí co nejvyšší plošné hustoty výkonu v místě dopadu elektronového svazku na povrch materiálu představuje řešit optické problémy a omezení divergentního svazku elektronů zaostřeného na povrch materiálu.

### 1.2.1 Fokusace

Zaostření elektronového svazku umožňuje ta vlastnost, že na elektron pohybující se v magnetickém nebo elektrickém poli působí síla, která je kolmá na směr jeho pohybu. Tento fakt umožňuje vychylovat svazek od původního směru. Pro vychýlení elektrický polem platí vztah [1]:

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{e \cdot l \cdot E}{m_e \cdot v_e^2} = 0,5 \cdot \frac{l \cdot E}{U_B}, \quad (1.15)$$

a pro vychýlení magnetickým polem platí vztah [1]:

$$\sin \Theta = \frac{e \cdot l \cdot H}{m_e \cdot v_e^2} = 0,297 \cdot \frac{l \cdot H}{U_B}, \quad (1.16)$$

kde  $e$  je náboj elektronu,  $m_e$  je hmotnost elektronu,  $v_e$  je rychlost elektronu,  $l$  je délka dráhy elektronu ve vychylujícím poli [cm],  $U_B$  je urychlovací napětí [V],  $E$  je intenzita elektrického pole [V.cm<sup>-1</sup>],  $H$  je intenzita magnetického pole [A.cm<sup>-1</sup>].

Rotačně symetrické elektrické nebo magnetické čočky soustřeďují dráhy jednotlivých elektronů do svazku stejně jako skleněná čočka. Vliv magnetického a elektrického pole je rozebrán v předchozí kapitole.

### Chyby fokusace svazku elektronů

Elektronový svazek se nedá přesně zaostřit do jediného bodu na povrch materiálu. Důvodem toho jsou chyby fokusace způsobené principiálním a technickým omezením. Mezi chyby fokusace patří:

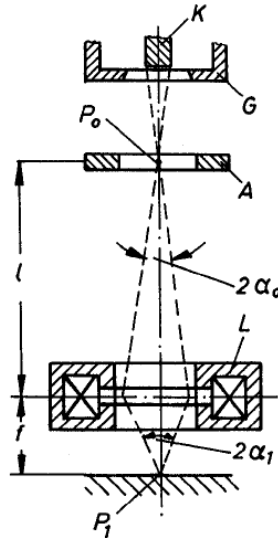
- **ohybové jevy** (jsou neodstranitelné a určují spodní mez zaostření),
- **chromatická vada** (je způsobena vlivem různé výstupní energie elektronů emitovaných z katody a vlivem kolísání urychlovacího napětí),
- **konečné rozměry zdroje** (jsou způsobené tím, že se na předmět zobrazuje křížiče zvětšené vlivem teplených pohybů elektronů),
- **zobrazovací chyby spojené čočky** (mezi tyto vady patří zkreslení, astigmatismus a sférická vada).

### 1.2.2 Optické omezení

Podmínky, na kterých závisí co nejmenší průměr elektronového svazku v místě dopadu na povrch materiálu, jsou uvedeny na příkladu elektronové trysky zobrazené na Obr. 1.5. Předpokládá se katoda s kruhovou emitující plochou o poloměru  $r_k$ . Uvedené optické uspořádání s jednou magnetickou čočkou ( $L$ ) zobrazí emitující kruhovou plošku na povrch materiálu zmenšenou v poměru  $M$  dané vztahem [1]:

$$M = \frac{l}{f} = \frac{\alpha_0}{\alpha_1}, \quad (1.17)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost,  $\alpha_0$  je vstupní úhel divergence a  $\alpha_1$  je výstupní úhel divergence.



Obr. 1.5 Optická soustava [1].

**Omezení vlivem difrakce elektronů** je způsobeno vlnovou povahou elektronů. V důsledku této vlastnosti se dráhy elektronů v blízkosti hran ohýbají podobně jako světelné paprsky. Tento vliv lze vyjádřit vztahem [1]:

$$d_b = \frac{1}{2} \cdot \lambda_e \cdot \frac{f}{D} = \frac{\lambda_e}{\alpha_1}, \quad (1.18)$$

kde  $\lambda_e$  je De-Broglieova vlnová délka a  $D/f$  je „světelnost“ čočky. Při klasických podmínkách je toto omezení minimální (asi  $10^{-3} \mu\text{m}$ ). Daleko větší omezení způsobují optické vady, které jsou zmíněny níže.

**Chromatická vada** je způsobena neshodnou rychlostí elektronů emitovaných katodou a různě urychlených kolísajícím napětím. Důsledek vady je takový, že elektrony vycházející z určitého bodu se zobrazí na povrchu předmětu jako kruhová ploška. Podobný vliv má i kolísání proudu ve fokusační čočce.

Chromatickou vadu způsobenou kolísáním urychlovacího napětí a kolísáním proudu v čočce lze určit jediným výrazem ve tvaru [1]:

$$d_{ch} = 4 \frac{D}{f} \cdot C_{ch} \cdot \left( \frac{\Delta U_B}{U_B} - 2 \cdot \frac{\Delta I_L}{I_L} \right), \quad (1.19)$$

kde  $C_{ch}$  je konstanta závislá na konstrukci čočky,  $D/f$  je „světelnost“ čočky,  $I_L$  je proud svazku. Pro stabilitu chromatické vady vyhovuje stabilita řádu  $10^{-4}$ , které lze dosáhnout bez většího omezení a nákladů.

**Vliv „tepelného“ pohybu elektronů** způsobuje, že každý bod křižště se nezobrazí fokusační čočkou na povrchu materiálu jako bod, ale jako kroužek o daném poloměru  $r_0$ . Tuto vadu lze vyjádřit vztahem [1]:

$$d_{dt} = 4r_k \cdot \frac{f}{D} \cdot \sqrt{\frac{U_T}{U_B}}, \quad (1.20)$$

kde  $r_k$  je poloměr katody,  $U_T$  je napětí odpovídající tepelné energii elektronů,  $U_B$  je urychlovací napětí a  $D/f$  je „světelnost“ čočky.



**Sférická vada** je způsobená vlivem různé dráhy jednotlivých elektronů, které se v ohnisku neprotínají s osou ve stejné (Gaussově) rovině, nýbrž vytváří tzv. kaustiku. V důsledku toho se bod předmětu nezobrazí jako bod, ale jako kotouč. Poloměr kotouče se dá určit ze vztahu [1]:

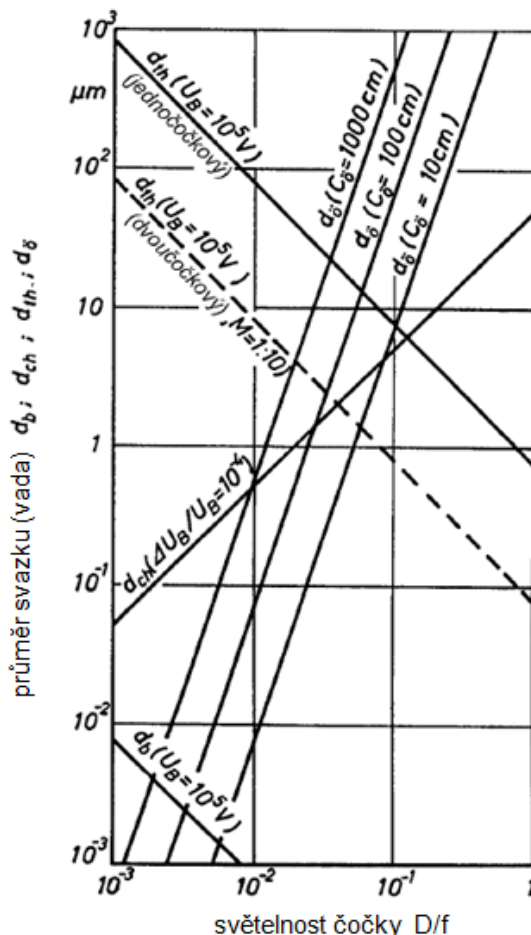
$$\delta_{oe} = C_{oe} \cdot \alpha^3, \quad (1.21)$$

kde  $C_{oe}$  je konstanta sférické vady a  $\alpha$  je aperturní úhel svazku.

### Srovnání jednotlivých vad čoček

Jednotlivé vady čoček závisí v převážné většině na „světelnosti“ čočky. Závislost jednotlivých vad je graficky znázorněna na Obr. 1.6. Vynesené hodnoty se vztahují pro urychlovací napětí  $U_B = 100$  kV se stabilitou  $10^{-4}$  a pro tři čočky s rozdílnými hodnotami konstanty  $C_{oe}$  (konstanta sférické vady). Z grafu je patrné, že ohybová vada je v porovnání s ostatními vadami zanedbatelná. Chromatická vada je významná až při malých hodnotách tepelné a sférické vady. V tomto případě je průměr svazku určen tepelnou a sférickou vadou, ale je důležité brát v úvahu, že se zmíněné dvě vady sčítají.

Vlivem protichůdného poměru  $D/f$  převažuje při malé hodnotě tepelná vada a při velké hodnotě sférická vada. Optimální hodnota „světelnosti“ se pohybuje v rozmezí od 0,1 do 0,01. Při zmíněných hodnotách není rozměr svazku v ohnisku menší než  $10 \mu\text{m}$ . Případné zmenšení rozměru svazku lze v omezené míře dosáhnout zvýšením urychlovacího napětí.



Obr. 1.6 Srovnání závislostí difrakční, sférické, chromatické a „tepelné“ vady na „světelnosti“ čočky [1].

## 2 INTERAKCE ELEKTRONOVÉHO SVAZKU S MATERIÁLEM

Interakce svazku a materiálu je důležitým článkem k porozumění procesů využívající vysokoenergiový paprsek. Interakcí rozumíme především přenos energie a mechanismus vnikání elektronů do materiálu. Svazky elektronů s energiemi od  $10^4$  do  $10^5$  eV, používané při obrábění a svařování [1], mohou vstupovat do interakce jen s elektrony z vnitřního obalu nebo s jádrem atomu. Srážka elektronu s jádrem má velmi malou pravděpodobnost, navíc nedojde k přenosu téměř žádné energie. Podstatně pravděpodobnější bude srážka s elektrony ve vnějším obalu, kde je předaná energie podstatně větší.

### 2.1 Přenos energie

Je zřejmé, že kinetická energie elektronů urychlených elektrickým polem se přemění převážně v teplo. Mechanismus přeměny bude různý pro kovy, polovodiče nebo izolanty.

Podle představy, že teplo je chápáno jako pohybová energie krystalové mřížky, přebírá krystal energie elektronového svazku jako energii kmitání jader atomů tvořící krystalovou mříž. Tento přenos se neuskutečňuje v jednom kroku, protože relativní hmotnost elektronu a atomových jader jsou příliš rozdílné. Přesněji dochází k interakci elektronového svazku s elektrony ve vnějším obalu atomu (tzv. vodivostní elektrony). Dalším krokem je přenos této energie na krystalovou mřížku. U kovů a polovodičů je energie uložená do vodivostních elektronů přenášena na mřížku dalšími srážkami fononů (kvazičástice šířící vibrace v krystalové mřížce). Zmíněný proces je doprovázen zvýšením teploty materiálu. Je-li přiváděno dostatečné množství energie, roste teplota materiálu nad bod varu.

Podle teorie vodivosti se dá přibližně odhadnout, jakou dobu potřebují vodivostní elektrony k tomu, aby srážkami získanou energii předaly mřížce [2]. Na základě teorie vodivosti lze po jistých úpravách odvodit vztah pro dobu transferu energie [2]:

$$\tau = 2\kappa \cdot \frac{m_0}{e_0^2} \cdot \frac{1}{n} \quad [s], \quad (2.1)$$

kde  $n$  je objemová hustota vodivostních elektronů,  $\kappa$  je elektrická vodivost,  $m_0$  je hmotnost elektronu a  $e_0$  je elementární náboj elektronu.

### 2.2 Tepelné účinky

V místě dopadu elektronového svazku roste teplota. Teplo je následně odváděno do okolí vedením a zářením. Detailní rozbor šíření tepla a jeho účinků na materiál včetně tavení a odpařování je velmi komplikovaný [6]. V této kapitole je proto zjednodušený přehled základních principů ohřevu elektronovým svazkem.

Pro případ bodového zdroje lze řešením diferenciální rovnice pro vedení tepla stanovit ohřev v určité hloubce dané vztahem [6]:

$$T(r,t) = \frac{E_0}{\rho \cdot c \cdot (4\pi \cdot a \cdot t)^{3/2}} \cdot e^{-\left(\frac{r^2}{4at}\right)}, \quad (2.2)$$

kde  $r$  je vzdálenost od bodového zdroje,  $E_0$  je dopadající energie v bodě  $r = 0$  a čase  $t = 0$ ,  $t$  je čas od počátku působení elektronového svazku,  $a$  je koeficient tepelné vodivosti a  $c$  je měrná tepelná kapacita.

Z rovnice (2.2) lze relaxační čas (čas, během kterého se rozšíří rozložení teploty v místě dopadu svazku) pro hloubku vniku  $R$  a poloměr svazku  $d/2$  určit podle vztahu [6]:

$$\tau_R = \frac{R^2}{4a}, \quad \tau_d = \frac{d^2}{16a}, \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}, \quad (2.3)$$

kde  $a$  je součinitel tepelné vodivosti,  $\lambda$  je koeficient tepelné vodivosti,  $R$  je hloubka vniku a  $d$  je průměr svazku

Součinitel tepelné vodivosti  $a$  vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí. Pro tepelné zpracování elektronovým svazkem to znamená, že v čase není odvod tepla do okolí významný a ohřev materiálu se dá považovat za kvazi-adiabatický [6]. S tímto předpokladem lze přibližně stanovit prostorové rozložení teploty podle rozložení absorbované hustoty výkonu. Pro hustotu výkonu  $p_0$  nezávislé na čase vyplývá pro lokální zvýšení teploty za dobu  $t$  vztah [6]:

$$T(z, r, t) = \frac{p_A \cdot (z, r) \cdot t}{\rho \cdot c}, \quad t \ll \tau_R, \tau_D, \quad (2.4)$$

kde  $r$  je vzdálenost od bodového zdroje,  $t$  je čas od počátku působení elektronového svazku,  $z$  je hloubka max. absorpce výkonu a  $p_A$  je hodnota absorpce výkonu na jednotku objemu.

Teplota v místě dopadu elektronového svazku roste v čase lineárně, dokud se nepřiblíží maximální teplotě, např. teplotě tavení. Tab. 2.1 uvádí tepelné vlastnosti vybraných materiálů. Na Obr. 2.1 je graf závislosti relaxačního času  $\tau$  na teplotní difuzivitě pro hloubku vniku  $R$ , respektive pro poloměr svazku  $d/2$  (čáry tau 2 až tau 100) [6]. Údaje  $\tau_{50}$  vyjadřují relaxační dobu pro hloubku vniku  $R = 50 \mu\text{m}$ , respektive pro poloměr svazku  $d/2 = 50 \mu\text{m}$  [6].

Tab. 2.1 Tepelné koeficienty pro vybrané materiály [6].

Materiál	Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]	Tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita [kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Tepelná difuzivita [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Relaxační doba $\tau_{50}$ [μs]
Wolfram	19,3	175	0,13	67,8	0,15
Měď	9,0	386	0,39	112	5,6
Hliník	2,7	237	0,90	97,9	6,4
Železo	7,8	80	0,45	22,8	27,4
Korund	4,0	30	0,78	9,62	65,0
Teflon	2,2	0,42	1,8	0,26	7533
PVC	1,4	0,2	0,96	0,15	4200

Pokud dojde v místě dopadu k fázové přeměně, dosažená teplota se dá vyjádřit jako [6]:

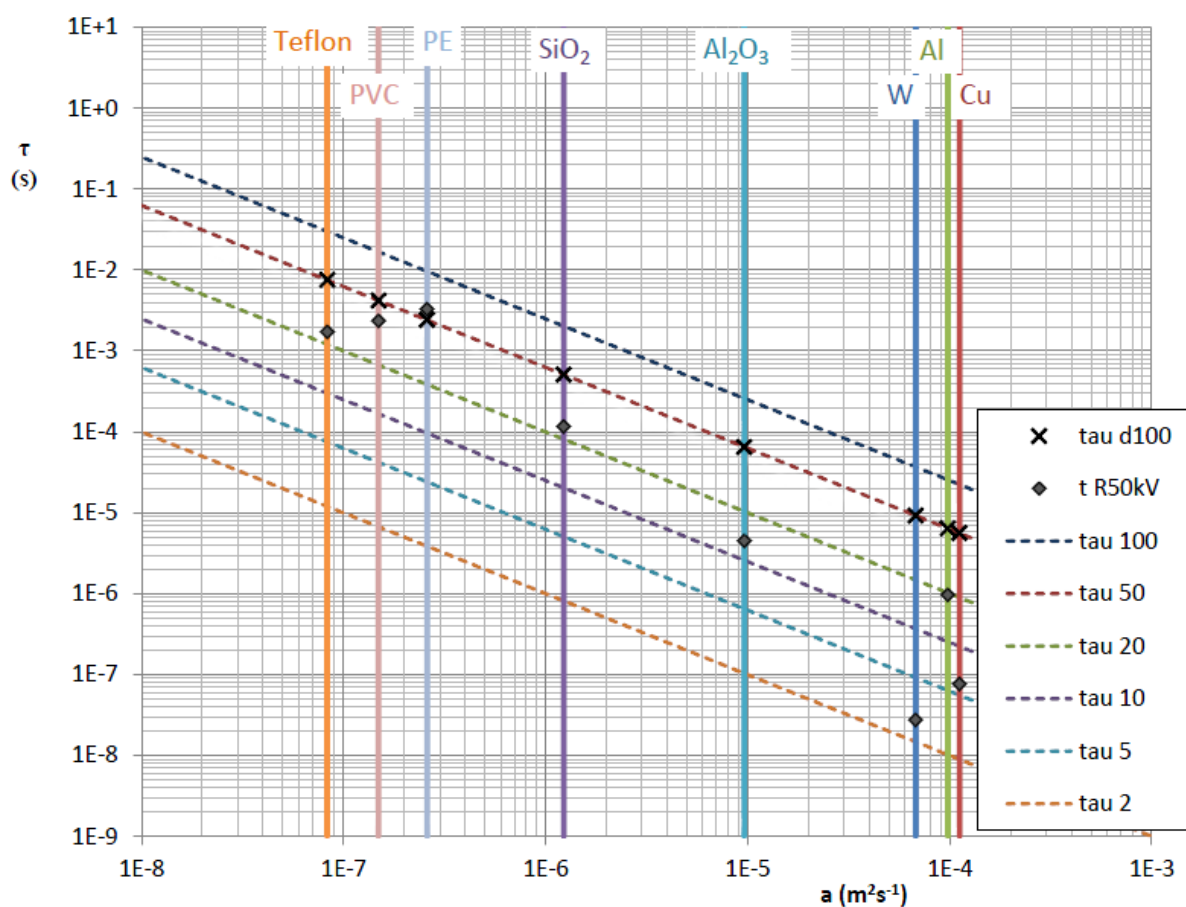
$$T(z, r, t) = \frac{p_A \cdot (z, r) \cdot t}{\varphi \cdot c} - \frac{\sum \varepsilon_F}{c}, \quad (2.5)$$

kde  $\bar{c}$  a  $\bar{\rho}$  jsou střední hodnoty hustoty a tepelné kapacity v daném rozsahu teplot a  $\Sigma \epsilon_F$  je celkové teplo fázových přeměn.

Jestliže doba  $t$ , uplynulá od začátku působení elektronového svazku na vzorek, převyší hodnotu  $\tau$  podle rovnic (2.3), je teplo zčásti odváděno do okolí a teplota v místě maximální absorpce energie roste pomaleji podle vztahu [6]:

$$T_{(\max.t)} = \frac{P_{A\max}}{\rho \cdot c} \cdot t^n, n < 1, t \geq \tau. \quad (2.6)$$

Nakonec při  $t \gg \tau$  dosáhne teplota své maximální hodnoty. Výsledné rozložení teploty závisí jen na výkonu elektronového svazku a tepelné vodivosti materiálu.



Obr. 2.1 Graf závislosti relaxačního času  $\tau$  na teplotní difuzivitě podle vztahu (2.3) pro různé hodnoty  $R$ , resp.  $d/2$  [6].

### 2.3 Proces pronikání svazku do hloubky materiálu

Proces vnikání elektronového svazku do materiálu je nejdůležitější částí procesu interakce svazku s materiálem.

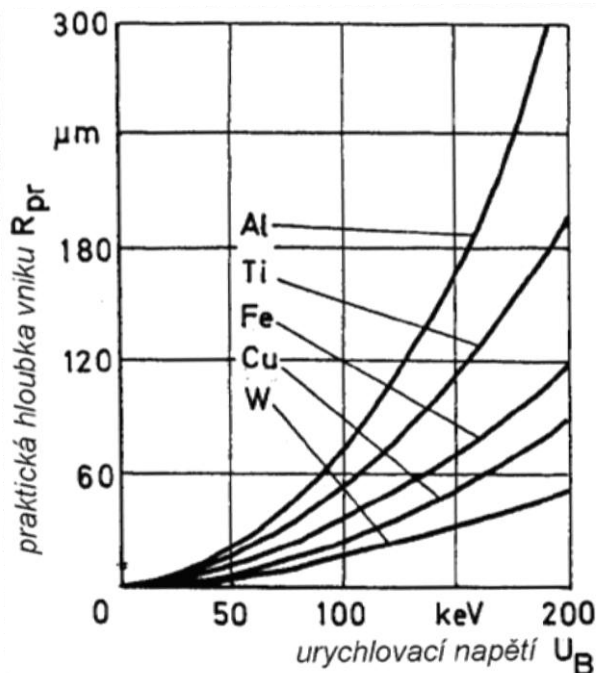
Hloubkou vniku elektronů rozumíme dráhu elektronů v materiálu, na které předají svou kinetickou energii částicím pevné látky v zasaženém objemu. To se projeví v první fázi zvyšováním jeho teploty, která podle okolností může vést ke změnám skupenství a dalším jevům [8].

Jestliže vyjádříme rychlost elektronů urychlovacím napětím  $U_B$ , můžeme pro hloubku elektronů odvodit vztah [1]:

$$R_{pr} = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{\varphi} \cdot U_B^2 \quad [mm], \quad (2.7)$$

kde  $\varphi$  je měrná hmotnost materiálu [ $g \cdot cm^{-3}$ ] a  $U_B$  je urychlovací napětí [kV].

Závislost hloubky vniku elektronů na urychlovacím napětí pro několik materiálů je na Obr. 2.2 Odtud např. odečteme, že elektrony urychlené napětím 150 kV vniknou do hloubky jen 0,025 mm [1]. Hloubka vniku elektronů pro různé materiály a urychlovací napětí, vypočtené podle vztahu 2.7, jsou uvedeny v Tab. 2.2.



Obr. 2.2 Praktická hloubka vniku elektronů v závislosti na urychlovacím napětí [1].

Při takových hloubkách vniku elektronového svazku dochází k úbytku kinetické energie podél osy svazku. Vztah pro úbytek energie vnikajícího elektronového svazku lze vyjádřit ve tvaru [1]:

$$\frac{\Delta e U_B}{e U_B} = \frac{\varepsilon_w}{\varphi} \cdot \varphi \cdot h, \quad (2.8)$$

kde činitel úbytku energie  $\varepsilon_w / \varphi$  není konstantní, ale je závislý na rychlosti elektronů a s klesající rychlostí výrazně narůstá.

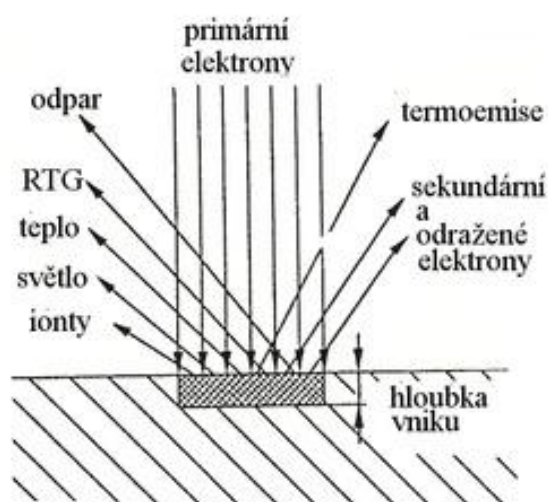
Významněji se tato vlastnost elektronů projevuje při energiích pod 200 keV. Při hodnotách nad 200 keV klesá energie rovnoměrně.

Tab. 2.2 Hloubka vniku elektronů (v  $\mu\text{m}$ ) pro vybrané materiály [6, 7].

Materiál	Urychlovací napětí		
	30 kV	50kV	60kV
Wolfram	1,0	2,7	3,9
Molybden	1,8	5,1	7,4
Tantal	1,1	3,2	4,5
Měď	2,1	5,9	8,4
Hliník	7,0	19,4	28,0
Teflon	8,6	23,9	34,4
PVC	13,5	37,5	54,0
Korund	4,7	13,1	18,9
ČSN 17 240	2,4	6,7	9,6

Tím, co bylo výše zmíněno, není proces v místě dopadu elektronového svazku zcela popsán. Dochází zde k dalším jevům:

- část primárních elektronů se od povrchu pružně odrazí,
- některé elektrony jsou primárními elektrony vyraženy,
- vzniká spojitě (tzv. „brzdné“) a (tzv. „charakteristické“) rentgenovo záření charakteristické pro různé materiály,
- jistá část energie se také spotřebuje na vyzáření světlo a teplo, ionizaci další jevy vyznačené v Obr. 2.3.

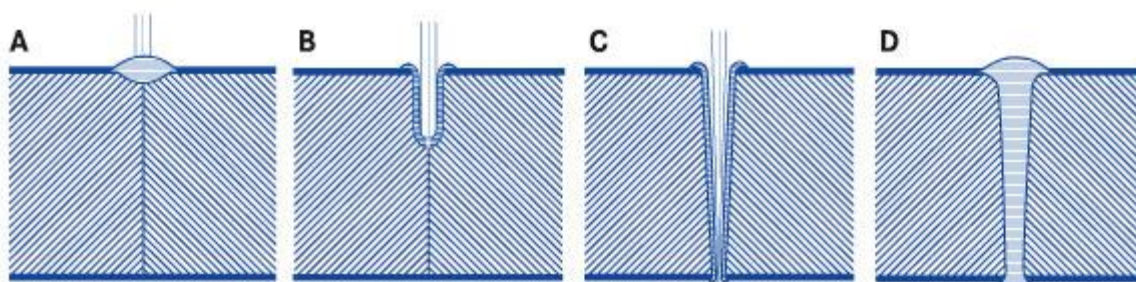


Obr. 2.3 Povrchové jevy [8].

Část energie svazku (závisející na mnoha činitelích), která se spotřebuje na tyto přidružené jevy, z hlediska svařování hodnotíme jako ztráty. V literatuře jsou uváděny hodnoty až 40 % pro začátek procesu, které ale po vniknutí svazku pod povrch mohou klesnout na 10 až 5 % [8].

## 2.4 Vznik a růst kapiláry

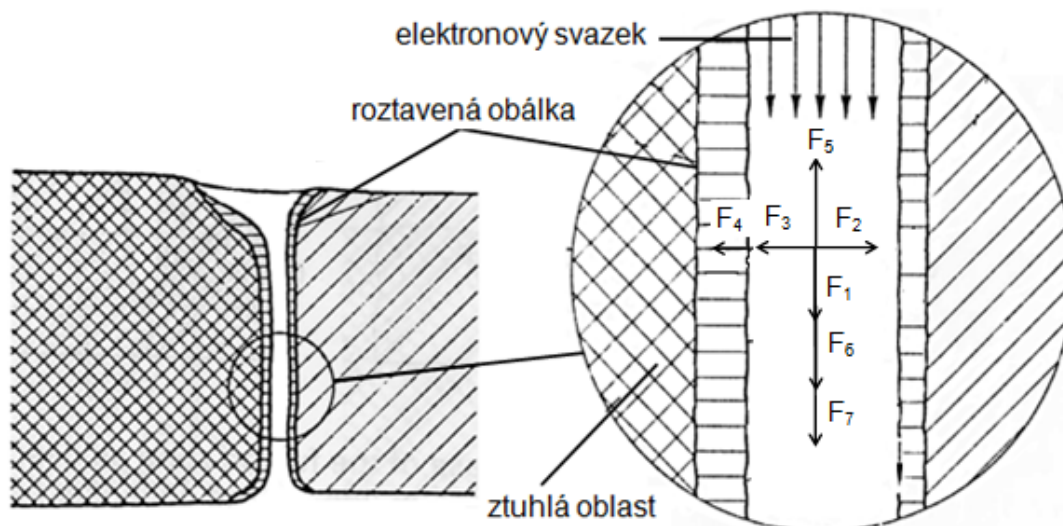
Část materiálu, která je bombardována koncentrovaným svazkem elektronů se velmi rychle roztaví a změní v páru kovů, která se dále přehřívá. Jakmile dosáhne vysoké teploty, expandující páry aktivně vytlačují roztavený kov pod dopadajícím svazkem a tím uvolňují elektronům cestu k dalšímu postupu do materiálu. Teplota, při které tento jev nastává, závisí na materiálu [1]. Rychlost pronikání svazku do hloubky může být mnohem vyšší než rychlost odvodu tepla vedením do okolí. V důsledku toho vznikne kapilára vyplněná parou a obklopena roztaveným kovem (Obr. 2.4). Vzniklá kapilára je označována jako tzv. „klíčová dírka“, v anglické literatuře pak „keyhole“. Při svařování vede k vytvoření úzkých a hlubokých svarů.



Obr. 2.4 Průběh vzniku svaru (A) tavení povrchu, (B) vznik tzv. klíčové dírky, (C) pronikání klíčové dírky, (D) svar po ztuhnutí [9].

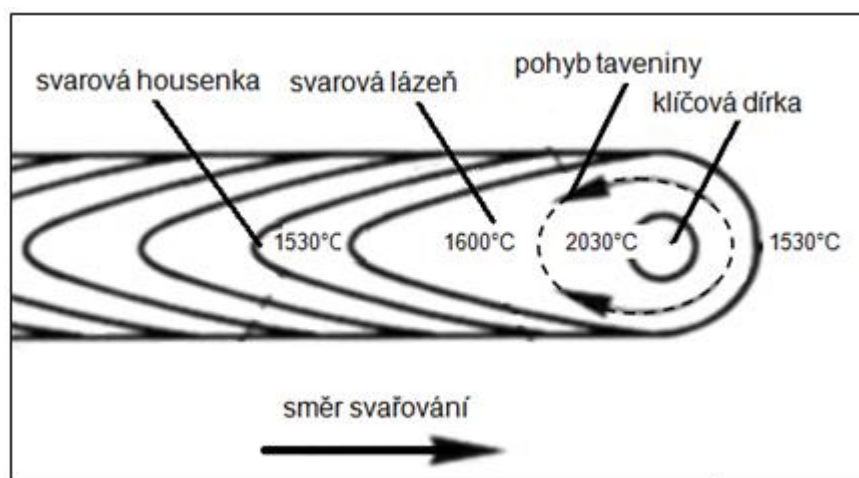
Aby proces pronikání elektronového svazku mohl probíhat stabilně, musí při něm působit určité síly na roztavený kov v kapiláře (Obr. 2.5):

- $F_1$  síla tlaku elektronového svazku,
- $F_2$  elektromagnetická síla vnikající od svazku elektronů,
- $F_3$  síla reakce na odpařování,
- $F_4$  statický tlak par v kapiláře,
- $F_5$  síla vznikající z povrchového napětí,
- $F_6$  gravitační síla,
- $F_7$  hydrostatická síla tekutého kovu.



Obr. 2.5 Analýza sil působících v kapiláře [2]

Tlak par kovu v kapiláře působí proti povrchovému napětí a hydrostatickému tlaku roztaveného materiálu a tlačí jej ke stěně kapiláry. Experimentální hodnoty šířky roztaveného kovu na stěně kapiláry nejsou k dispozici, ale výpočty ukazují, že hodnoty šířky taveniny se pohybují v desetinách mm. Při pohybu elektronového svazku dochází k nerovnoměrnému rozložení tepla kolem klíčové dírky (Obr. 2.6), a v důsledku toho vzniká značný rozdíl teploty v kapiláře a povrchovém napětí taveniny. Na přední čele kapiláry je značně vyšší teplota oproti zadní stěně, kde se teplota přibližně rovná teplotě krystalizace. K pohybu taveniny dochází vlivem termokapilárního napětí, kdy se tavenina pohybuje od místa s menším povrchovým napětím směrem k místům s vyšším povrchovým napětím. To znamená přemístění taveniny kolem paprsku dozadu na stranu s poklesem teploty. Přemísťování taveniny není plynulý proces, ale děje se ve skocích. Výsledkem postupného tuhnutí taveniny je v případě svařování vznik tzv. svarové housenky (Obr. 2.7).



Obr. 2.6 Nesymetrické rozložení teploty v okolí klíčové dírky [2].



Obr. 2.7 Detail svarové housenky [6].

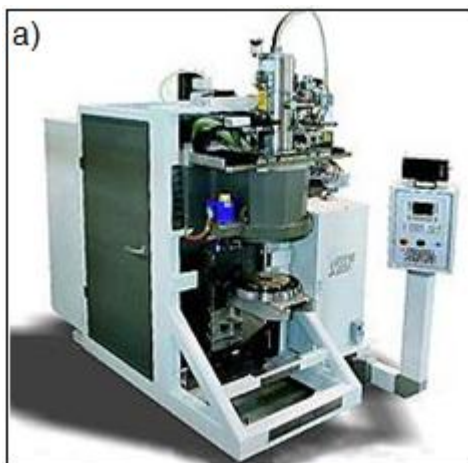


### 3 SVAŘOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ

Svařování elektronovým svazkem patří k nejnámější a prozatím nejrozšířenější technologii využívající svazek elektronů.

Princip svařování spočívá ve využití kinetické energie urychlených elektronů pohybujících se ve vakuu. Elektronový svazek v místě dopadu zahřívá materiál svařovaných součástí až nad teplotu tavení. Taveniny na rozhraní součástí se promíchávají a po vychladnutí vznikne svarový spoj. Pro svařování je třeba získat patřičně urychlené elektrony, aby se zvýšila jejich energie, která se přemění na teplo.

Elektrony pronikají jen několik mikrometrů pod povrch materiálu, ale díky vzniku tzv. klíčové díry mohou pronikat do značné hloubky materiálu. Rychlost pronikání svazku do hloubky je mnohem vyšší než odvod tepla do šířky. Proto vzniklé svary mohou dosahovat velkých hloubek při malé šířce a malé tepelně ovlivněné oblasti. Dosahovaný poměr šířky a hloubky průvaru je až 1:30. Podrobný popis principu jednotlivých pochodů je vysvětlen v předchozích kapitolách.



Obr. 3.1 Elektronové svářečky [9, 10].

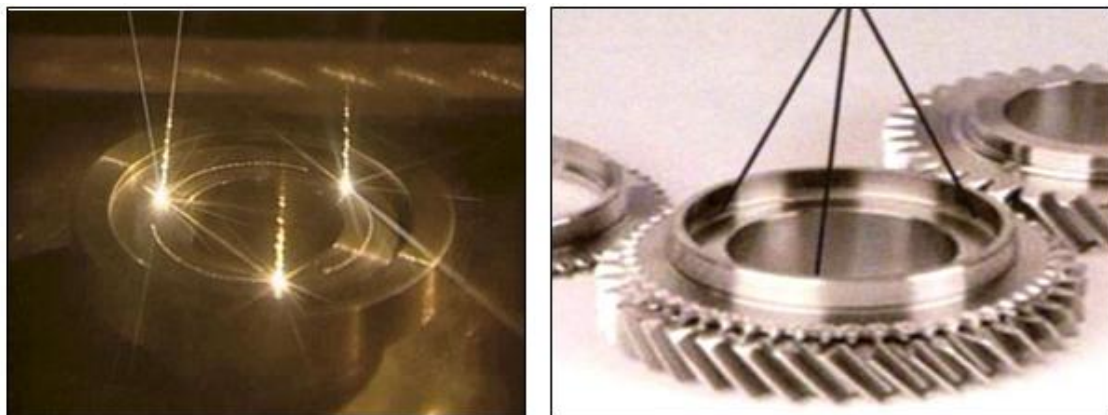
Schopnost využít elektronového svazku pro svařování je známa již z pokusů na konci 19. a na počátku 20. století. Přesto výzkum a vývoj začíná doopravdy až v padesátých letech 20. století. Průlom v elektronových technologiích učinil právě K. H. Steigerwald, který pracoval na vývoji výkonnějších zdrojů elektronů pro elektronové mikroskopy u firmy Zeiss-Oberkochen. Další rozvoj elektronových technologií učinili von Ardenne a Stohr, kteří rozvíjí svařování a tavení elektronovým svazkem.

Zařízení na svařování elektronovým svazkem se pohybují v širokém rozsahu velikostí a výkonů (Obr. 3.1) [11]. Současná zařízení disponují pracovními komorami od nejmenších o objemu několika litrů až po komory s objemem 630 m<sup>3</sup>. Používaná urychlovací napětí jsou v rozsahu 30 až 200 kV, nejčastěji 60 kV a 150 kV. Výkon elektronových svářeček se pohybuje od několika kW až po 200 kW [6].

S postupným rozvojem elektroniky dochází v současné době k rozšíření nových postupů při svařování elektronovým svazkem. Mezi tyto postupy patří například vícebodové (multikapilární) svařování.

Víceprasková technologie využívá možnosti velmi rychle a v krátkých časových intervalech vychylovat elektronový svazek na několik míst, ve kterých dochází ke svaření (Obr. 3.2). Výhodou této metody je minimalizování tepelných deformací

ve svařované součásti a zkrácení celkového času svařování. V oblasti průmyslu, převážně automobilovém, je tato metoda již běžně využívána [12]. Příkladem využití této metody je svařování ozubených kol právě pro automobilový průmysl (Obr. 3.2).



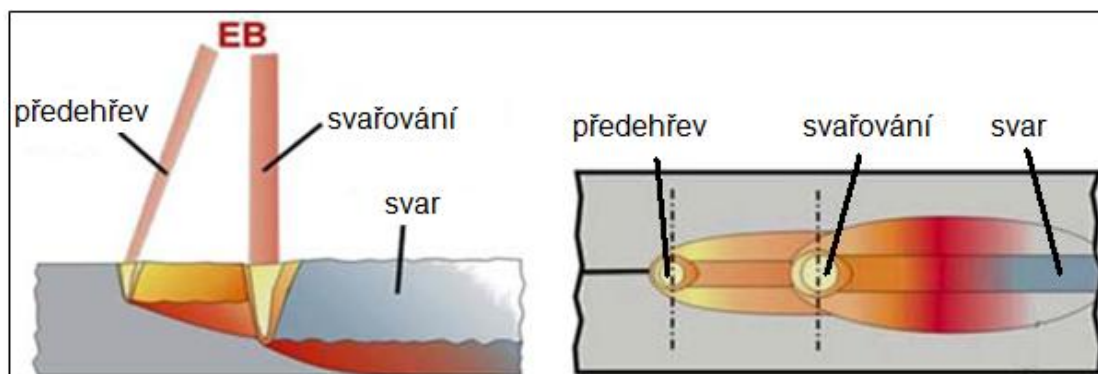
Obr. 3.2 Tříbodové svařování ozubených kol [12].

Na další obrázku (Obr. 3.3) je znázorněn filtr pevných částic, který byl svařen šedesáti současně provedenými svary.



Obr. 3.3 Filtr pevných částic [12].

Kromě svařování může být multi svazek využit pro předehřev a drobné „kosmetické“ úpravy svarové housenky [13]. Při vícepaprskové technologii dochází k eliminaci trhlin vzniklých při svařování. Na Obr. 3.4 je znázorněno schéma vícepaprskové technologie, kdy jeden paprsek provádí předehřev a druhým paprskem je současně proveden vlastní svar. Tato metoda svařování s předehřevem podstatně snižuje vznik vad a trhlin ve svaru.



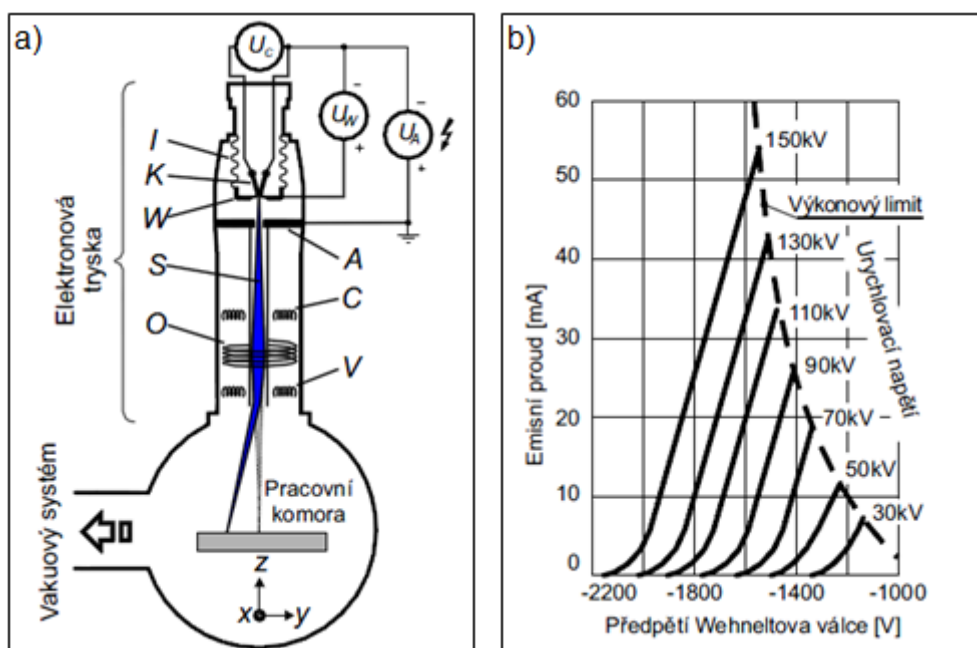
Obr. 3.4 Schéma vícepaprskové technologie za předehřevu a současného svařování [12].

### 3.1 Základní části elektronové svářečky

Mezi základní části elektronové svářečky patří nejen níže popsané části (elektronové dělo, pracovní komora, manipulační systém), ale také vakuový systém se dvěma oddělenými čerpacími systémy pro čerpání prostoru elektronového děla a pracovní komory a samozřejmě elektronická část (zdroj vysokého napětí a řídicí systémy).

#### 3.1.1 Elektronové dělo

Elektronové dělo je srdcem každého zařízení využívající elektronový svazek a představuje řízený zdroj elektronového svazku. Na Obr. 3.5a je znázorněno schéma elektronového děla triodového typu. Elektronové dělo se skládá ze dvou hlavních částí, zdroje elektronů a elektronové optiky.



Obr. 3.5 Elektronové dělo (a) uspořádání triodového elektronového děla, (b) závislost proudu svazku na předpětí Wehneltova válce a urychlovacím napětí [7].

#### Zdroj elektronů

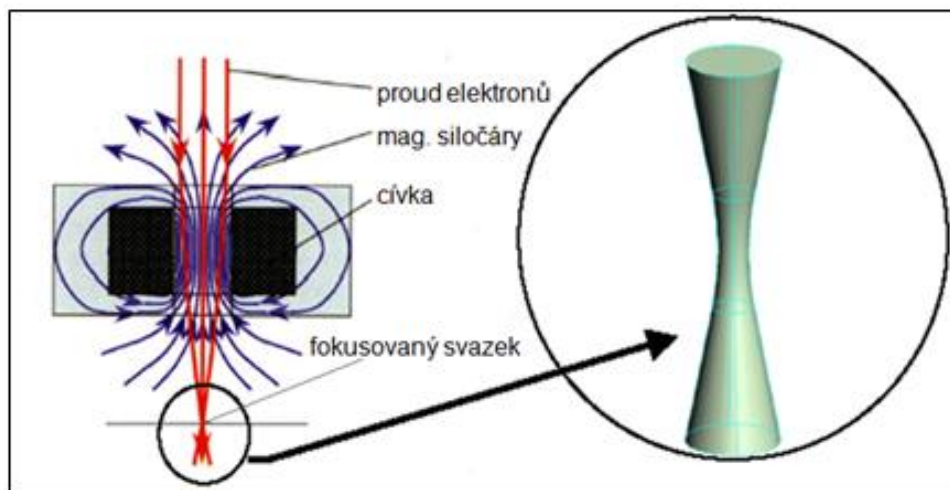
Volné elektrony se získají termoemisí ze žhavené katody (**K**) průchodem elektrického proudu. Katoda je nejčastěji z wolframového drátu nebo pásková. Na katodu je přiveden záporný potenciál, zatímco na anodě (**A**) je nulový potenciál. V důsledku rozdílného potenciálu se mezi oběma elektrodami vytvoří silné elektrické pole, které urychluje elektrony směrem k anodě. Množství emitovaných elektronů, tj. emisního proudu opouštějící katodu, lze řídit pomocí potenciálu na třetí elektrodě (**W**) nazývané Wehneltův válec.

Závislost proudu svazku na předpětí Wehneltova válce je vidět na Obr. 3.6b. Změnou potenciálu na Wehneltově válci vůči katodě se dá řídit výkon elektronového svazku spojitě od nuly až do požadované hodnoty.

#### Elektronová optika

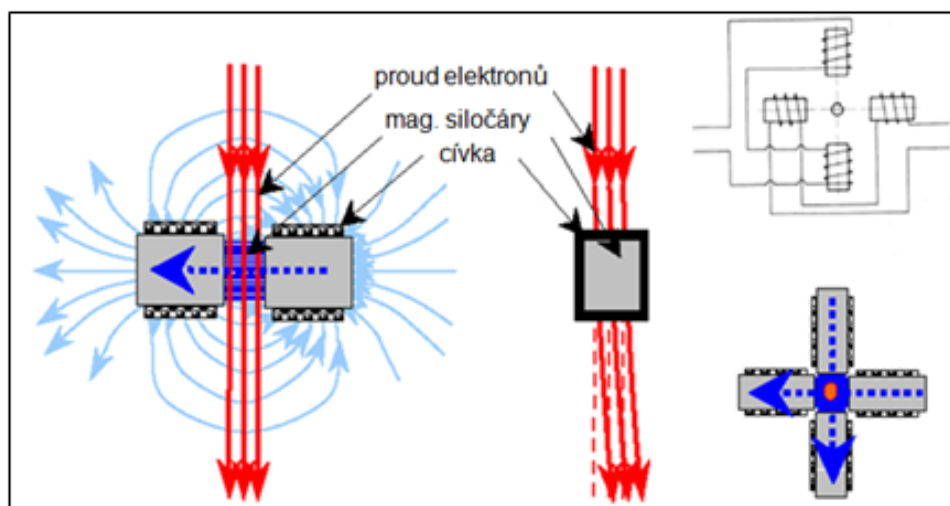
Funkcí elektronové optiky je zaostřit rozbíhavé trajektorie elektronů a přivést elektronový svazek k povrchu materiálu. K základním optickým prvkům použitých v elektronovém děle patří fokusační čočka (**O**) a deflektor (**V**).

Fokusační magnetickou čočku (Obr. 3.6) tvoří válcová budicí cívka obklopená pláštěm z feromagnetického materiálu. Elektrický proud v budicí cívce vytváří fokusační magnetické pole, které rozbíhavé elektrony změni na sbíhavé. Magnetické pole čočky nezmění velikost rychlosti elektronů. Mění pouze směr jejich pohybu tak, že se jejich trajektorie protínají v určitém bodě na ose svazku nazvaném křížiště.



Obr. 3.6 Schéma magnetické fokusační čočky [13].

Pro odklonění svazku z přímé dráhy slouží deflektor (Obr. 3.7). Nejčastěji je tvořen dvěma páry cívek navinutých na magnetických jádrech, které budí dvě vzájemně kolmá homogenní pole pro vychylování ve dvou směrech. Vhodnou kombinací proudů můžeme vychýlit elektronový svazek do libovolného úhlu. Změnou proudů v čase se získá pohybující se svazek, který lze využít k rastrování nebo k vedení svazku po libovolné dráze.



Obr. 3.7 Schéma deflektoru [13].

Je nutné dodat, že elektromagnetické čočky pracují pouze ve vysokém vaku (celý tubus elektronového děla musí být pod vakuem). Elektromagnetické čočky slouží pouze jako spojky. Zvětšení čoček lze měnit změnou proudu, který cívkami teče. To je jediný rozdíl mezi magnetickými a skleněnými čočkami. Jinak se chovají stejně a mají stejné druhy optických vad.

Existují určitá základní a principiální omezení, které zamezují dosažení bodové stopy svazku na povrchu součásti. Mezi nejdůležitější patří:

- vzájemná odpudivá síla mezi elektrony,
- rozdílné počáteční rychlosti elektronů,
- vady elektronové optiky.

Požadavek na co nejmenší stopu svazku v případě této technologie není tak potřebný. Velikost stopy používaná pro technologické aplikace se běžně pohybuje od desetin milimetru výše.

Významnou vadou elektronové optiky pro svazky používané pro svařování je sférická vada. Vliv na velikost stopy může mít i astigmatismus. Podrobnější rozbor jednotlivých vad je popsán v kapitole Optická omezení elektronového svazku.

### **3.1.2 Vakuová komora**

Při atmosférickém tlaku je volná dráha elektronů velmi krátká. Aby nedocházelo k rozptylu elektronového svazku vlivem srážek s molekulami vzduchu, je nutné dosáhnout požadovaného vakua v prostoru pracovní komory. Pracovní tlak v komoře dostatečně vyhovuje pod hodnotu 0,1 Pa, v prostoru katody je nutné lepší vakuum, zejména z důvodu zamezení nežádoucích reakcí katody se zbytkovým plynem [14]. V tubusu elektronového děla je nutné udržovat hodnotu tlaku pod 0,001 Pa.

Pracovní komory pro svařování elektronovým svazkem se pohybují v širokém rozsahu konstrukcí. Současná zařízení disponují pracovními komorami od nejmenších objemů cca 0,01 m<sup>3</sup>, určené pro svařování ozubených kol a podobně. Pro svařování větších dílců (turbínové rotory, části draku) se využívají komory dosahující objem řádově 100 m<sup>3</sup>.

Dle velikosti absolutního tlaku v komoře se vakuové komory dělí na:

- komory s „vysokým vakuem“ ( $P = 10^{-3} - 10^{-2}$  Pa) používané v letectví,
- komory se „středním vakuem“ ( $P = 10^{-1} - 10$  Pa), vhodné pro méně reaktivní kovy,
- komory s atmosférickým tlakem, vodné pro levnou výrobu např. v automobilovém průmyslu [15].

### **3.1.3 Manipulační systém**

Manipulační systém realizuje vzájemný pohyb mezi svařencem a elektronovým svazkem při vlastní operaci svařování. Ve většině případů má polohovací zařízení podobu křížového stolu, otočné desky s drážkami pro upnutí svařence nebo přídavných polohovacích systémů. Pro pohon jednotlivých manipulátorů se často používají stejnosměrné nebo krokové motory. K odměřování polohy se používají běžné prvky, jako jsou inkrementální a indukční snímače a podobně.

### 3.2 Parametry svařování

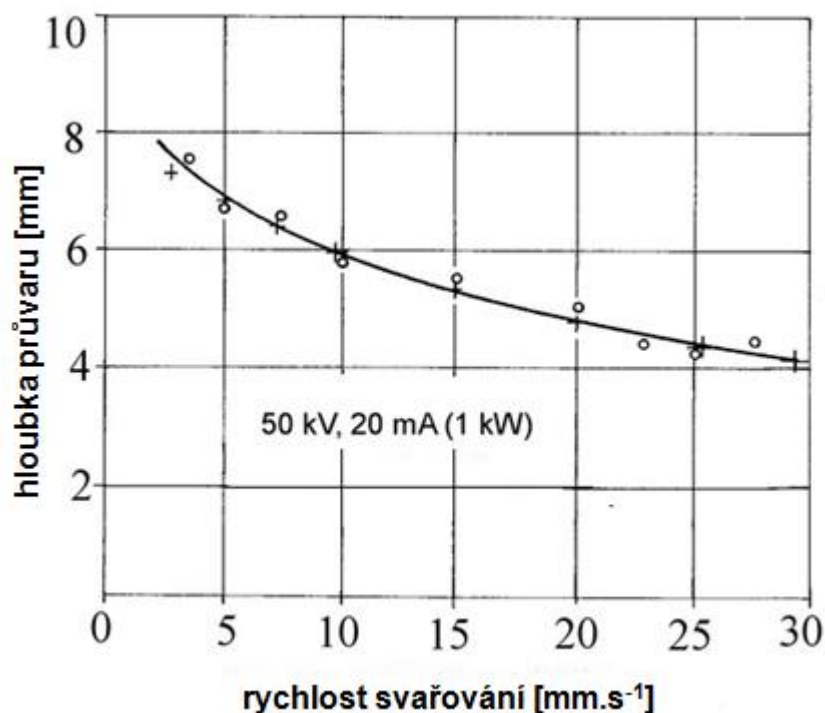
Následující podkapitoly vysvětlují vliv základních parametrů na proces svařování, mezi které patří urychlovací napětí, proud svazku, rychlost svařování, zaostření svazku a pracovní tlak. Samozřejmě na proces svařování mají vliv další parametry, (vychylování svazku, pulzace svazku, pozice svařování), které nejsou v této práci blíže rozebrány. Podrobnější vliv dalších parametrů uvádí Schulz H. [2].

#### 3.2.1 Rychlost svařování

Čelo svazku se protavuje do hloubky rychlostí řádu centimetrů za sekundu, proto může i hluboké svařování postupovat značnou rychlostí [8]. Rychlost spolu s energií svazku určují hloubku tavné zóny a přemísťování materiálu do tavné lázně [2]. Rychlost svařování především ovlivňuje proces tuhnutí a chladnutí. Při vyšších rychlostech svařování může docházet ke vzniku zápalů a kontrakcí podél hlavy a kořene svaru. Na rychlosti svařování mohou také záviset některé nežádoucí důsledky, např. vnitřní pnutí ve svaru a jeho okolí, které může vést k tvorbě trhlin.

Profil závislosti hloubky průvaru na rychlosti znázorňuje graf na Obr. 3.8. Z grafu je patrné, že hloubka průvaru neklesá s rostoucí rychlostí lineárně, ale mnohem pomaleji. Což je důsledek zmenšení roztavené oblasti a nižších ztrát odváděním tepla do okolí.

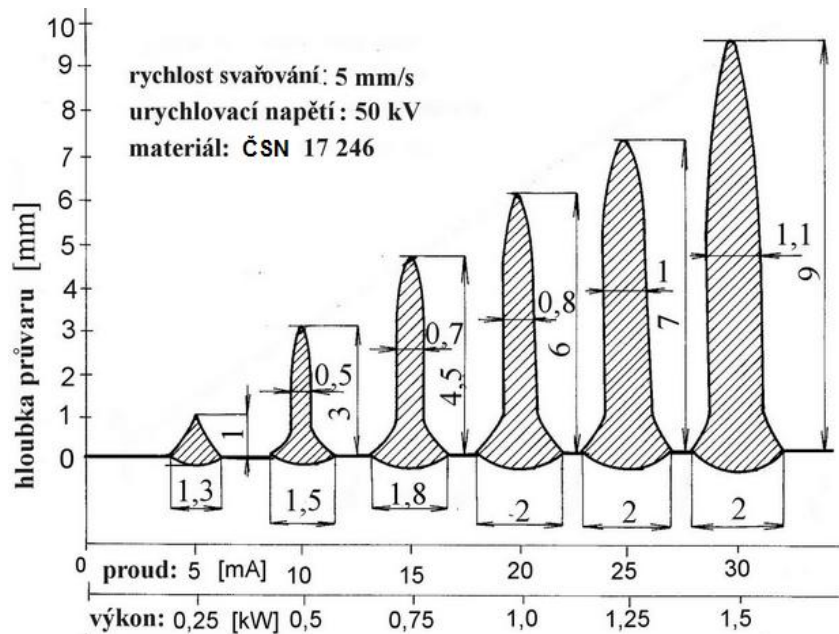
Definice optimální rychlosti svařování pro rozmanitost podmínek není možná, musí se volit podle okolností, případ od případu [8].



Obr. 3.8 Závislost rychlosti svařování na hloubce průvaru [8].

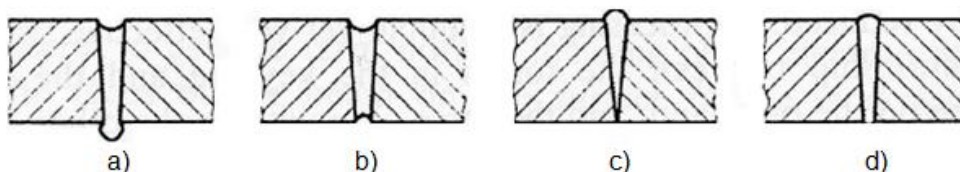
### 3.2.2 Proud svazku

Proud svazku a urychlovací napětí určují výkon svazku a především ovlivňují výsledný tvar svaru. Jedná se o nejdůležitější parametr ovlivňující hloubku svaru. Vliv výkonu svazku na hloubku průvaru je možné vidět na Obr. 3.9.



Obr. 3.9 Závislost hloubky průvaru na výkonu svazku [8].

Při větším proudu než je potřebný k proniknutí plné tloušťky součásti, přebytečná část elektronů udržuje klíčovou díрку otevřenou a ovlivňuje kořenovou část svaru [2]. Pára, která uniká, strhává s sebou roztavený materiál. Ten zčásti ulpí vlivem povrchového napětí na okrajích kolem klíčové dírky a zčásti steče dolů, což způsobuje konkavitu hlavy svaru a kapky podél kořene svaru (Obr. 3.10a, 3.10b). Naopak při nízkém proudu se nemusí natavit plná tloušťka materiálu a bude vznikat příliš konvexní tvar hlavy svaru (Obr. 3.10c). V případě optimálního proudu svazku se vytvoří hladký konvexní tvar hlavy svaru a kořene (Obr. 3.10d).



Obr. 3.10 Různé efekty při svařování, (a) a (b) konkávní tvar hlavy a kapky v kořeni svaru, (c) příliš konvexní hlava svaru, (d) hladký konvexní tvar hlavy a kořene svaru [2].

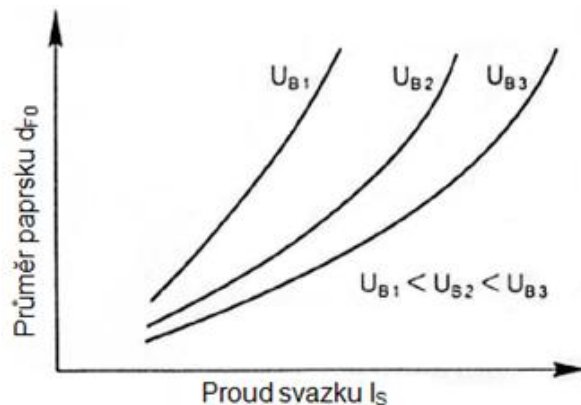
Nastavení optimálního proudu může být v některých případech obtížné. V náročných nebo složitějších případech může být nutné řízení proudu automatizovat. Je možné k tomu využít „zbytkový“ proud elektronů, které projdou stěnou. Tyto lze zachytit pod svarem zvláštní elektrodou a jejich signál může být využit k řízení proudu svazku [8]. Moderní zařízení elektronového svařování jsou vybaveny následujícími funkcemi jako:

- kontrola proudu paprsku („slope control“),
- kontrola proudu paprsku pro svařování materiálů s různou tloušťkou stěny,
- měření přeneseného proudu pro ovládání proudu paprsku.

### 3.2.3 Urychlovací napětí

Z fyzikálního hlediska je urychlovací napětí potřebné k tvorbě vysokoenergieového paprsku, který se používá pro svařování. Z hlediska svařování urychlovací napětí není nejdůležitějším ze zmíněných parametrů [2]. Pro většinu případů je vhodné volit urychlovací napětí konstantní blízké horní hranici v závislosti na typu generátoru vysokého napětí a elektronovém dělu. V žádném případě se svařovací proces změnou urychlovacího napětí neřídí [8].

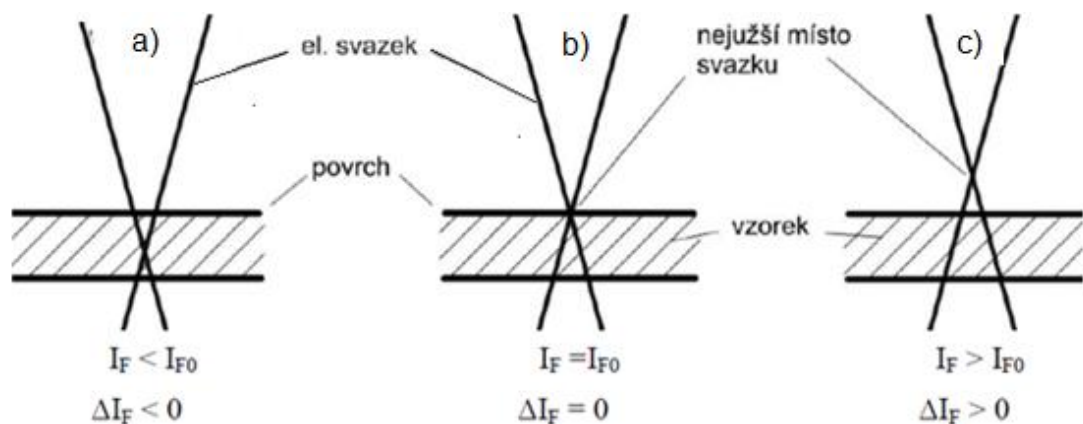
Z grafické závislosti (Obr. 3.11) je patrné, že pro požadovaný výkon paprsku a nejnižší proud svazku je dosaženo nejmenšího průměru svazku v ohnisku. Pouze ve výjimečných případech, např. když je požadovaná velká šířka svaru, je vhodné použít nižší urychlovací napětí [2].



Obr. 3.11 Vliv proudu svazku a urychlovacího napětí na průměr svazku [2].

### 3.2.4 Zaostření svazku

Zaostření svazku patří k hlavním parametrům, které ovlivňují tvar svaru. Jak už bylo v předchozích kapitolách vysvětleno, elektronový svazek vycházející z elektronového děla je mírně divergentní. K dosažení nejvyšší plošné hustoty v místě dopadu svazku je paprsek kolimován pomocí magnetických čoček [2]. Zaostření svazku a tedy poloha nejmenšího průřezu svazku, tzv. křižště, se dá měnit změnou fokusačního proudu ve fokusační čočce. Za zaostřený svazek považujeme takový stav, kdy se nejmenší průřez svazku nachází na povrchu součásti (Obr. 3.12b). Jestliže je fokusační proud menší než proud, při kterém je svazek zaostřen na povrch součásti, potom se křižště svazku posune pod povrch součásti (Obr. 3.12a). V opačném případě, pokud je fokusační proud svazku vyšší, křižště se posune nad povrch součásti (Obr. 3.12c).



Obr. 3.12 Vliv fokusačního proudu  $I_F$  na polohu zaostření, (a) zaostření pod povrch, (b) zaostření na povrch, (c) zaostření nad povrch [6].

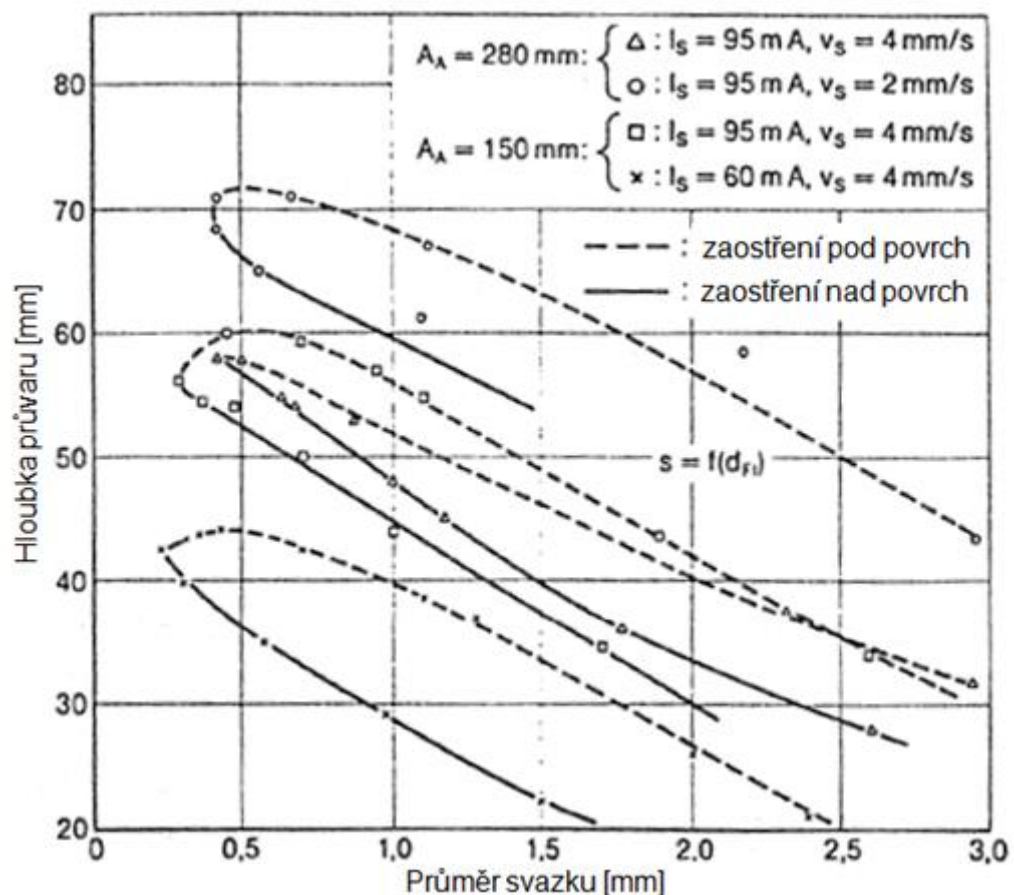


Ve většině případů je nejvhodnější zaostřit svazek na povrch svařovaného předmětu. To platí především u nepřilíš hlubokých svarů (asi do 10 mm). Při hlubších průchozích svarech bývá výhodné zaostřit svazek do jisté hloubky pod povrch (asi 1/3 hloubky svaru). Zkušenosti ukazují, že to může zmenšit pravděpodobnost vzniku dutin ve svaru (Obr. 3.13). Dochází k rovnoměrnému odpařování materiálu a tavenina může kapiláru zcela zaplnit. Rovněž podle vlastností materiálu, rychlosti svařování a vůle mezi svařovanými součástkami nemusí být zaostření na povrch nejvýhodnější [8].



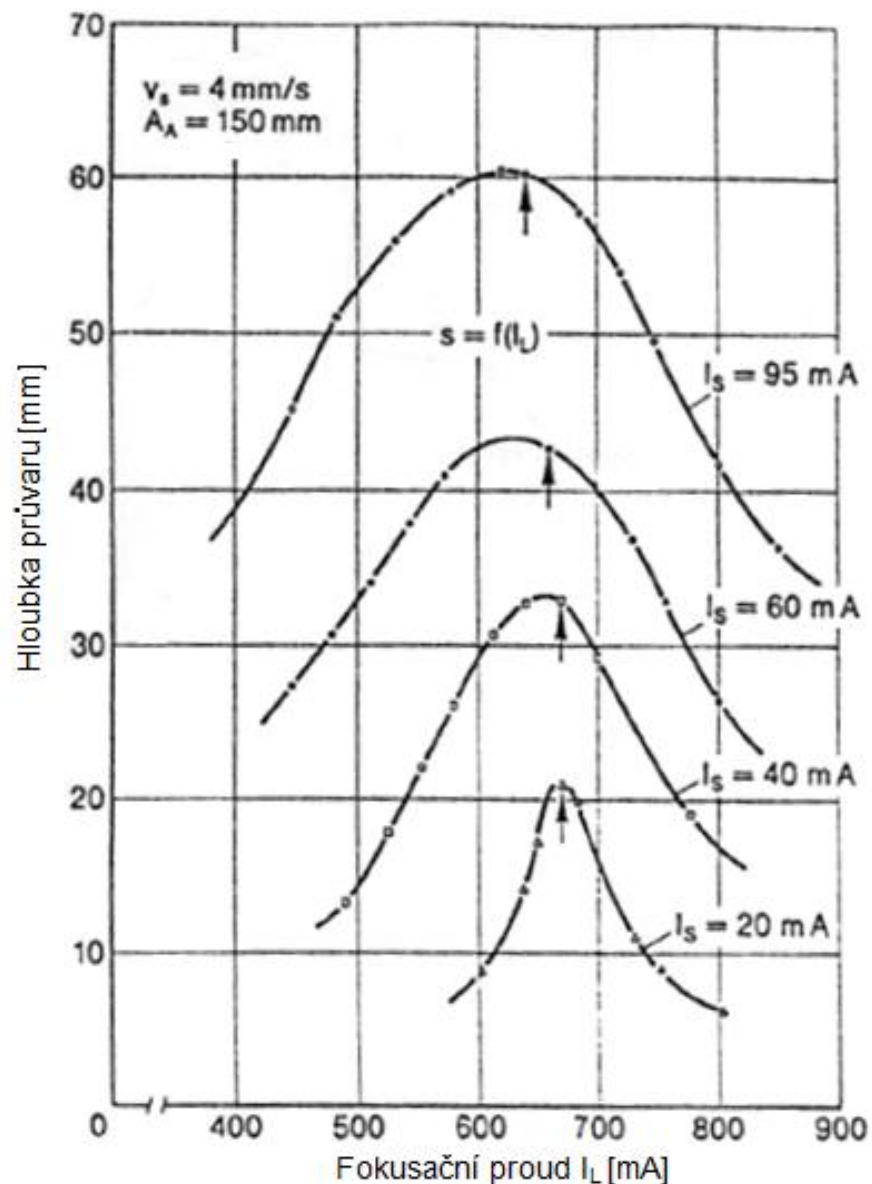
Obr. 3.13 Vliv zaostření svazku na tvorbu dutin [11].

Jak již bylo řečeno zaostření svazku má vliv na tvar svaru a především na hloubku průvaru. Obr. 3.14 znázorňuje vztah mezi průměrem svazku a hloubkou průvaru při zaostření na povrch součásti a pod povrch součásti. Je překvapivé, že při různém zaostření se hloubka průvaru může lišit až o 10 mm.



Obr. 3.14 Závislost hloubky průvaru na průměru svazku  $d_f$  při různém zaostření [2].

Obr. 3.15 znázorňuje vliv fokusačního proudu na hloubku průvaru při různých proudech svazku.

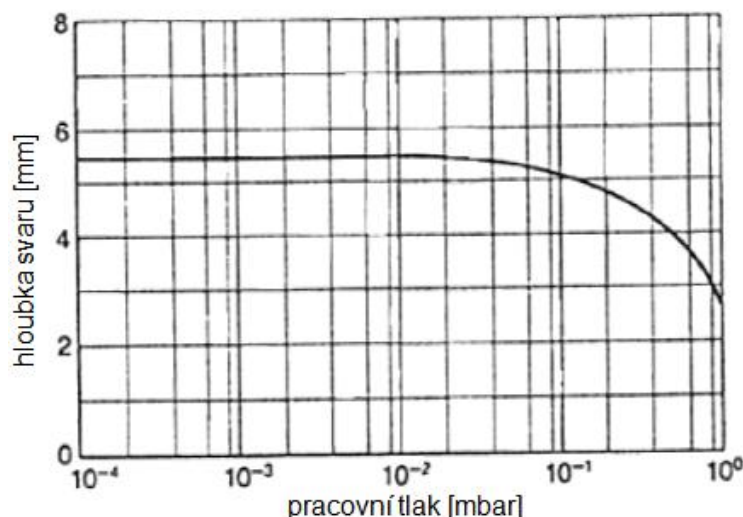


Obr. 3.15 Závislost hloubky průvaru na fokusačním proudu  $I_L$  [2].

Při použití jakékoli fokusace nastává problém, jak ji zjistit. Existují sice metody a zařízení pro automatické zaostření a měření průměru svazku, ale pro jejich složitost a nákladnost se v praxi nevyžívají. Většinou je před vlastním svařováním nejvhodnější parametry zjistit pokusem. Nejspolehlivější a nejjednodušší metoda je nastavení svazku na pomocný materiál, který je ve stejné výšce jako svařovaná součást.

### 3.2.5 Pracovní tlak

Obecně v pracovní komoře není nezbytně nutné vytvoření tak vysokého „vakua“, jak v elektronovém děle. Při hodnotě tlaku 10 Pa je ochranný účinek stejný jako účinek netečného plynu s čistotou 99,9% při svařování oceli metodou TIG. Na Obr. 3.16 je znázorněna závislost hloubky svaru na pracovním tlaku. Je patrné, že se hloubka svaru výrazně mění až od hodnoty tlaku  $10^{-1}$  mbar. Tento pokles je prakticky nezávislý na materiálu a svařovacích parametrech. Pracovní tlak v komoře lze rozdělit do dvou skupin.



Obr. 3.16 Závislost hloubky svaru na pracovním tlaku[2].

### Vysoké vakuum

Vysoké vakuum minimalizuje kontaminaci svarového kovu, proto je svařování ve vysokém vakuu vhodné pro kovy, které jsou reaktivní jako zirkon nebo titan [16]. Svary jsou úzké a mají užší tepelně ovlivněnou oblast než srovnatelné svary vzniklé ve středním vakuu.

### Střední vakuum

Svařování je prováděno o průměrném tlaku 10 Pa, nebo v rozsahu od 0,4 do 40 Pa. Při daném tlaku dochází k rozšíření svazku a snížení hustoty výkonu, což má za následek svary, které jsou obecně širší a nedosahují takové hloubky v porovnání se svary za vysokého vakua [16]. Také mají širší tepelně ovlivněnou oblast. Základní výhodou svařování v prostředí středního vakua je snížená doba pro čerpání pracovní komory.

### 3.2.6 Optimalizace parametrů

Stanovení optimálních parametrů před zahájením vlastního svařovacího procesu se může týkat řady parametrů, které je nutno uvažovat.

Stanovit obecně platný návod na optimální volbu parametrů, na kterých závisí výsledek svařovacího procesu, není zcela možné. Pouze v podobných případech svařování lze postupovat na základě předchozích zkušeností. V nových případech, s nimiž nejsou dosud zkušenosti, je nutné hledání optimálních parametrů řešit provedením pokusných svarů na modelech. Pro ověření předpokladů ohledně chování elektronového paprsku, přeměny energie nebo fyzikálních procesů odehrávajících se v klíčové dírcce lze také využít matematických vztahů.

## 4 METALURGICKÉ POCHODY PŘI SVAŘOVÁNÍ

### 4.1 Teplotní cyklus při svařování

Teplotní cyklus udává změnu teploty v závislosti na čase v daném místě svarového spoje a v tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Charakteristické změny, které se sledují, jsou:

- čas ohřevu nebo rychlost ohřevu a ochlazování [ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ],
- nejvyšší teplota cyklu  $T_{\text{max}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- doba výdrže na dané teplotě [s].

Hodnoty zmíněných parametrů závisí především na svařovaném materiálu a na technologii svařování (způsobu, parametrech a postupu).

### 4.2 Vznik svarového kovu a jeho vlastnosti

Struktura a vlastnosti svarového kovu primárně závisí na chemickém složení a metalurgické čistotě. Nicméně důležitou roli však hraje geometrie tavné lázně, s níž souvisí velikost a orientace dendritů, charakter rozložení nečistot a také nebezpečí vzniku některých defektů [17].

Krystalizace svaru začíná při poklesu teploty pod teplotu likvidu. Svarový kov krystalizuje především díky heterogenní nukleaci na svarových plochách. Rostoucí krystaly jsou ve stálém styku s taveninou, tím jsou splněny podmínky pro usměrněné tuhnutí. Až na výjimky má svarový kov dendritickou strukturu [17]. Velikost dendritů, jejich tvar a orientace souvisí s velikostí a tvarem tavné lázně. Zrna pevné fáze rostou ve směru gradientu teploty.

Co se mechanických vlastností týče, SK většinou nedosahuje houževnatosti základního materiálu. Poměr meze kluzu k mezi pevnosti je vyšší. Únavové vlastnosti jsou horší, což je dáno zvýšeným množstvím potencionálních koncentrátorů napětí (povrchové vady, inkluze, samotná licí struktura svaru). [18]

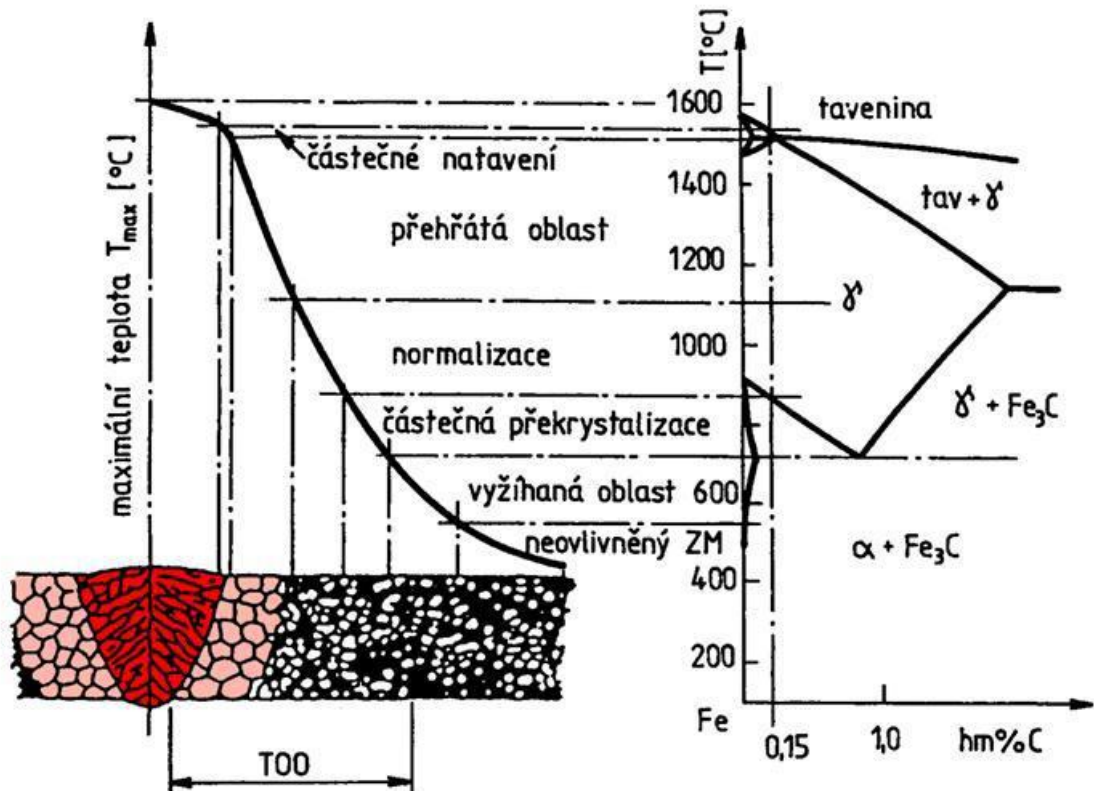
### 4.3 Přeměny v tepelně ovlivněné oblasti

Pro ocel a obecně pro všechny kovy a slitiny s polymorfní přeměnou platí, že v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) dochází k výrazným strukturním změnám, které mají vliv na vlastnosti svarových spojů.

Při svařování nelegovaných, případně legovaných ocelí s polymorfní přeměnou, můžeme podle Obr. 4.1 TOO rozdělit na několik charakteristických oblastí [17, 18]:

- **oblast částečného natavení** tvoří přechod mezi svarovým kovem a TOO, u většiny ocelí se jedná o velice úzkou oblast (linie stavení),
- **oblast přehřátí**, kde dochází k intenzivnímu růstu zrn, oblast s teplotami vysoko nad  $A_{c3}$  (1100 až 1300  $^{\circ}\text{C}$ ),
- **oblast normalizace**, ve které dochází k úplné transformaci, teplota nad  $A_{c3}$ ,
- **oblast s neúplnou polymorfní přeměnou**, rozmezí teplot  $A_{c1}$  až  $A_{c3}$ ,
- **tepelně neovlivněná oblast**, kde již nedochází ke strukturním změnám.

Šířka tepelně ovlivněné oblasti (TOO) je odlišná pro různé technologie svařování a je také výrazně závislá na parametrech svařování. Pro ROS a metodu MAG je šířka TOO 3 až 6 mm, z toho přehřátá oblast asi 0,2 mm. Svařování pod tavidlem tvoří TOO v šířce 5 až 15 mm s přehřátou oblastí kolem 0,5 mm. Pro svařování laserem nebo elektronovým paprskem je šířka TOO velice malá a nepřesahuje 0,8 mm [44].



Obr. 4.1 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [19].

#### 4.4 Trhliny a vady ve svarových spojích

Defekty ve svaru mohou vznikat za tepla nebo za studena. Výskyt různých typů defektů může omezit nebo znemožnit použití svarového spoje. Proto je nutno volit takové podmínky svařování, aby se co nejvíce omezily.

##### Trhliny za horka

Hlavní příčinou trhlin za horka je snížení deformační schopnosti zrn kovu a pokles soudržnosti po hranicích zrn při vysokých teplotách při současném působení tahové napjatosti a rychlosti deformace [19]. Metalurgickou příčinou vzniku trhlin jsou nečistoty S a P, které tvoří se železem nízkotavitelné sulfidy, fosfidy a nízkotavitelné eutektika. Trhliny za horka vznikají v rozsahu teplot 1300 až 680 °C ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti (TOO) základních materiálů a jsou interkrystalického charakteru [20]. Lze je rozdělit na:

- krystalizační (dendritické), které vznikají při tuhnutí svarového kovu,
- likvační, které vznikají v tepelně ovlivněné oblasti nebo svarovém kovu,
- polygonizační trhliny, vznikají po hranicích zrn v TOO nebo svarovém kovu.

### **Trhlina za studena**

Vyskytují se v tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu, v přechodové oblasti mezi základním materiálem a svarovým kovem, ve svarovém kovu a v oblasti kořene svarového spoje [19]. Trhliny za studena jsou důsledkem přítomnosti zákalné martenzitické struktury citlivé na působení vodíku a zvýšené napětí způsobené tuhostí svařence.

### **Lamelární trhliny**

Lamelární trhliny vznikají v důsledku výskytu nekovových nečistot (oxidy, sulfidy) v oceli. Trhliny se tvoří oddělováním jednotlivých kovových vrstev v místech plošných nečistot. Mají stupňovitý tvar, zpravidla rovnoběžný s povrchem materiálu. Ocel je náchylná na tento druh trhlin při teplotách 400 až 500°C [19].

### **Žíhací trhliny**

Žíhací trhliny vznikají jako důsledek tepelného zpracování svarů. Mohou se tvořit za nízkých teplot (do 350°C), v oblasti vyšších (žíhacích) teplot (450 až 600°C) a pod návary nízkolegovaných ocelí [17]. Žíhací trhliny vznikají v průběhu ohřevu na teploty žíhání v důsledku rozpadu přesycených tuhých roztoků (martenzit, bainit) nebo mechanismem stárnutí ocelí a spolupůsobení tahového napjatosti.

### **Póry a bubliny**

Póry a bubliny jsou objemové vady kulovitého nebo protáhlého tvaru vyplněné plynem. Bubliny ve svarech vznikají v důsledku vylučování plynů obsažených ve svarové lázni při chladnutí [21]. Pokud svarový kov chladne příliš rychle, krystalizující kov zamezí unikání plynům a ty zůstávají ve svaru v podobě bublin a pórů.

### **Neprůvary a studené spoje**

Neprůvary vznikají v důsledku neúplného natavení základního materiálu nebo přilehlých svarových housenek. Studené spoje jsou způsobeny nedokonalým tavným spojením svarového kovu se základním materiálem nebo navařenou housenkou. Mezi hlavní příčiny patří především vysoká svařovací rychlost a nízký svařovací proud.

### **Vměstky**

Vměstky jsou nejčastějšími vadami ve svarových spojích [21]. Lze je rozdělit do tří skupin a to na struskové, oxidické a kovové. Vměstky mají ostré hrany, a proto jsou na rozdíl od bublin značně nebezpečné, zejména u svarových spojů namáhaných na únavu.

### **Vruby a zápaly**

Zápaly jsou ostrá natavená prohloubení na hranicích svarové housenky a základního materiálu [21]. Mezi vruby lze také zařadit neprovařený kořen.

#### **4.4.1 Zkoušení a hodnocení svarů**

Metody zkoušení svarů se řídí platnými normami. Jednotlivé zkoušky lze rozdělit do dvou oblastí, destruktivní zkoušky svarů a nedestruktivní zkoušení svarů.

##### **Destruktivní zkoušení svarů**

Mezi destruktivní zkoušky lze zařadit následující metody:

- zkouška tahem,
- zkouška vrubové houževnatosti,
- zkouška tvrdosti,
- zkouška v ohybu (zkouška lámavosti),
- zkouška únavové pevnosti,
- speciální zkoušky (creep, kryogenní teploty).

##### **Nedestruktivní zkoušky svarů**

Základním kritériem, podle kterého se NDT dělí, je schopnost detekovat vady do hloubky. Takto je tedy dělíme na metody [41], které zjišťují povrchové vady:

- vizuální kontrola (VT),
- kapilární (penetrační) metoda (PT),
- magnetická prášková metoda (MT).

Vady těsně pod povrchem se zjišťují metodou vířivých proudů (ET) a vnitřní vady se hodnotí prozařovací metodou (RT) a ultrazvukovou metodu (UT) [22]

## **5 PRECIPITAČNĚ VYTVRDIRTELNÉ KOROZIVZDORNÉ OCELI**

Precipitačně vytvrditelné oceli označované jako PH je možné zpevňovat jednoduchým tepelným zpracováním. Oceli mají dobré mechanické vlastnosti, korozní odolnost a přitom dostatečnou houževnatost. Pracují i při teplotách 550°C a svými vlastnostmi předstihují v řadě případů i dražší titanové slitiny, kromě hustoty [23]. Podle mikrostruktury oceli po rozpouštěcím tepelném zpracování je dělíme na austenitické, martenzitické a semiaustenitické [24].

Zpevňující mechanismy jsou především spojeny s tvorbou martenzitu a precipitačního zpevnění. Pro dosažení precipitačního zpevnění se oceli legují prvky jako jsou Cu, Ti, Nb, a Al. Procesy precipitačního zpevnění jsou závislé na teplotě a čase, vyšší teplota umožní dosažení maximální pevnosti v kratším čase. Precipitační reakce, které se vyskytují během vytvrzení, jsou odlišné pro různé druhy precipitačně zpevněných ocelí a jsou rozebrány v následujících kapitolách. Činitelé přispívající k precipitačnímu zpevnění jsou [25]:

- koherentní rozhraní mezi zpevňujícími precipitáty a maticí,
- rovnoměrné rozložení precipitátů,
- rozdílné moduly pružnosti ve smyku precipitátu a matrice.

## 5.1 Martenzitické precipitačně vytvrditelné oceli

Martenzitické PH oceli převyšují běžné martenzitické oceli téměř ve všech aspektech. Používají se hlavně na exponované části v letectví, kosmonautice a lodním průmyslu [26]. Chemické složení některých vybraných ocelí v této skupině je uvedeno v Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Chemické složení běžně používaných martenzitických PH oceli [27].

Ocel	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	Nb
17-4PH	0,04	0,30	0,60	16,0	4,2	-	-	3,4	-	-
15-5PH	0,06	0,30	0,40	15,2	4,5	-	-	3,4	-	0,4
13-8PH	0,04	0,03	0,03	12,7	8,2	2,2	1,1	-	-	-
FV520B	0,042	0,057	0,355	13,80	5,540	1,470	-	1,560	-	0,391
Corrax	0,03	0,30	0,3	12,0	9,2	1,4	1,6	-	-	-

Mikrostruktura oceli po rozpouštěcím ohřevu je při pokojové teplotě téměř vždy martenzitická. Nicméně se ve struktuře může objevit zbytkový austenit v závislosti na předchozím stavu zpracování. Nevhodné tepelné zpracování může vést k neúplné homogenizaci austenitu, nebo výskytu feritu. Změna martenzitické struktury opět na austenitickou je možná v průběhu vytvrzování, pokud je dostatečně vysoká teplota.

### 5.1.1 Precipitace v průběhu vytvrzování

V závislosti na chemickém složení se u martenziticky vytvrditelných ocelí mohou jako zpevňující fáze vyskytovat koherentní částice NiAl a jemné  $\gamma'$  částice, FCC fáze bohatá na Cu, Lavesovy fáze obsahující Fe, Nb, Mo a hexagonální těsně uspořádaná koherentní fáze  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  [24].

## 5.2 Austenitické precipitačně vytvrditelné oceli

Na rozdíl od martenzitických a semiaustenitických PH ocelí jsou plně austenitické. Zpevnění je dosaženo pouze precipitačním zpevněním v austenitické struktuře. Oceli se používají na součásti, jako jsou tryskové motory, turbínová kola, ventilátory, zařízení v petrochemickém průmyslu a zařízení pro nízké teploty díky stabilní austenitické struktuře. Korozní odolnost je srovnatelná se standardními austenitickými korozivzdornými oceli. Chemické složení dvou austenitických PH ocelí je uvedeno v Tab. 5.2.

Tab. 5.2 Chemické složení austenitických PH oceli [27].

Ocel	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Al	V	Ti	B
A-286	0,05	1,45	0,03	0,002	0,50	14,7	25,25	1,3	0,15	0,30	2,15	0,005
17-10PH	0,10	0,60	0,30	0,04	0,50	17,0	11,0	-	-	-	-	-

Teplota rozpouštěcího ohřevu je pro tuto skupinu ocelí obvykle vysoká. Což má vliv na velikost zrna a konečné mechanické vlastnosti. Jemnější zrno zlepšuje vlastnosti za pokojové teploty, zatímco hrubší zrno zlepšuje pevnostní vlastnosti při creepu.

### 5.2.1 Precipitace v průběhu vytvrzování

Zpevnění nastává precipitací koherentních FCC intermetalických sloučenin  $\gamma'$   $\text{Ni}_3$  (Ti, Al) v austenitu [25]. Přítomnost  $\gamma'$  fáze také zvyšuje odolnost proti koroznímu praskání. Při dlouhodobém tepelném zpracování může vzniknout  $\eta$  fáze, která snižuje mechanické vlastnosti [27]. Také zhrubnutí  $\gamma'$  fáze má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti.



### 5.3 Semiaustenitické precipitačně vytvrditelné oceli

Semiaustenitické PH oceli jsou převážně austenitické s určitým podílem  $\delta$ -feritu (5-20%), který zůstává po dobu zpracování netransformovaný. Ve stavu po rozpouštěcím ohřevu mají dobré plastické vlastnosti a mohou být bez problému tvářeny. Po tváření může být ocel zpevněna na požadovanou úroveň martenzitickou transformací a precipitačním zpevněním. Pro získání požadovaných vlastností musí být austenit a ferit v rovnováze. V případě nestabilního austenitu se může martenzit tvořit i při pokojové teplotě a místo semiaustenitické PH oceli vznikne martenzitická PH ocel [27]. Oceli se používají pro namáhané části v jaderné energetice, pro lopatky parních turbín atd. Chemické složení typických semiaustenitických PH ocelí je uvedeno v Tab. 5.3.

Tab. 5.3 Chemické složení semiaustenitických PH oceli [27].

Ocel	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	N
17-7PH	0,07	0,05	0,30	17,0	7,1	-	1,2	0,04
PH15-7Mo	0,07	0,05	0,30	15,2	7,1	2,2	1,2	0,04
PH14-8Mo	0,04	0,02	0,02	15,1	8,2	2,2	-	0,10
AL17-7	0,07	0,05	0,25	17,0	7,0	-	1,2	-

Kalení po rozpouštěcím ohřevu by mělo být dostatečně rychlé, aby se zabránilo zhrubnutí zrna. Příliš nízká teplota může vést k neúplné homogenizaci austenitu, což způsobí nadměrnou tvorbu zbytkového austenitu v martenzitické struktuře.

#### 5.3.1 Tepelné zpracování semiaustenitických ocelí

Tepelné zpracování semiaustenitických PH ocelí tvoří především:

- austenitizace,
- martenzitická transformace,
- precipitační vytvrzení.

V prvním kroku tepelného zpracování je ocel ohřata na 750 až 960 °C a ochlazována na vzduchu. Vznikají přitom karbidy chromu ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ), které přednostně precipitují na rozhraní feritu a austenitu. Vyloučené karbidy snižují obsah uhlíku v tuhém roztoku, čímž se zvyšuje teplota počátku martenzitické transformace  $M_s$ , proto ocel při ochlazení na pokojovou teplotu nebo pod  $A_{c1}$  překonává martenzitickou přeměnu [24]. V případě příliš vysoké teploty se vytvoří méně karbidů, což povede k poklesu teploty  $M_s$  a nutnosti ochlazení oceli pod pokojovou teplotu pro dokončení martenzitické transformace.

Dalším krokem je precipitační vytvrzení pro dosažení požadovaných vlastností. Ve většině případů je precipitační vytvrzení prováděno při teplotách 480 – 650 °C. Během vytvrzení se vytvoří precipitáty intermetalické fáze. Během vytvrzení dojde také ke snížení vnitřního pnutí a je popuštěna martenzitická struktura.

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ, METODY A MATERIÁL

### 6.1 Elektronová svářečka MEBW 60/2

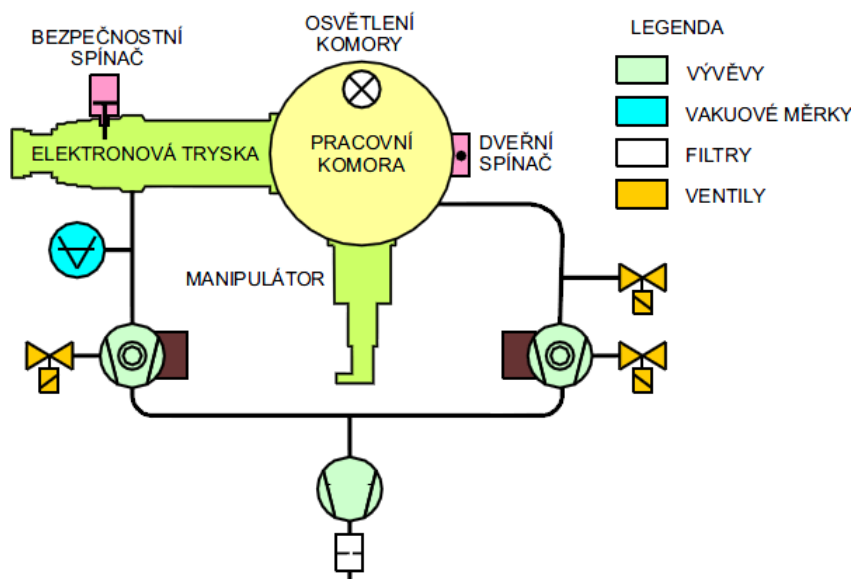
Označení svářečky MEBW 60/2 je zkratka Micro Electron Beam Welder. Jak název napovídá, elektronové zařízení je využíváno zejména pro svařování menšími výkony v přístrojové, vakuové a kryogenní technice. Pro dané zařízení se rozměry obrobku pohybují v rozmezí průměrů 3 mm až 135 mm. Elektronové zařízení je vyfoceno na Obr. 6.1.



Obr. 6.1 Elektronová svářečka MEBW 60/2 [7].

Schéma elektronové svářečky MEBW 60/2 použité při experimentálních průvarech je znázorněno na Obr. 6.2. Tab. 6.1 udává základní parametry zařízení. V následujících podkapitolách jsou popsány základní části skládající se z:

- elektronového děla,
- pracovní komory,
- manipulátoru,
- vakuového systému,
- zdroje vysokého napětí a řídicí elektroniky.



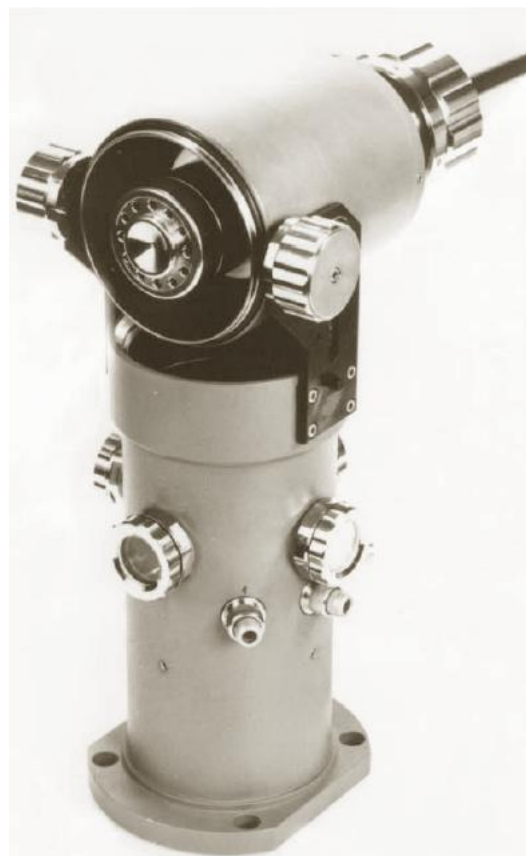
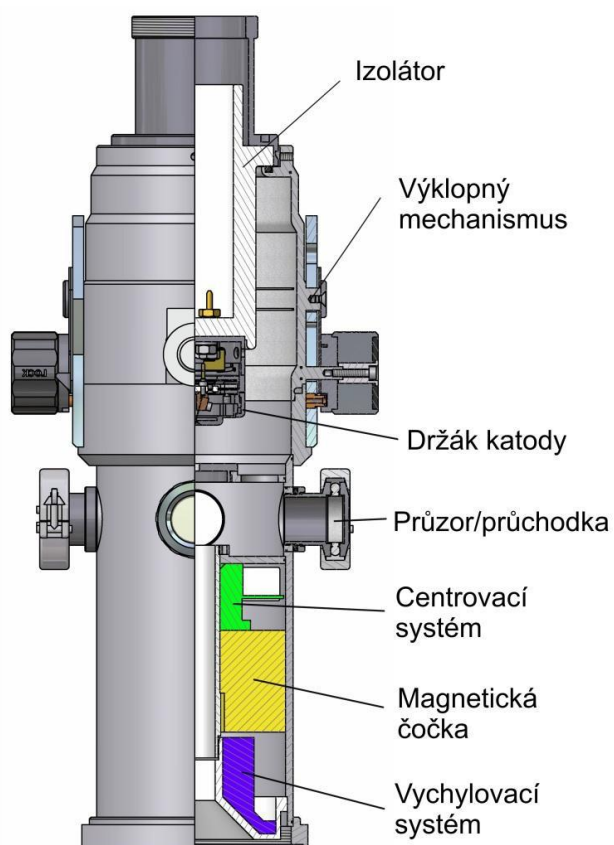
Obr. 6.2 Uspořádání fyzikální části a vakuového systému elektronové svářečky [7].

Tab. 6.1 Základní technické parametry svářečky MEBW 60/2 [6].

Parametr	Hodnota
Maximální urychlovací napětí	60 kV
Maximální proud svazku	33 mA při 60 kV 40 mA při 50 kV
Maximální výkon	2 kW
Velikost stopy (1mA)	< 0,1 mm
Maximální vychýlení paprsku	35°
Krok vychylování	6 μm
Proud žhavení katody	typ. 3,5 – 4,0 A
Hustota výkonu paprsku	typ. 10 <sup>4</sup> W.mm <sup>-2</sup>
Žhavicí příkon katody	10 - 16 W
Pracovní vzdálenost	50 – 220 mm
Pracovní vakuum	4x10 <sup>-4</sup> mbar
Čerpání / napouštění	2 min / 30 s

### 6.1.1 Elektronové dělo

Elektronové dělo jako kontrolovatelný zdroj elektronového svazku je základní součástí každého zařízení využívající elektronový svazek [28]. Elektronové dělo (Obr. 6.3) pracuje s urychlovacím napětím do 60 kV. Maximální výkon elektronového svazku je 2 kW. V následující části jsou popsány jeho hlavní prvky.



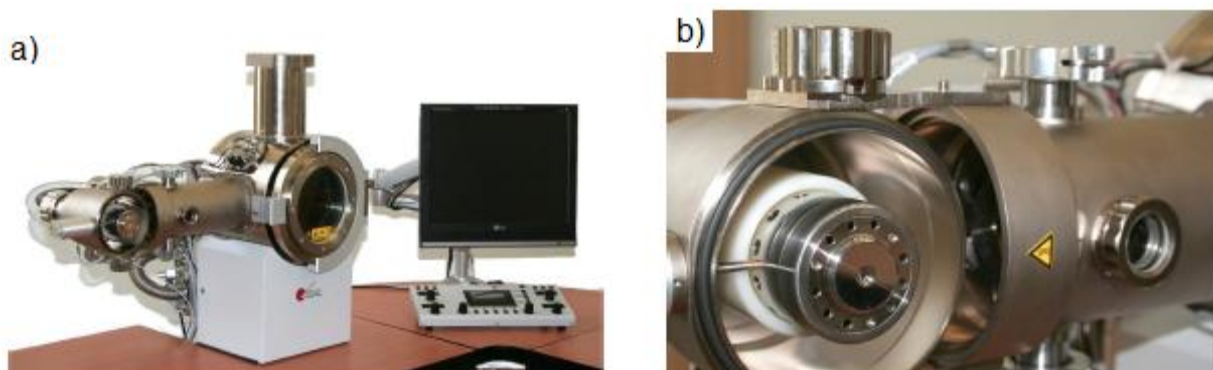
Obr. 6.3 Schéma elektronového děla svářečky MEBW 60/2 [7].

Zdrojem elektronů je přímo žhavená vlásenková katoda tvořená wolframovým drátem o průměru 0,15 mm ohnutého do tvaru písmene „V“ [29]. Životnost katody závisí na druhu provozu a je v rozmezí od 30 minut do 10 hodin [7]. Držák katody je sestaven tak, že s řídicí elektrodou (Wehneltův válec) tvoří jeden celek (Obr. 6.4).



Obr. 6.4 Držák katody s řídicí elektrodou [6].

Pro snadnou a rychlou výměnu katody je možné celou vysokonapěťovou část děla vysunout, pootočit o  $90^\circ$  a upevnit v pozici kolmé na osu elektronového děla (Obr. 6.5). Katodu je možné centrovat a výškově nastavovat vzhledem k otvoru ve Wehneltově válci [6]. Výškové nastavení je možné díky stavěcím šroubům. Pro přesné navedení svazku do optické osy lze celý zdroj elektronů vystředit vůči optické ose děla.



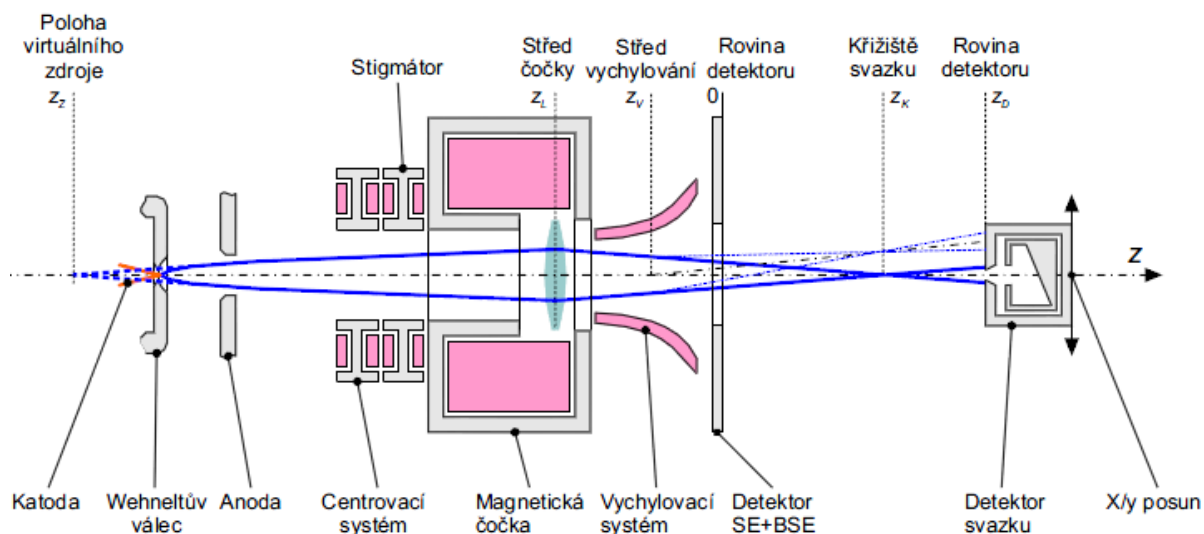
Obr. 6.5 a) Elektronové dělo, b) otevřený prostor katody s držákem katody a Wehneltovým válcem [7].

Elektronově-optický systém elektronového děla (Obr. 6.6) se skládá ze tří částí:

- magnetická čočka,
- jednostupňový magnetický centrovací systém,
- jednostupňový magnetický vychylovací systém.

Pár centrovacích cívek vytváří příčné magnetické pole v osách **X** a **Y**. Řízením proudu v těchto cívkách je možné vyrovnávat odchylky svazku vůči optické ose. Magnetická fokusační čočka umožňuje zaostřit svazek do prostoru pracovní komory a měnit plošnou hustotu výkonu. Vychylovací cívky umožňují vychýlení svazku v osách **X** a **Y** až o  $18^\circ$  od osy děla.

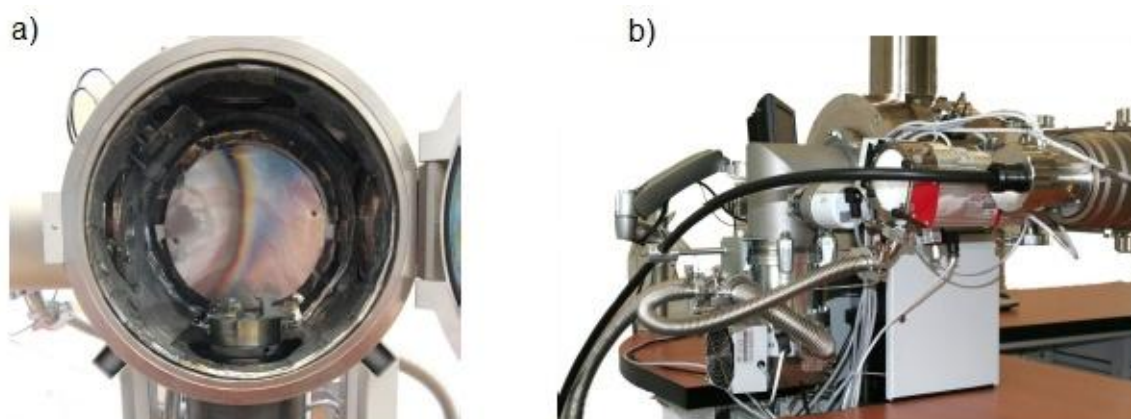
Ve svářečce jsou použity upravené vychylovací cívky původně určené pro televizní přijímače. Jde o kombinaci sedlových vzduchových cívek pro jeden směr vychylování a toroidní cívky s feritovým jádrem pro druhý směr [7].



Obr. 6.6 Schéma optické soustavy elektronového děla [7].

### 6.1.2 Pracovní komora a vakuový systém

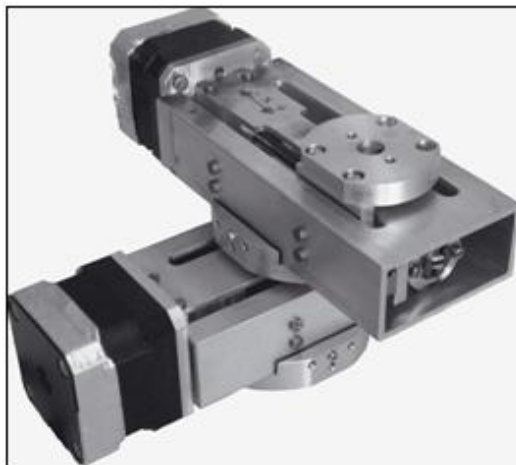
Pracovní komora (Obr. 6.7a) je tvořena válcem o vnitřním průměru 235 mm a délce 155 mm s vnitřním objemem 7 l. Je opatřena čtyřmi většími přírubami pro montáž elektronového děla, manipulátoru nebo případné rozšíření komory. Kromě toho je opatřena ještě dvěma přírubami, které jsou určeny pro vakuové průchodky nebo průzor. Elektronové dělo je běžně montováno na bok (svařování rotačních součástí) nebo shora. V případě experimentálních průvarů bylo elektronové dělo namontováno z boku. V předním odklopném víku je umístěn průzor s olovnatého skla pro pozorování procesu.



Obr. 6.7 Pracovní komora a vakuový systém MEBW 60/2: (a) pohled do vakuové pracovní komory, (b) vakuový systém (bez rotační vývěvy) [7].

Svářečka je opatřena manipulátorem umožňující rotaci a lineární pohyb v **Z** ose. Manipulátor je namontován z venku ve spodní části pracovní komory a nezmenšuje tak vnitřní prostor. Celkový rozsah pohybu manipulátoru je 120 mm, z toho 60 mm motoricky. Rychlost lineárního posuvu manipulátoru je plynule nastavitelná od 0 do  $3,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Otáčky jsou rovněž plynule regulovatelné od 0 do  $32 \text{ otáček}\cdot\text{min}^{-1}$ . V případě potřeby je možno do komory nainstalovat křížový x-y stolek (Obr. 6.8). Stolek je tvořen dvěma moduly o zdvihu 50 mm v obou směrech. Moduly jsou spojeny

tak, že je možné spojitě nastavit úhel mezi nimi. Základní krok posuvu je  $2 \mu\text{m}$  s maximální rychlostí  $2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , nosnost stolku je  $4 \text{ kg}$  [30].



Obr. 6.8 Křížový stolek [30].

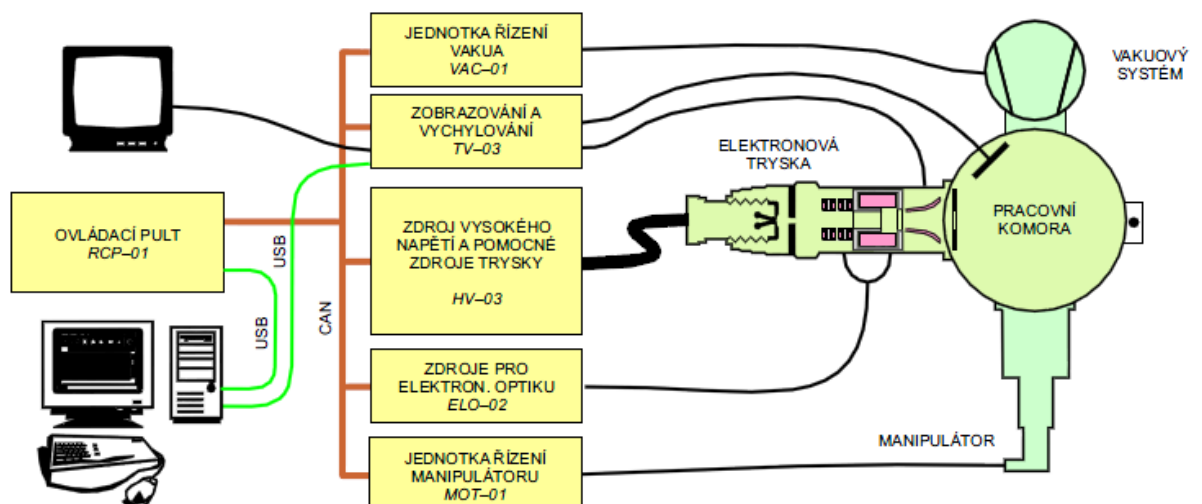
Vakuový systém (Obr. 6.7b) se skládá z turbomolekulární vývěvy zajišťující vakuum v pracovní komoře a elektronovém děle. Předvakuum je řešeno pomocí rotační vývěvy. Pracovního tlaku  $4\cdot 10^{-4}$  mbar je dosaženo zhruba po 2 minutách. Měření vakua a řízení čerpání je realizováno kombinovanou měrkou Pirani/Penning.

### 6.1.3 Elektronická část

Elektronická část je rozdělena do několika modulů:

- zdroj vysokého napětí,
- řízení vakua,
- řízení manipulátoru,
- řízení elektronově optické části,
- zobrazovací a vychylovací jednotka,
- ovládací panel.

Napojení na fyzikální část je schematicky znázorněné na Obr. 6.9.



Obr. 6.9 Blokové schéma řízení elektronové svářečky MEBW 60/2 [7].

Vzájemnou komunikaci jednotek elektroniky zajišťuje sériová sběrnice standardu CAN 2.0 [31]. Protokol CAN 2.0 je velmi robustní, odolný proti chybám při přenosu, a to i v podmínkách, které panují u elektronové svářečky (poměrně velké výkony, občasné výboje vysokého napětí, apod.). Veškeré řízení je dálkové, a tak jednotlivé jednotky (kromě VN zdroje) neobsahují žádné ovládací prvky na čelních panelech s výjimkou síťového vypínače [7].

### Zdroj vysokého napětí

Zdroj (Obr. 6.10) slouží k vytvoření urychlujícího pole elektronového děla. Konkrétní zdroj (HV-03) o maximálním výkonu 2 kW je plynule regulovatelný od nuly do maximálního napětí 60 kV. Maximální výstupní proud je 40 mA.



Obr. 6.10 Zdroj vysokého napětí [7].

### Jednotka řízení vakua

Jednotka řízení vakua ovládá prvky vakuové systému a zajišťuje měření a vyhodnocování tlaku v elektronovém děle. Stará se o spouštění a vypínání jednotlivých vakuových komponent ve správném pořadí a ve vhodný okamžik tak, aby čerpací (či zavzdušňovací) proces probíhal co nejrychleji, ale přitom bezpečně. Jejím úkolem je také blokovat činnost dalších jednotek v případě, že vakuové podmínky neumožňují provoz zařízení [7].

### Jednotka řízení elektronové optiky

Zdroj napájí magnetickou čočku a centrovací systém. Jednotka je vybavena numericky řízenými proudovými zdroji. Pro magnetickou čočku je využit spínaný zdroj, který se obejde bez nuceného chlazení. Zdroj pro centrovací systém je dvojité bipolární lineární proudový zdroj.

### Jednotka řízení manipulátoru

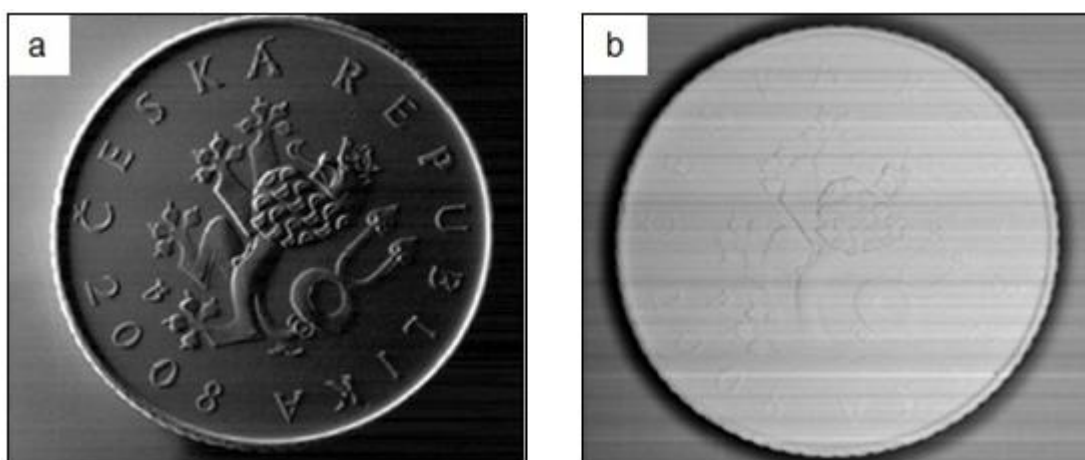
Jednotka řízení je víceosý pohybový kontrolér k řízení stejnosměrných a krokových motorů. Odměrování polohy je realizováno pomocí optických enkodérů (snímač, který převádí úhlovou polohu nebo pohyb hřídele do digitálního kódu) umístěných na hřídeli motoru. Umožňuje práci v režimech [7]:

- režim volného běhu motoru – osa běží konstantní rychlostí zadaným směrem,
- režim polohování – osa je přesunuta z aktuální pozice na nově zadanou pozici, během přesunu se osa pohybuje podle zadaného rychlostního profilu.

### Zobrazovací a vychylovací systém

Zobrazovací a vychylovací jednotka je centrum vychylování svazku a zpracování signálu z detektorů zpětně odražených a sekundárně emitovaných elektronů [7].

Zobrazovací systém využívá principu rastrovacího elektronového mikroskopu (dále jen REM) pro vytvoření obrazu součástky na obrazovce (Obr. 6.11). Rozlišení je dáno velikostí stopy elektronové svazku, která je kolem 0,1 mm při proudu svazku 0,1 A. Základní boční detektor snímá součástku přibližně pod úhlem 45°. Tvoří ho pouze snímací elektroda, kterou lze přímo měřit proud elektronů. Druhý osový detektor je umístěn v ose elektronového děla. Umožňuje zobrazit i oblasti součásti uvnitř dutiny ležící v ose elektronového svazku. Oproti bočnímu detektoru má obraz součásti horší topografii povrchu.



Obr. 6.11 Zobrazení pomocí (a) bočního detektoru a (b) osového detektoru [7].

### Ovládací panel

Ovládací panel (Obr. 6.12) je jednotka, která zajišťuje uživatelské rozhraní. Prostřednictvím panelu se dají nastavovat provozní hodnoty jako například velikost urychlovacího napětí, proud svazku, stav vakuového systému a další, které jsou zobrazeny pomocí grafického displeje. K ovládání slouží sada tlačítek a otočných voličů po stranách displeje. Funkce jednotlivých tlačítek se volí podle potřeby. Ve výchozím nastavení ovládají nejpoužívanější funkce.



Obr. 6.12 Ovládací panel svářečky EMBW 60/2 a grafický displej [6].



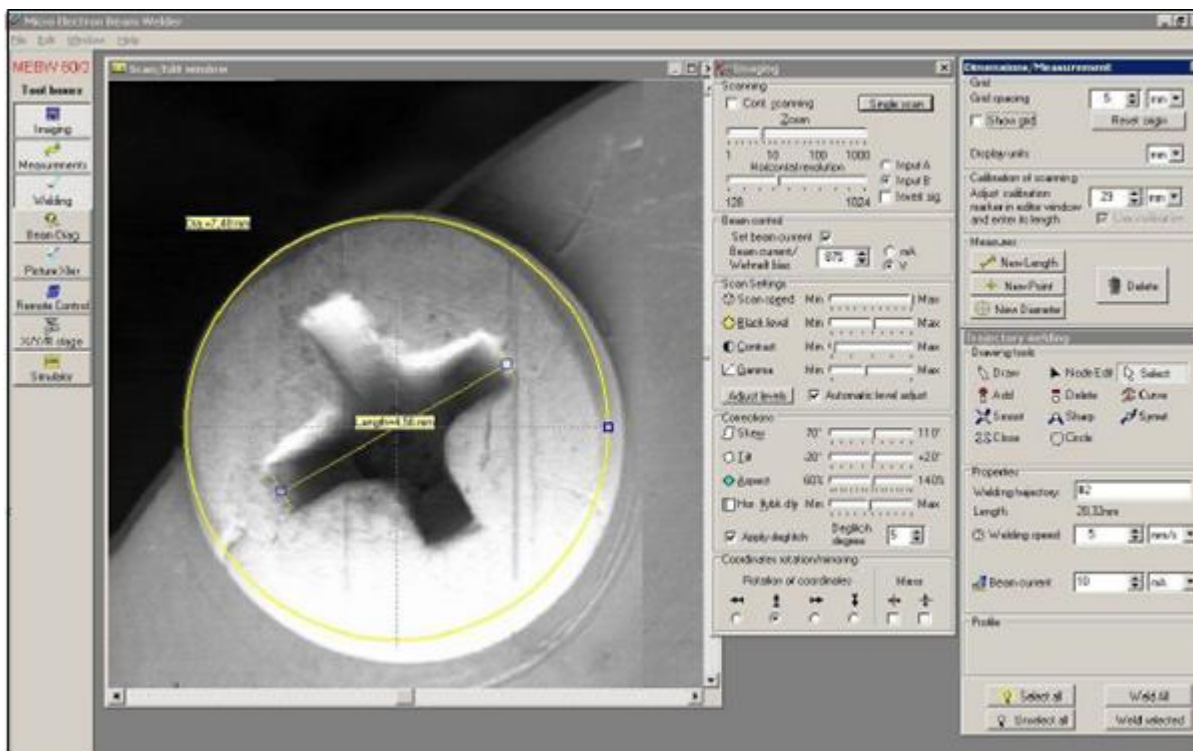
### 6.1.4 Software

Svářečku lze řídit pomocí zmíněného ovládacího panelu nebo z osobního počítače. Jednotlivé řídicí jednotky si vyměňují informace mezi sebou a nadřazeným ovládacím panelem po sběrnici CAN.2.0 [31]. Ovládací panel funguje jako prostředník mezi touto sítí a osobním počítačem. Řízení počítačem spolu se speciálním programem umožňuje řídit místo dopadu svazku podle požadavků uživatele.

Komunikaci s hardwarem zajišťuje program DACPATH. Uživatelské rozhraní je na Obr. 6.13. Program disponuje jednak grafickým uživatelským rozhraním, ale i softwarovým rozhraním pro komunikaci mezi aplikacemi typu DDE (Dynamic Data Exchange) [32]. Program se skládá z několika následujících modulů [7]:

- svařování po zadané křivce (Welding),
- snímání obrazu (Imaging),
- diagnostika svazku (BeamDiag),
- diagnostika vychylovacího systému (DeflDiag),
- odměřování (Measurements),
- přenos grafiky (Picture Transfer),
- dálkové ovládání (Remote Control) a
- simulátor vychylování svazku (Simulator).

V případě potřeby uvádí podrobný popis jednotlivých modulů ve své disertační práci Zobač M. [7].



Obr. 6.13 Snímek uživatelského rozhraní PC software svářečky EMBW 60/2 [7].

## 6.2 Ocel AMS 5659

Při provedení experimentu je použita ocel AMS 5659 ve vytvrzeném stavu (H1025) a po rozpouštěcím ohřevu. Ocel AMS 5659 je nízkouhlíková precipitačně vytvrzitelná korozivzdorná martenzitická ocel. Chemické složení a mechanické vlastnosti udává Tab. 6.2 a 6.3. Různé stupně vytvrzení udává Tab. 6.4.

Ocel obsahuje přibližně 3 % Cu a je vytvrzena precipitací vysoce disperzních částic Cu v martenzitické matici. Teorie precipitace je založena na předpokladu, že proces precipitace v oceli je stejný jako u systému Fe-Cu a Fe-Cu-X slitin. Precipitace začíná už mezi teplotami 450 – 480 °C tvorbou koherentních klastrů bohatých na Cu, které při dlouhodobém vytvrzení transformují na FCC precipitáty [33, 34, 35].

Tab. 6.2 Chemické složení oceli AMS 5659 [36, 37]

Prvek	Předepsané složení [hm. %]	Naměřené složení [hm. %]
<b>C</b>	max. 0,07	0,03
<b>Mn</b>	max. 1,00	0,40
<b>Si</b>	max. 1,00	0,43
<b>Mo</b>	max. 0,05	0,15
<b>P</b>	max. 0,030	0,009
<b>S</b>	max. 0,015	0,002
<b>Cr</b>	14,0 - 15,5	14,5
<b>Ni</b>	3,50 - 5,50	4,1
<b>Nb</b>	0,15 - 0,45	0,25
<b>Cu</b>	2,50 - 4,50	2,8

Tab. 6.3 Mechanické vlastnosti oceli AMS 5659 [36, 37].

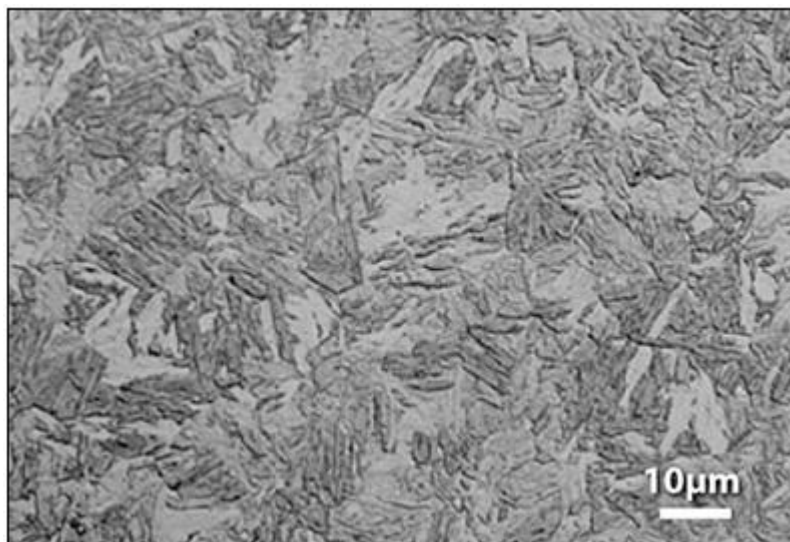
Vytvrzený stav	Tvrdość HB	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnosť $A_5$ [%]	Kontrakce Z [%]
H900	388 - 444	1310	1172	10	35
<b>H1025</b>	<b>331 – 401</b>	<b>1069</b>	<b>1000</b>	<b>12</b>	<b>45</b>
H1075	311 – 375	1000	862	13	45
H1150	277 – 352	931	724	16	50

Tab. 6.4 Parametry tepelného zpracování oceli AMS 5659 [36, 37].

Stav	Teplota [°C]	Čas [hod.]	Prostředí
H900	482 ± 6	1	vzduch
<b>H1025</b>	<b>552 ± 6</b>	<b>4</b>	<b>vzduch</b>
H1075	579 ± 6	4	vzduch
H1150	621 ± 6	4	vzduch
<b>Rozpouštěcí ohřev</b>	<b>1040 ± 15</b>	<b>0,5 – 1</b>	<b>olej/vzduch</b>

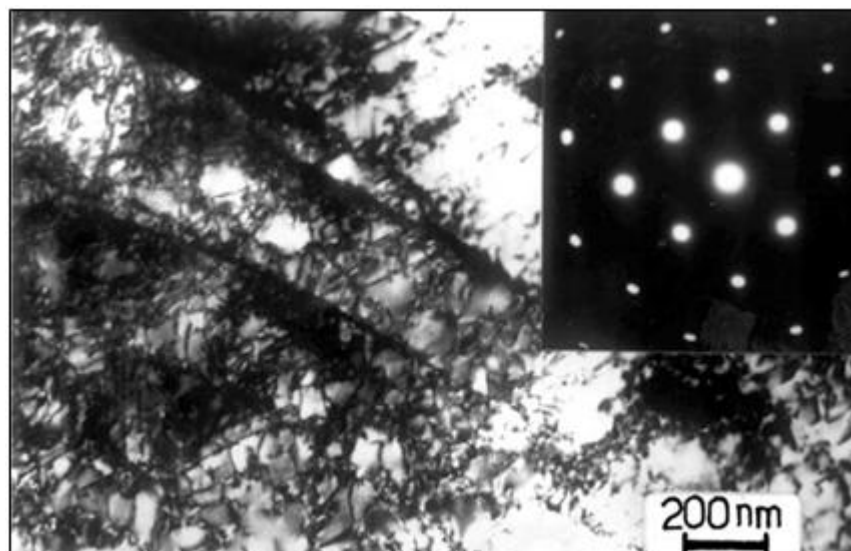
### 6.2.1 Materiál v „zakaleném“ stavu

Teplota počátku martenzitické transformace ( $M_s$ ) se pohybuje kolem  $105\text{ }^\circ\text{C}$ , proto se snadno dosáhne martenzitické struktury [21]. U nízkouhlíkových ocelí obvykle vzniká laťkový martenzit (Obr. 6.14). Jednotlivé laťky jsou paralelně orientovány s typickým rovinným fázovým rozhraním, které pak tvoří individuální skupiny, tzv. pakety [38]. Jednotlivé laťky jsou odděleny nízkouhlíkovými hranicemi. Austenit je obvykle vyloučen v tenkých oblastech mezi laťkami.



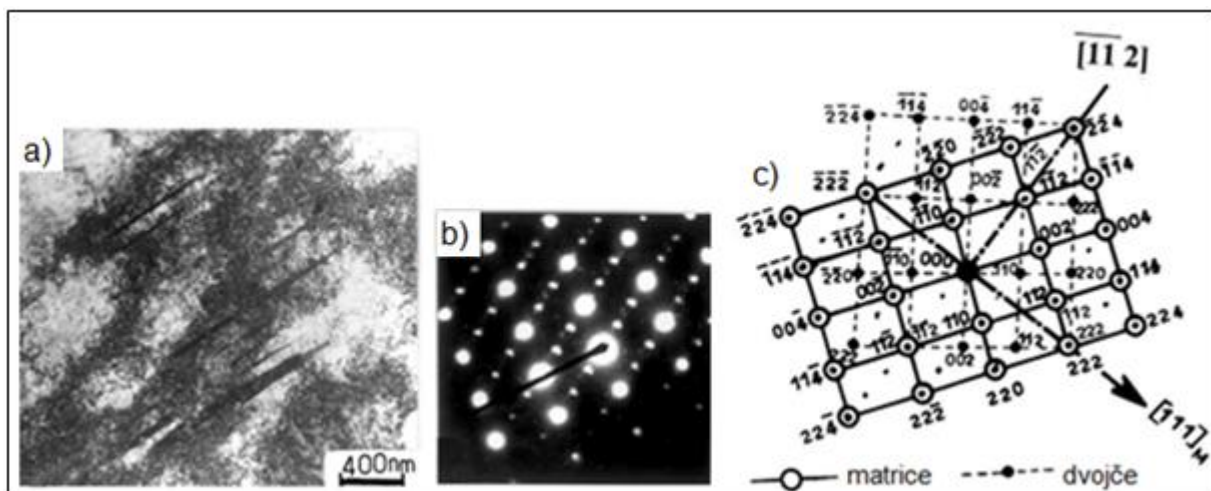
Obr. 6.14 Mikrostruktura laťkového martenzitu [39].

V případě oceli AMS 5659 je také mikrostruktura tvořena laťkovým martenzitem s vysokou hustotou dislokací (Obr. 6.15) Tento martenzit má BCC strukturu.

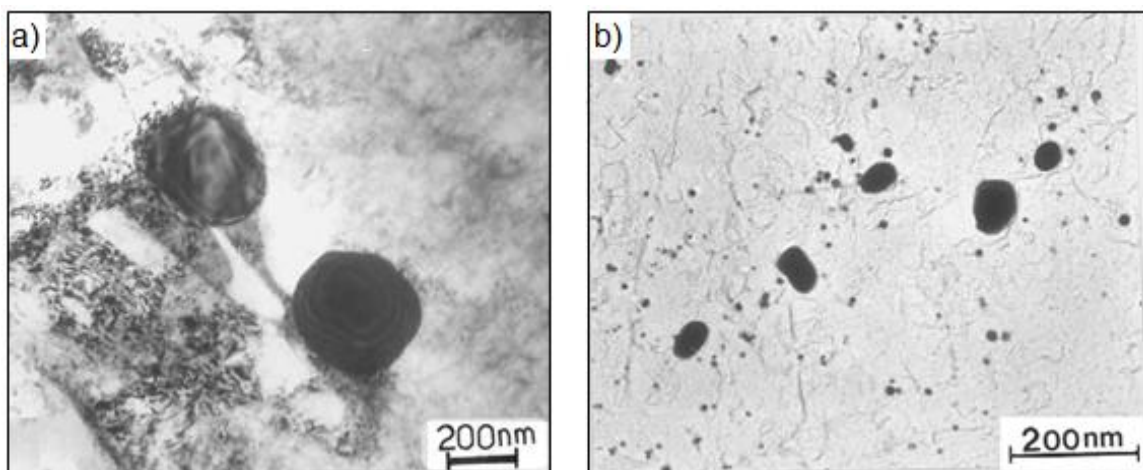


Obr. 6.15 Substruktura laťkového martenzitu [40].

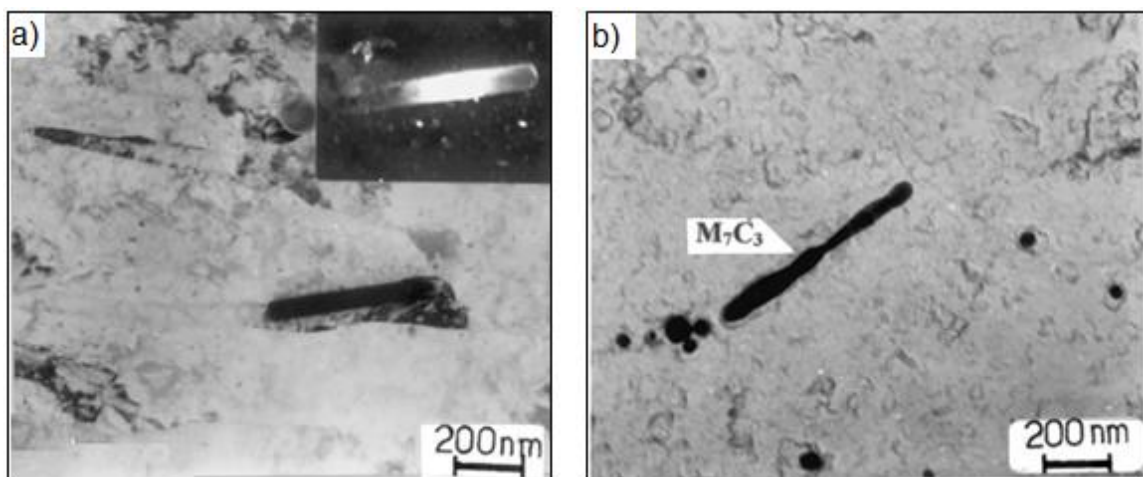
Místy jsou pozorovány mezi laťkami mikrodvojčata (Obr. 6.16) [40]. Také jsou v laťkovém martenzitu identifikovány dva typy kulových karbidů Nb o velikosti 5 nm (Obr. 6.17). První typ NbC obsahuje 87% Nb a druhý typ obsahuje 53% Nb. Analýzy ukazují, že oba precipitáty Nb mají FCC mřížku. Občas jsou pozorovány šestihrané částice bohaté na Cr typu  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (Obr. 6.18).



Obr. 6.16 (a) Dvojčata v laťkovém martenzitu, (b) difrakce znázorňující přítomnost dvojité difrakční stopy, (c) schematické znázornění [40].



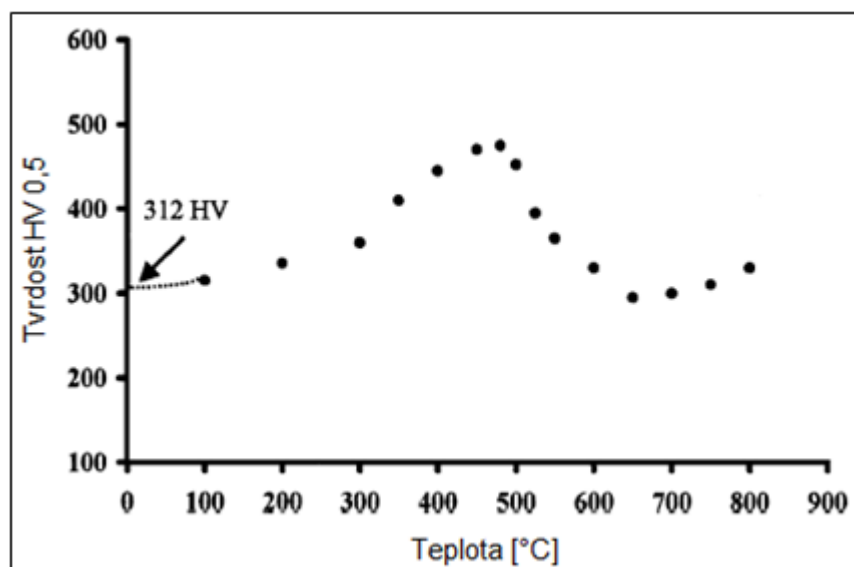
Obr. 6.17 (a) Karbidy NbC v martenzitu, (b) Karbidy NbC z extrakční repliky [40].



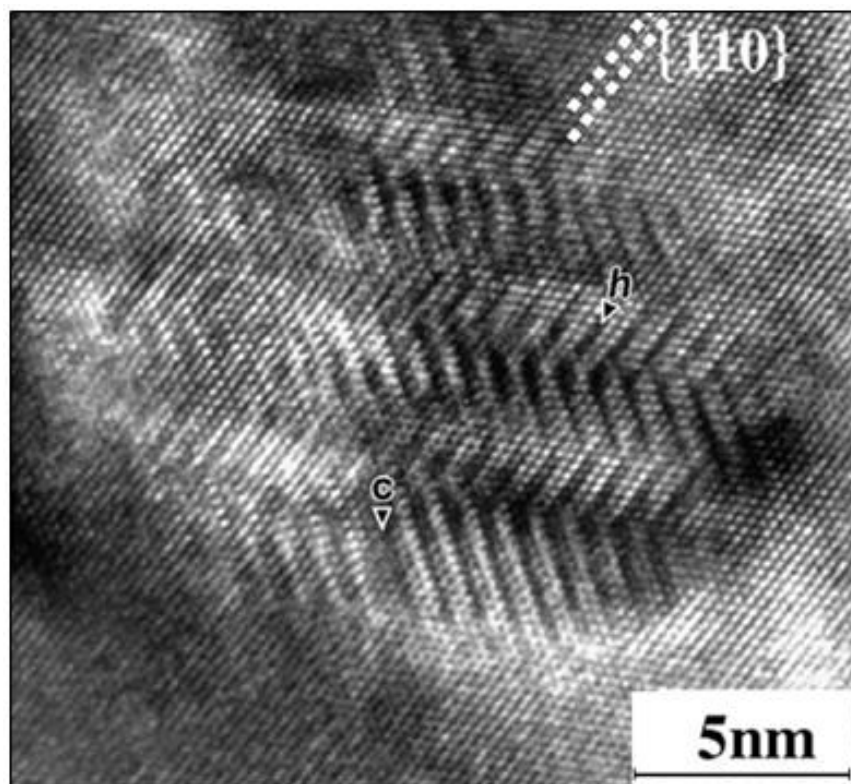
Obr. 6.18 (a) Karbidy  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  v martenzitu, (b) Karbidy  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  z extrakční repliky [40].

### 6.2.2 Precipitace v průběhu vytvrzování

Měření mikrotvrdomosti HV 0,5 (Obr. 6.19) naznačuje, že se mohou vyskytovat dvě fáze precipitace. Vzorek vytvrzený při 480 °C a 2 hod. vykazuje přítomnost jemných precipitátů o velikosti 4 - 8 nm. Ve vzorku vytvrzeném při 500 °C a 2 hod je velikost precipitátů 4 - 12 nm, precipitát vykazuje charakteristický „herringbone“ vzor (Obr. 6.20) [34]. Při teplotách 450 – 470 °C se dosahuje maximální tvrdosti a pevnosti [35].

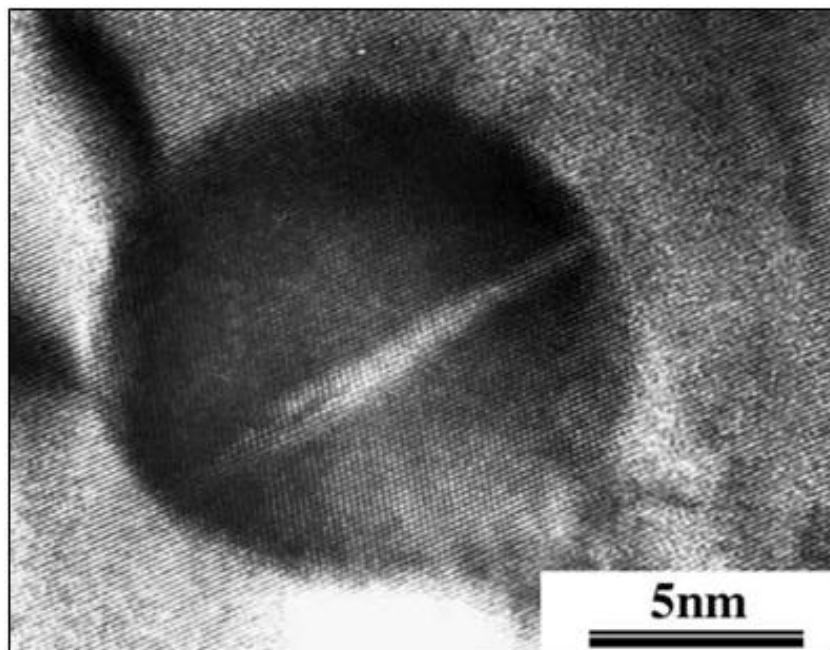


Obr. 6.19 Závislost tvrdosti na teplotě vytvrzení (čas vytvrzení 2 hod) [33].

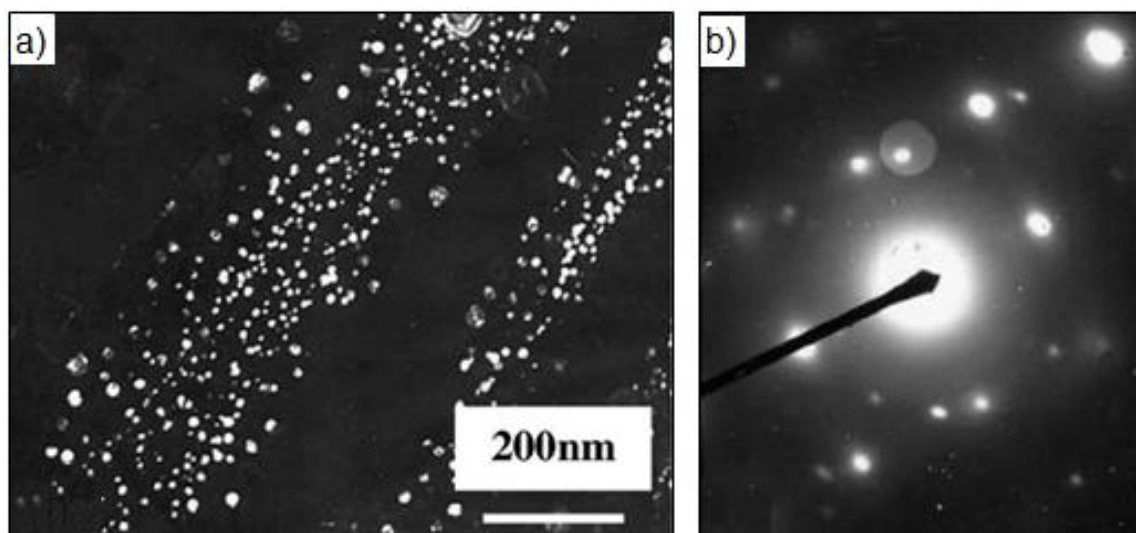


Obr. 6.20 Precipitáty Cu po vytvrzení na 500°C po 2 hodin [33].

Vytržení při vysokých teplotách (550 – 750 °C) je způsobeno vznikem kulovitých precipitátů bohatých na Cu, což potvrdila i EDS analýza. V tomto rozsahu teplot dochází k výraznému poklesu pevnosti a tvrdosti. Většina precipitátů se vyskytuje podél martenzitické fáze. Precipitáty mají kulovitý tvar s maximální velikostí 15 nm mající koherentní rozhraní s BCC matricí (Obr. 6.21). Elektronová difrakce prokázala, že precipitáty mají FCC strukturu (Obr. 6.22).



Obr. 6.21 Kulovitý precipitát Cu po vytvrzení na 650 °C [33]



Obr. 6.22 (a) Kulovitý tvar precipitátu po vytvrzení na 700°C po dobu 2 hod., (b) difrakční obraz kulovitého precipitátu s FCC symetrií [19].

Ocel je široce používána na součásti v jaderném, leteckém a námořním průmyslu. Tyto oceli mají vynikající mechanické vlastnosti, svařitelnost a odolnost proti korozi. Jsou dostupné v mnoha polotovarech jako dráty, plechy, výkovky, odlitky a práškové produkty [33, 34, 35].

### 6.3 Metodická část experimentu

Před provedením experimentu bylo nejdříve ověřeno chemické složení oceli AMS 5659 na spektrometru (Spectrumat GDS 750). Výsledné chemické složení odpovídá dané normě a je uvedeno v Tab. 6.2.

Následně bylo na elektronové svářečce MEBW 60/2 provedeno několik průvarů s rozdílnými parametry svařování, konkrétně šlo o různé rychlosti svařování při stálém zaostření svazku na povrch vzorku a různé zaostření svazku na vzorek při stejné rychlosti svařování. Podrobné parametry svařování jsou uvedeny v Tab. 6.5.

Jednotlivé průvary byly provedeny na oceli AMS 5659 ve vytvrzeném stavu H1025 a po rozpouštěcím ohřevu. Rozpouštěcí ohřev byl proveden při teplotě 1050°C po dobu 40 minut v peci LAC PP 45/65. Následné chlazení proběhlo do kalícího oleje TK22 (Paramo Pardubice) o teplotě 40°C.

Následovalo opětovné vytvrzení (stav H1025) vzorků v obou strukturních stavech s již provedenými průvary. Vytvrzení proběhlo při teplotě 550 °C po dobu 4 hodin s chladnutím na volném vzduchu, v souladu s danou normou.

Takto připravené vzorky v různých strukturních stavech s danými průvary byly dále zpracovány podle zavedených postupů pro přípravu metalografických výbrusů.

K hodnocení struktury a mikrostruktury v oblasti svarového kovu, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu byla využita světelná, elektronová rastrovací mikroskopie a bylo provedeno měření průběhu tvrdosti dle Vickerse.

Jednotlivé části experimentu jsou blíže popsány v následujících kapitolách.

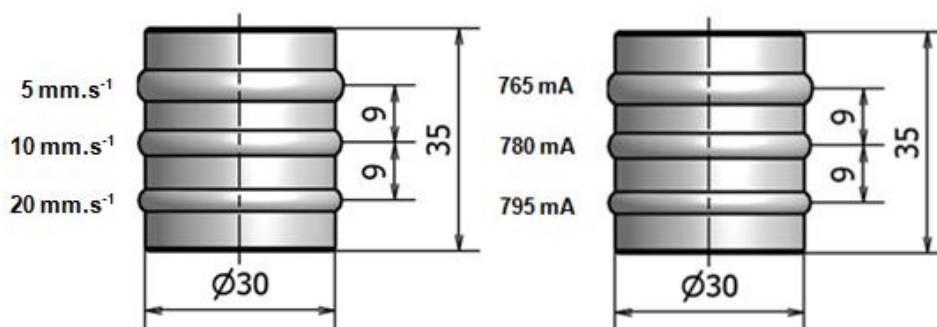
#### 6.3.1 Provedení průvarů

Provedení experimentu se realizovalo na svářečce MEBW 60/2. Jak už bylo řečeno v předchozí kapitole, na vlastnosti průvaru má vliv celá řada parametrů (urychlovací napětí, proud svazku, rychlost svařování, zaostření svazku a další). V případě experimentálních průvarů je studováno pouze zaostření svazku a rychlost svařování. Rozsah použitých parametrů je uveden v Tab. 6.5.

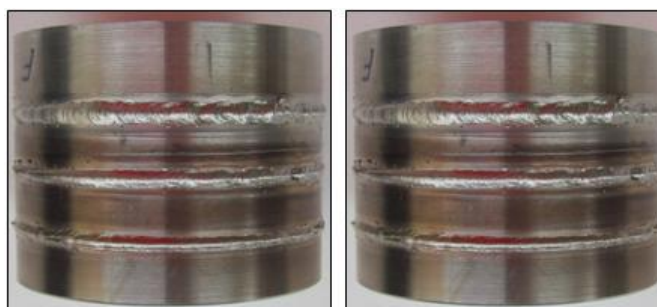
Tab. 6.5 Parametry elektronového svazku při experimentu.

Vzorek 1		Vzorek 2	
Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
Urychlovací napětí	60 kV	Urychlovací napětí	60 kV
Proud svazku	25 mA	Proud svazku	25 mA
Rychlost svařování	10 mm.s <sup>-1</sup>	Fokusační proud	780 mA
Fokusační proud	765 mA	Rychlost svařování	5 mm.s <sup>-1</sup>
	780 mA		10 mm.s <sup>-1</sup>
	795 mA		20 mm.s <sup>-1</sup>

V případě volby rychlostí svařování je svazek elektronů zaostřen na povrch vzorku. Zaostření svazku je stanoveno pokusně na pomocných vzorcích a v případě experimentu je hodnota fokusačního proudu 780 mA. Jestliže se mění zaostření svazku, nižší hodnota fokusačního proudu znamená zaostření pod povrch vzorku a naopak vyšší hodnota fokusačního proudu znamená zaostření nad povrch vzorku. Náčrt jednotlivých průvarů a provedené průvary jsou na Obr. 6.23 a Obr. 6.24.



Obr. 6.23 Náčrt provedení experimentálních průvarů.

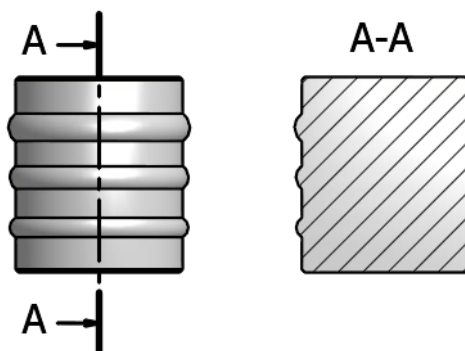


Obr. 6.24 Provedené experimentální průvary.

### 6.3.2 Příprava vzorků

Postup přípravy metalografických vzorků je shrnut do následujících kroků.

**Odebrání vzorků** proběhlo na rozbrušovací pile Discotom 2 fy. Struers za intenzivního chlazení tak, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorku. Vzorky byly odebrány kolmo na provedené průvary (Obr. 6.25).



Obr. 6.25 Náčrt odebrání vzorků a zalisované vzorky.

**Fixace vzorků** byla provedena na automatickém hydraulickém lisu (PR-4X fy. LECO) lisováním za tepla do lisovací hmoty (isofast a dentacryl v poměru 1:2,5). Lisování probíhalo za teploty 180°C po dobu 10 minut a konstantního tlaku 20 Mpa.

**Broušení vzorků** proběhlo za mokra na metalografické brusce (GPX 300 fy. LECO) na brusných papírech s odstupňovanou zrnitostí 120, 220, 320, 600, 1200 v 3 minutových intervalech rychlostí 250 ot/min.

**Mechanické leštění** se provádělo na stejném zařízení jako broušení pomocí 3  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  leštící diamantové pasty nanesené na leštícím plátně. Leštění probíhalo v 4 minutových intervalech rychlostí 150 ot/min s použitím lihu.

**Leptání vzorků**, k vyvolání struktury svarového spoje bylo použito leptadlo Vilella – Bain (0,6 % kyselina pikrová; 5,0 % HCl; 94, 4 % ethanol).



### 6.3.3 Měření mikrotvrdoti

Zkouška tvrdosti dle Vickerse je pro kovové materiály stanovena evropskou normou ČSN EN ISO 6507-1. Zkouška je rozdělena podle zkušebního zatížení do tří oblastí (Tab. 6.6).

Tab. 6.6 Tvrdot dle Vickerse - oblasti zkušebního zatížení pro kovové materiály [5].

Oblast zkušebního zatížení, $F$ [N]	Symbol tvrdosti	Předchozí označení (ISO 6507-1:1982)
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse.
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až $< HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení.
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až $< HV 0,2$	Zkouška mikrotvrdoti dle Vickerse.

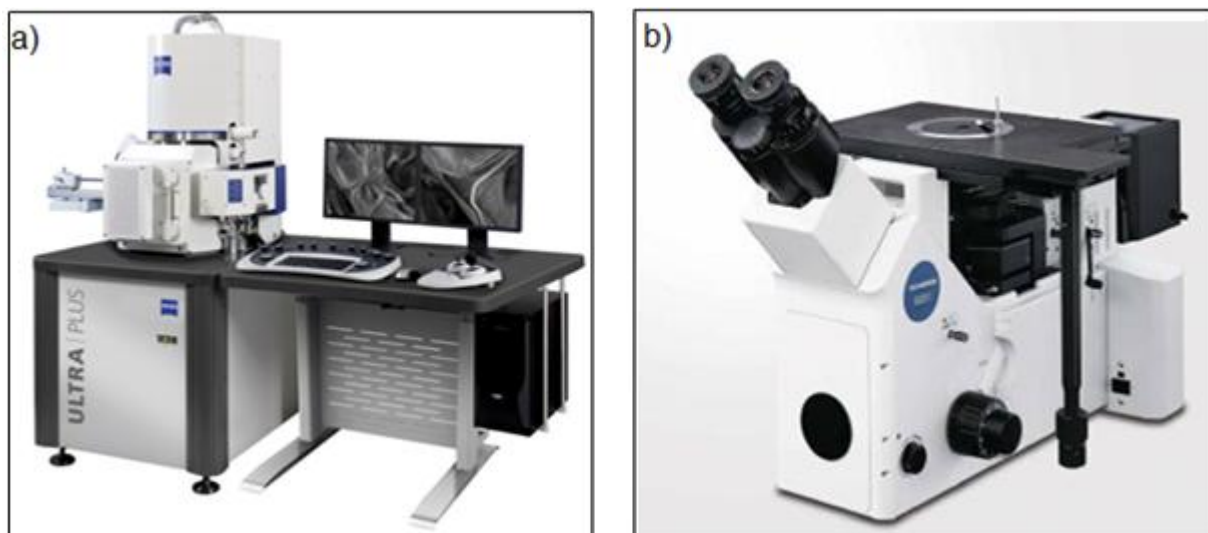
Hodnocení tvrdosti se provedlo na automatickém mikrotvrdoměru LM 247AT s CCD kamerou pomocí programu LECO AMH 2000. Při zkoušce bylo použito nízké zatížení HV 0,2. Jako indentor byl použit Vickers. Doba vtisku včetně odlehčení byla 10 sekund. Vzdálenost jednotlivých vtisků byla 150  $\mu\text{m}$ . Během zkoušky se použilo zvětšení 100x.

### 6.3.4 Světelná mikroskopie

Naleptané struktury průvarů byly pozorovány a dokumentovány na světelném mikroskopu Olympus GX-51 (Obr. 6.13b) s digitální kamerou při celkovém zvětšení 50x, 200x a 500x.

### 6.3.5 Rastrovací elektronová mikroskopie

Mikrostruktura byla pozorována na rastrovacím elektronovém mikroskopu Zeiss Ultra Plus s autoemisním zdrojem (Obr. 6.13a), který je rozšířen o analyzátoři chemického složení (EDS, WDS) a dále o fázovou analýzu pomocí difrakce zpětně rozptýlených elektronů (EBSD).



Obr. 6.26 (a) Elektronový rastrovací mikroskop Zeiss Ultra plus [43], (b) světelný mikroskop Olympus GX-51 [42].

## 7 VÝSLEDKY ZKOUŠEK A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

### 7.1 Vliv parametrů svařování na geometrii průvaru

Pro praktické využití svařování elektronovým svazkem je nutné zjistit vliv významných parametrů svazku na tvar a rozměry výsledného průvaru. V této kapitole je popsán vliv rychlosti svařování a zaostření svazku. Vzhledem k tomu, že se tvary a rozměry průvarů provedených na oceli AMS 5659 ve vytvrzeném stavu a po rozpouštěcím ohřevu téměř nelišily, je hodnocení vlivu parametrů svařování na geometrii svaru provedeného na oceli ASM 5659 ve vytvrzeném stavu H1025.

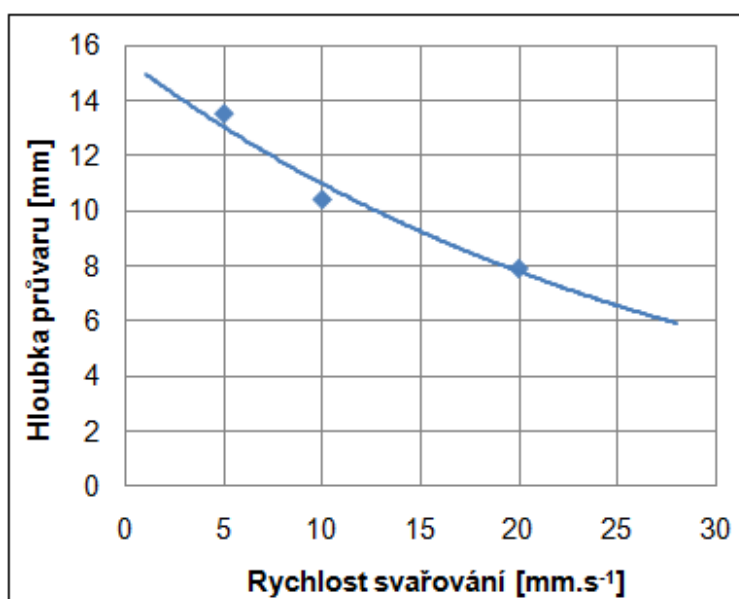
#### 7.1.1 Rychlost svařování

K ověření závislosti tvaru a rozměru průvaru na rychlosti svařování je provedeno několik průvarů s měnící se rychlostí svařování při stejném urychlovacím napětí a fokusačním proudu. Zaostření svazku je na povrch součásti. Výchozí hodnoty rychlosti svařování a další parametry svařování použité v experimentu jsou uvedeny v Tab. 7.1

Tab. 7.1 Parametry elektronového svazku při experimentu.

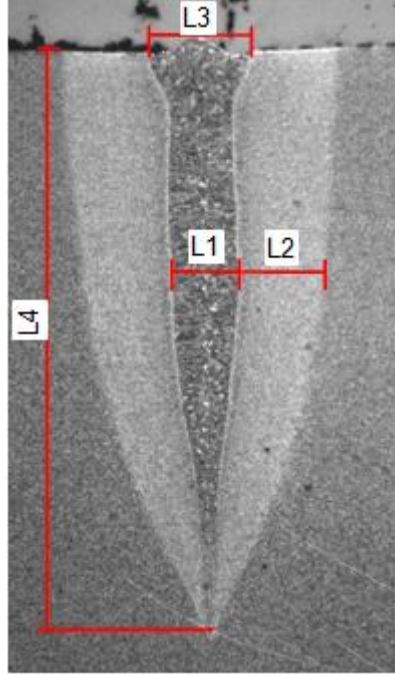
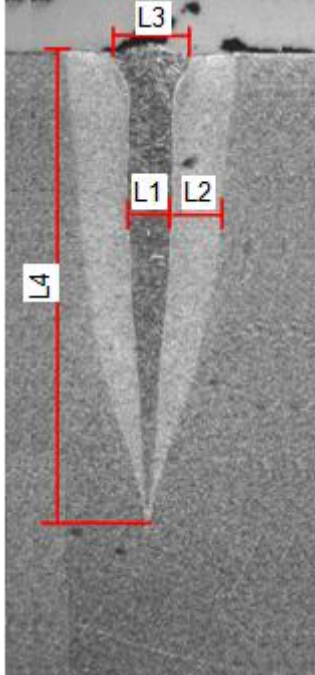
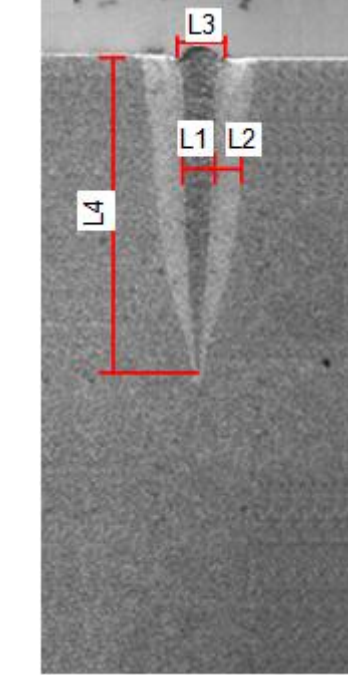
Parametry svazku	Hodnoty
Urychlovací napětí $U_B$	60 kV
Proud svazku $I_s$	25 mA
Fokusační proud $I_f$	780 mA
Rychlost svařování $v_s$	5 mm.s <sup>-1</sup>
	10 mm.s <sup>-1</sup>
	20 mm.s <sup>-1</sup>

Graf na Obr. 7.1 znázorňuje hodnoty hloubky průvarů v závislosti na rychlosti svařování. Tab. 7.2 udává rozměry průvaru v závislosti na měnící se rychlosti svařování.



Obr. 7.1 Závislost hloubky průvaru na rychlosti svařování.

Tab.7.2 Hodnoty rozměrů průvarů pro různé rychlosti svařování.

Rozměry průvaru na oceli ve vytvrzeném stavu H1025		
Parametry svařování:	Parametry svařování:	Parametry svařování:
$I_s = 25 \text{ mA}$ $U_B = 60 \text{ kV}$ $I_F = 780 \text{ mA}$ $v_s = 5 \text{ mm.s}^{-1}$	$I_s = 25 \text{ mA}$ $U_B = 60 \text{ kV}$ $I_F = 780 \text{ mA}$ $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$	$I_s = 25 \text{ mA}$ $U_B = 60 \text{ kV}$ $I_F = 780 \text{ mA}$ $v_s = 20 \text{ mm.s}^{-1}$
		
L1 =1,7 mm    L3 =1,6 mm L2 =2,5 mm    L4 =13,5 mm	L1 =0,9 mm    L3 =1,8 mm L2 =0,9 mm    L4 =10,4 mm	L1 =0,7 mm    L3 =1,2 mm L2 =0,6 mm    L4 =7,9 mm

Z grafu a tabulky je zjevné, že s rostoucí rychlostí svařování klesá hloubka i šířka průvarů a tepelně ovlivněné oblasti. Z profilu závislosti hloubky průvaru na rychlosti svařování je také vidět, že hloubka průvaru neklesá s rostoucí rychlostí svařování lineárně, ale mnohem pomaleji.

### 7.1.2 Zaostření svazku

K ověření závislosti tvaru a rozměru průvaru na fokusačním proudu (zaostření svazku) je provedeno několik průvarů s měnícím se fokusačním proudem při stejném urychlovacím napětí a rychlosti svařování.

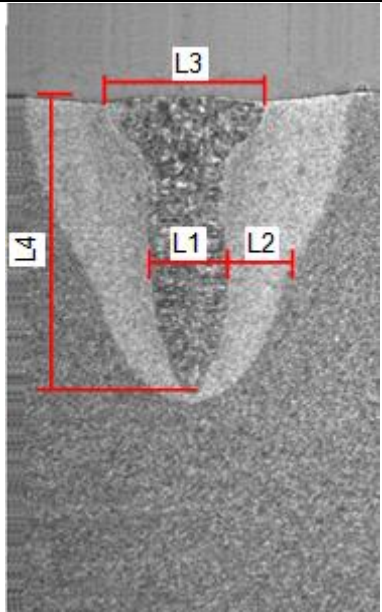
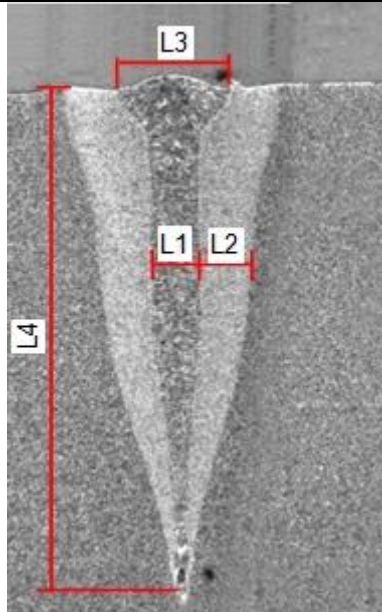
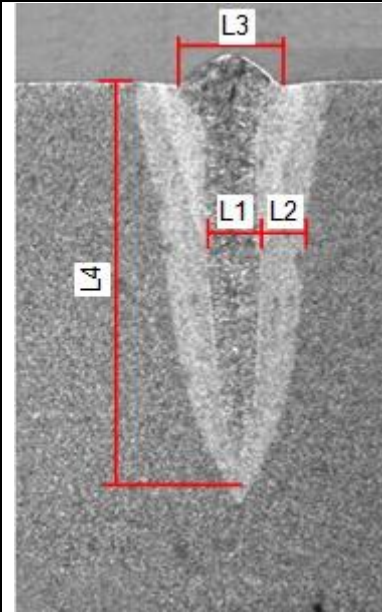
Fokusační proud, při kterém je svazek nejužší, odpovídá proudu, při kterém je svazek zaostřen na povrch vzorku. Výchozí hodnoty fokusačního proudu a další parametry svařování použité v experimentu jsou uvedeny v Tab. 7.3.

Tab. 7.3 Parametry elektronového svazku při experiment.

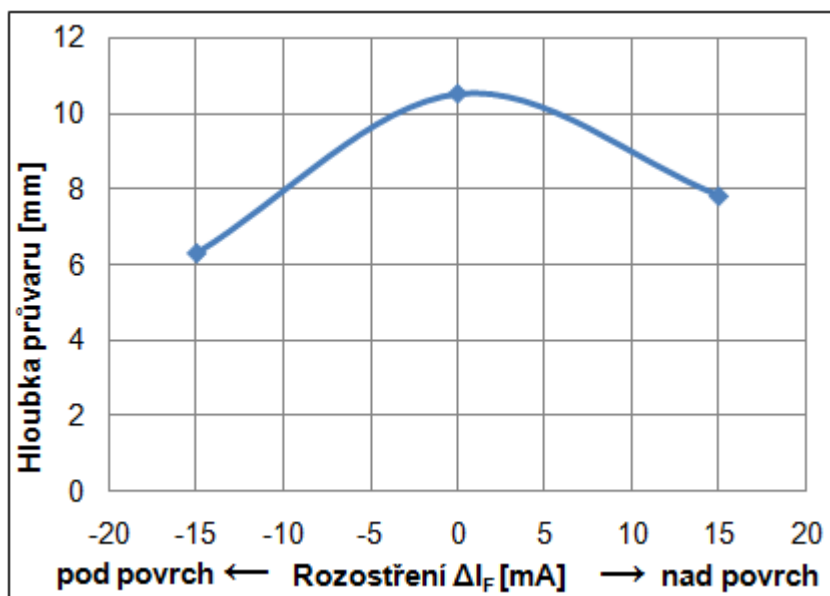
Parametry svazku	Hodnoty
Urychlovací napětí $U_B$	60 kV
Proud svazku $I_s$	25 mA
Rychlost svařování $v_s$	$10 \text{ mm.s}^{-1}$
Fokusační proud $I_F$	765 mA
	780 mA
	795 mA

Graf na Obr. 7.2 znázorňuje hodnoty hloubky průvarů v závislosti na odchylce fokačního proudu  $\Delta I_F$  od výchozí hodnoty (tzv. defokusace). Záporná hodnota fokačního proudu  $I_F$  znamená zaostření pod povrch, kladná nad povrch vzorku. Tab. 7.4 udává rozměry průvaru v závislosti na měnícím se zaostření svazku.

Tab. 7.4 Hodnoty rozměrů průvarů pro různé zaostření svazku.

Rozměry průvaru na oceli ve vytvrzeném stavu H1025		
Parametry svařování:	Parametry svařování:	Parametry svařování:
$I_s = 25 \text{ mA}$ $U_B = 60 \text{ kV}$ $I_F = 765 \text{ mA}$ $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$	$I_s = 25 \text{ mA}$ $U_B = 60 \text{ kV}$ $I_F = 780 \text{ mA}$ $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$	$I_s = 25 \text{ mA}$ $U_B = 60 \text{ kV}$ $I_F = 795 \text{ mA}$ $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$
		
L1 = 1,3 mm    L3 = 2,2mm L2 = 2,3mm    L4 = 6,3mm	L1 = 1,0 mm    L3 = 1,8 mm L2 = 0,9 mm    L4 = 10,5 mm	L1 = 1,1 mm    L3 = 1,0 mm L2 = 1,0 mm    L4 = 7,8 mm

Z naměřených hodnot vyplývá, že průvar o maximální hloubce a minimální šířce vzniká v případě malých průvarů (do 10 mm) při svazku zaostřeném na povrch. Oproti hloubce průvaru se jeho šířka s měnícím se zaostřením výrazně nemění.



Obr. 7.2 Závislost hloubky průvaru na rozostření svazku.

## 7.2 Vliv parametrů svařování na defekty v průvaru

Defekty v průvaru mohou být ovlivněny řadou parametrů svařování, v této práci je posouzen vliv rychlosti svařování a zaostření svazku. Vzhledem k tomu, že se defekty v průvaru u oceli AMS 5659 ve vytvrzeném stavu a po rozpouštěcím ohřevu téměř nelišily, je hodnocení provedeno na oceli ASM 5659 ve vytvrzeném stavu H1025.

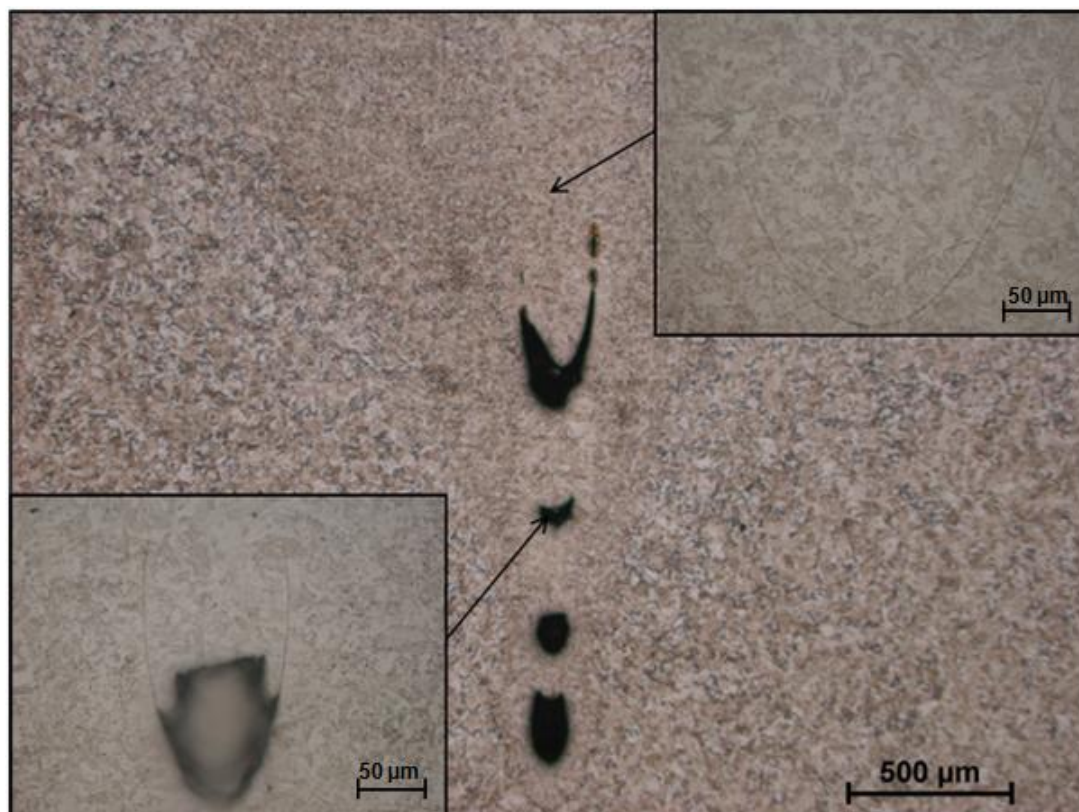
### 7.2.1 Vliv rychlosti svařování

K ověření vlivu rychlosti svařování na vznik defektů v průvaru je provedeno několik průvarů s měnící se rychlostí svařování, při stejném urychlovacím napětí a fokusačním proudu. Zaostření svazku je na povrch součástí. Výchozí hodnoty rychlosti svařování a další parametry jsou uvedeny v Tab. 7.5.

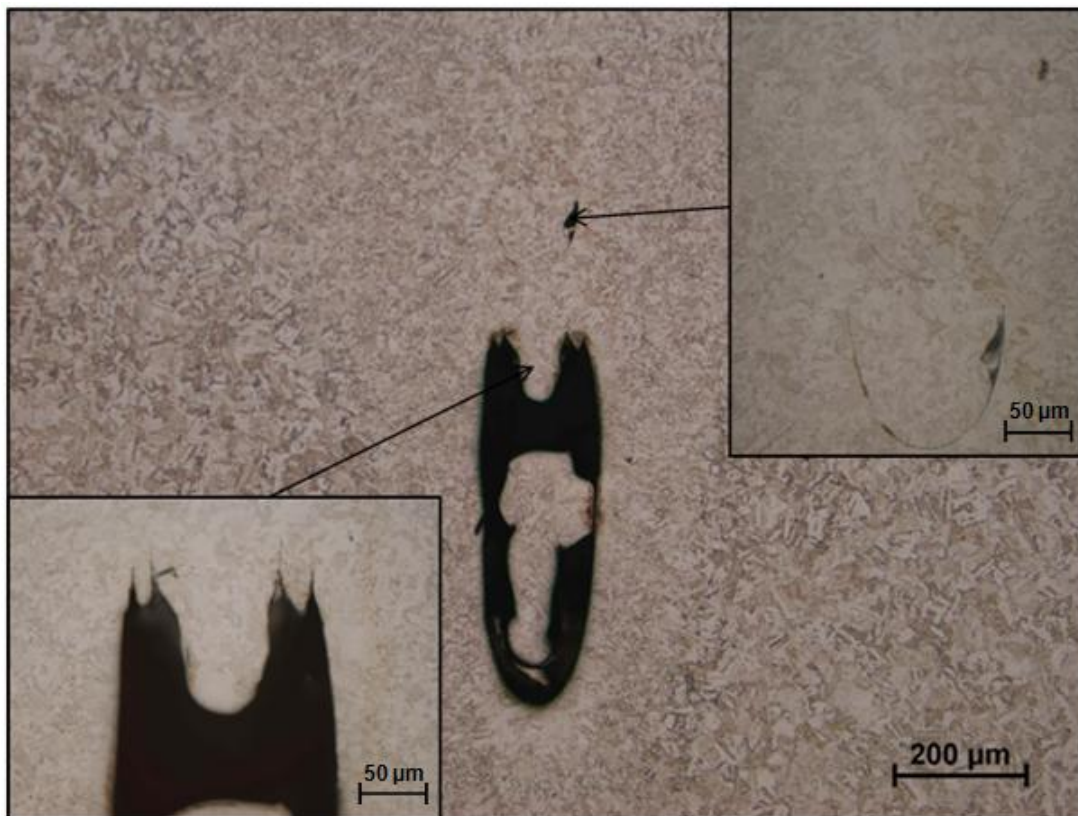
Tab. 7.5 Parametry elektronového svazku při experimentu.

Parametry svazku	Hodnoty
Urychlovací napětí $U_B$	60 kV
Proud svazku $I_s$	25 mA
Fokusační proud $I_F$	780 mA
Rychlost svařování $v_s$	$5 \text{ mm.s}^{-1}$
	$10 \text{ mm.s}^{-1}$
	$20 \text{ mm.s}^{-1}$

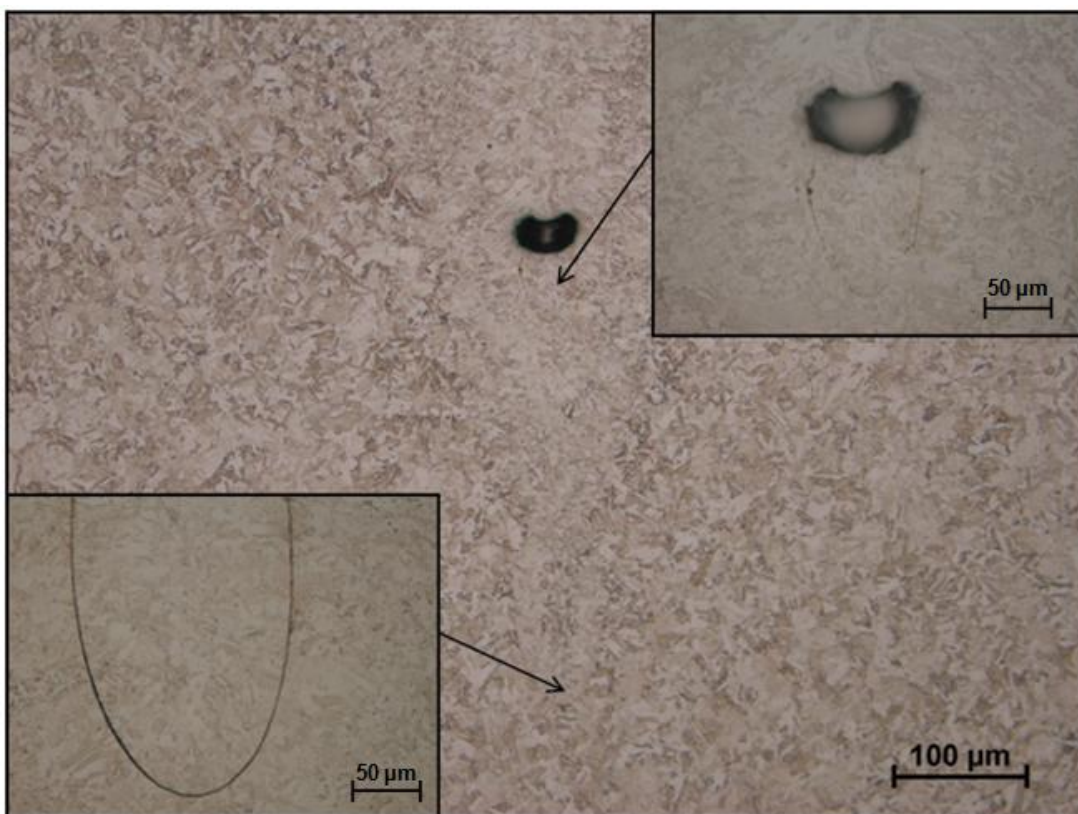
Při různých rychlostech svařování nejsou v horní části průvaru nalezeny žádné vady. Defekty jsou pozorovány až v oblasti kořene průvarů (Obr. 7.3, Obr. 7.4 a Obr. 7.5). Z jednotlivých obrázků je patrný pokles výskytu dutin se snižující se rychlostí svařování.



Obr. 7.3 Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 20 \text{ mm.s}^{-1}$ .



Obr. 7.4 Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.5 Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

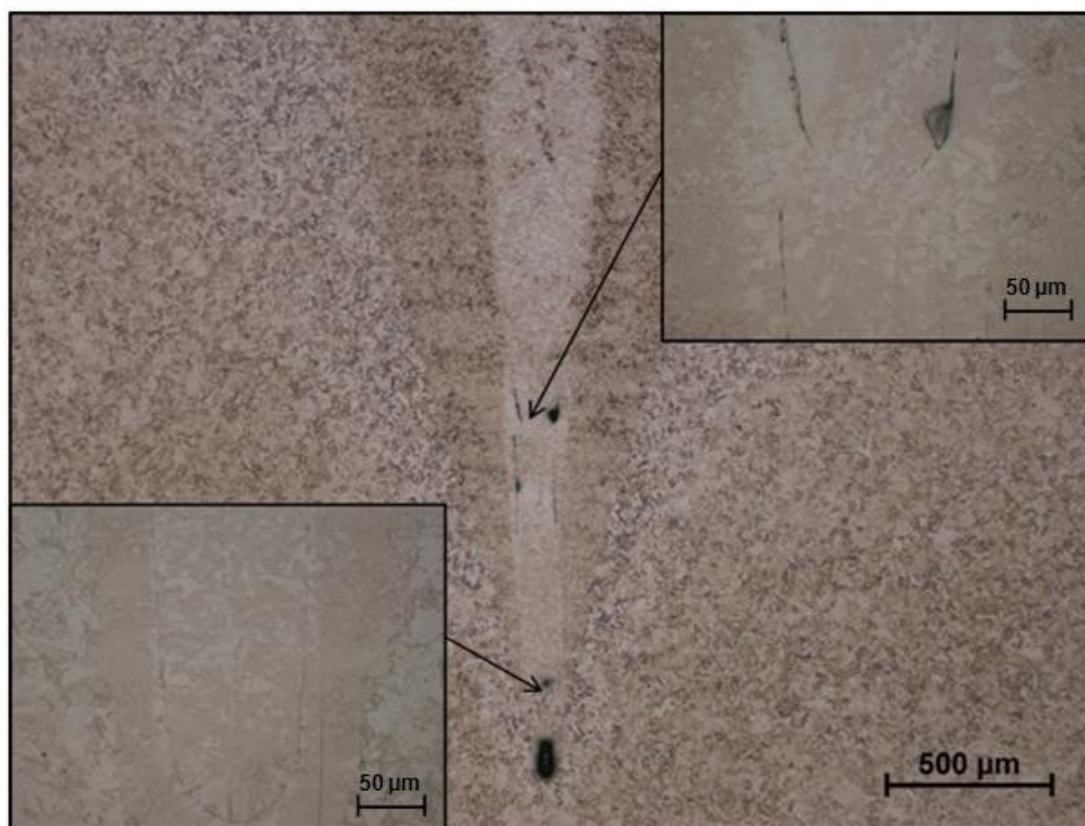
### 7.2.2 Vliv zaostření svazku

K ověření vlivu zaostření svazku (fokusačního proudu) na vznik defektů je provedeno několik průvarů s měnícím se fokusačním proudem při stejném urychlovacím napětí a rychlosti svařování. Zaostření svazku na povrch odpovídá hodnota fokusačního proudu 780 mA. Nižší hodnota fokusačního proudu  $I_F$  znamená zaostření pod povrch, vyšší nad povrch vzorku. Výchozí hodnoty fokusačního proudu a další parametry svařování jsou uvedeny v Tab. 7.6.

Tab. 7.6 Parametry elektronového svazku při experimentu.

Parametry svazku	Hodnoty
Urychlovací napětí $U_B$	60 kV
Proud svazku $I_s$	25 mA
Rychlost svařování $v_s$	10 mm.s <sup>-1</sup>
Fokusační proud $I_F$	765 mA
	780 mA
	795 mA

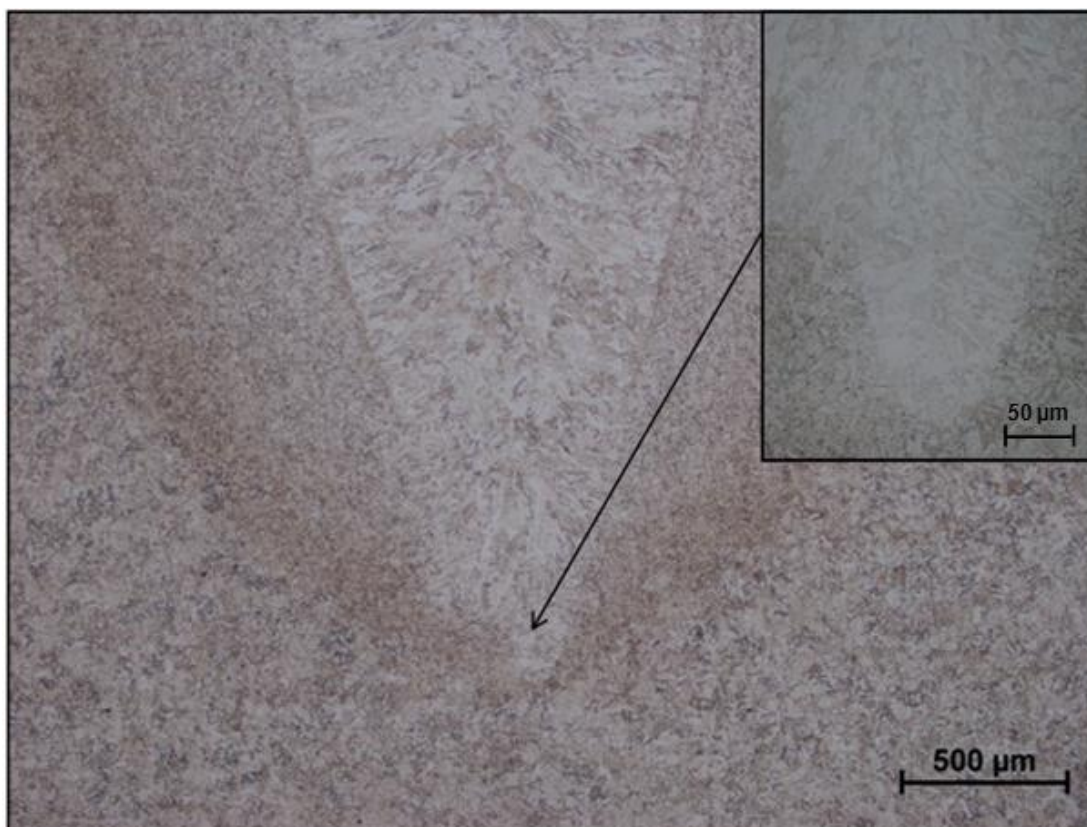
Při různém zaostření svazku nejsou v horní části průvaru nalezeny žádné vady. Defekty jsou pozorovány až v oblasti kořene průvaru při zaostření svazku na a nad povrch vzorku (Obr. 7.6, Obr. 7.7). V případě zaostření svazku pod povrch vzorku nejsou v celé oblasti průvaru pozorovány žádné defekty (Obr. 7. 8).



Obr. 7.6 Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ .



Obr. 7.7 Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku nad povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.8 Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku pod povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



### 7.3 Měření tvrdosti

Měření tvrdosti HV0,2 na rozhraní svarového kovu (SK) a tepelně ovlivněné oblasti (TOO) základního materiálu (ZM) probíhalo ve směru kolmém na jednotlivá rozhraní v poloviční hloubce každého průvaru (Obr. 7.9).



Obr. 7.9 Řada vtisků v oblasti průvaru.

#### 7.3.1 Průběh tvrdosti průvaru u vzorku ve vytvrzeném stavu

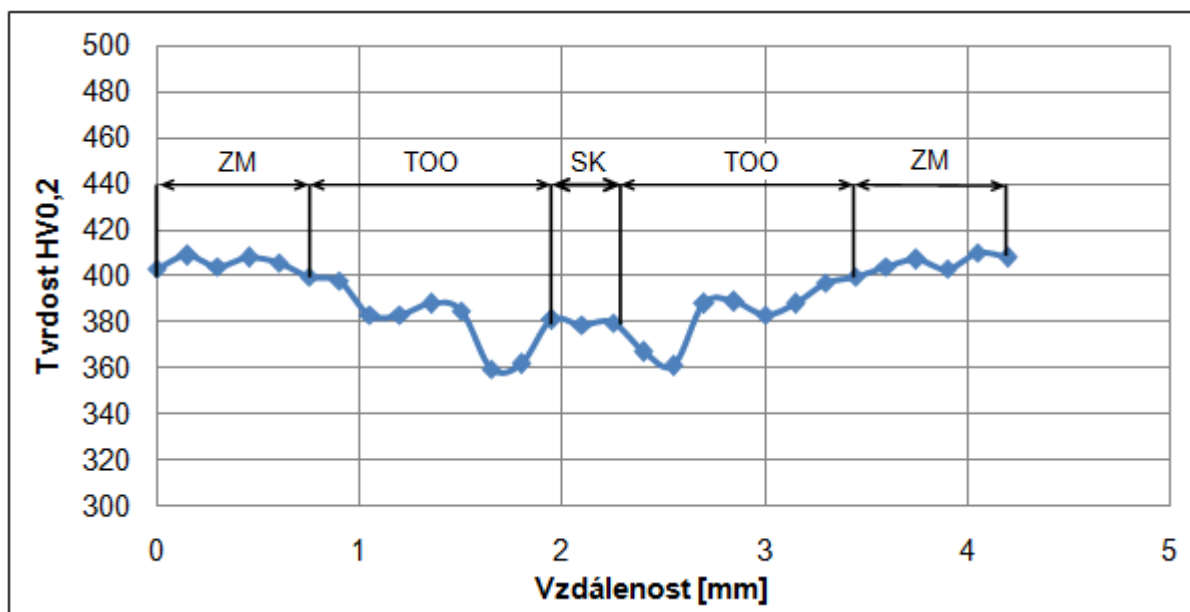
Jednotlivé průběhy tvrdosti jsou měřeny na všech průvarech s rozdílnými parametry svařování (rychlost svařování, zaostření svazku).

##### Rychlost svařování

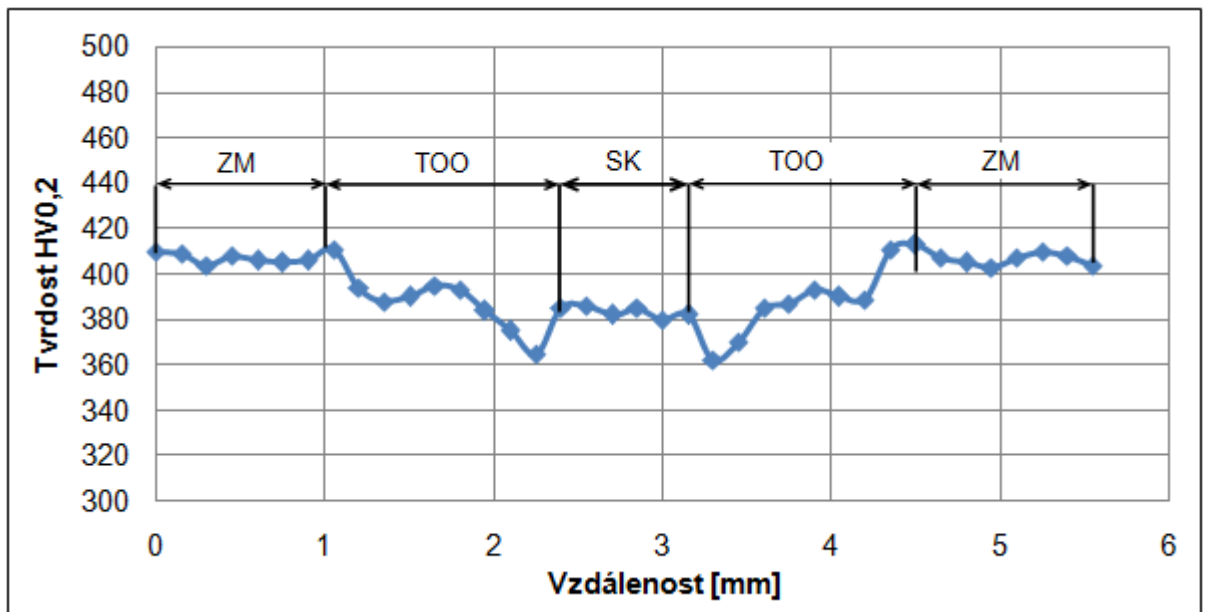
Při měření tvrdosti dle Vickerse se hodnota HV0,2 základního materiálu oceli AMS 5659 ve vytvrzeném stavu (H1025) pohybovala v rozsahu 400 – 410 HV0,2.

Ve svarovém kovu se naměřené hodnoty tvrdosti pohybovaly od 375 do 385 HV0,2 pro všechny rychlosti svařování.

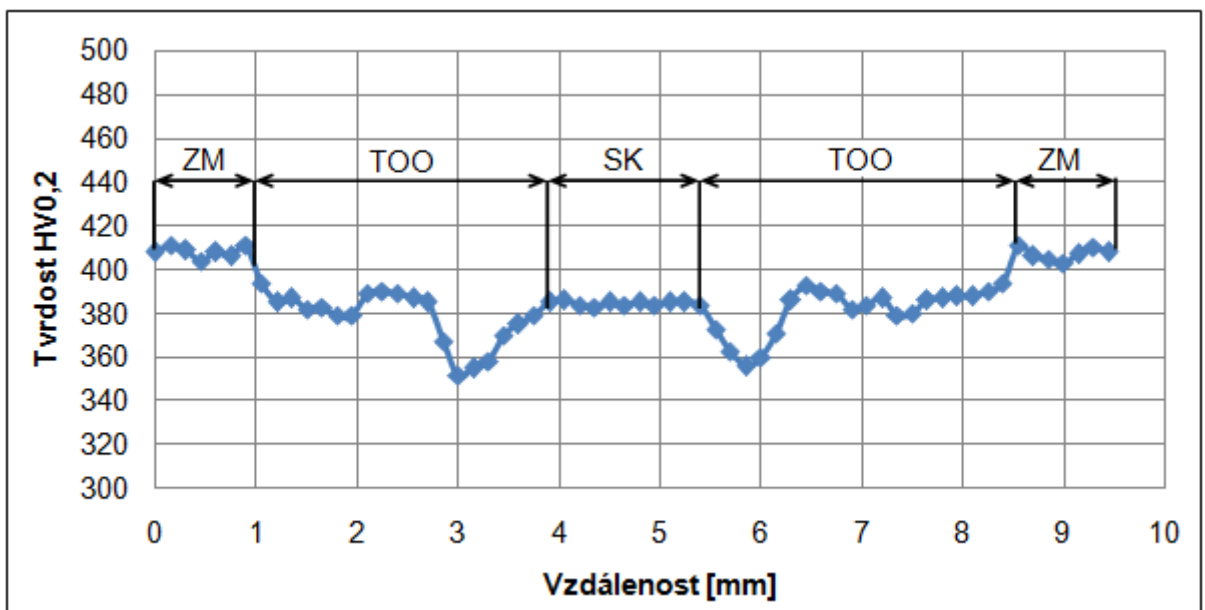
V tepelně ovlivněné oblasti, jejíž šířka závisí na rychlosti svařování, došlo k postupnému stupňovitému poklesu tvrdosti až na hodnotu 360 HV0,2. Dané průběhy tvrdosti jsou na Obr. 7.10, 7.11 a 7.12.



Obr. 7.10 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.11 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ .



Obr. 7.12 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 5 \text{ mm.s}^{-1}$ .

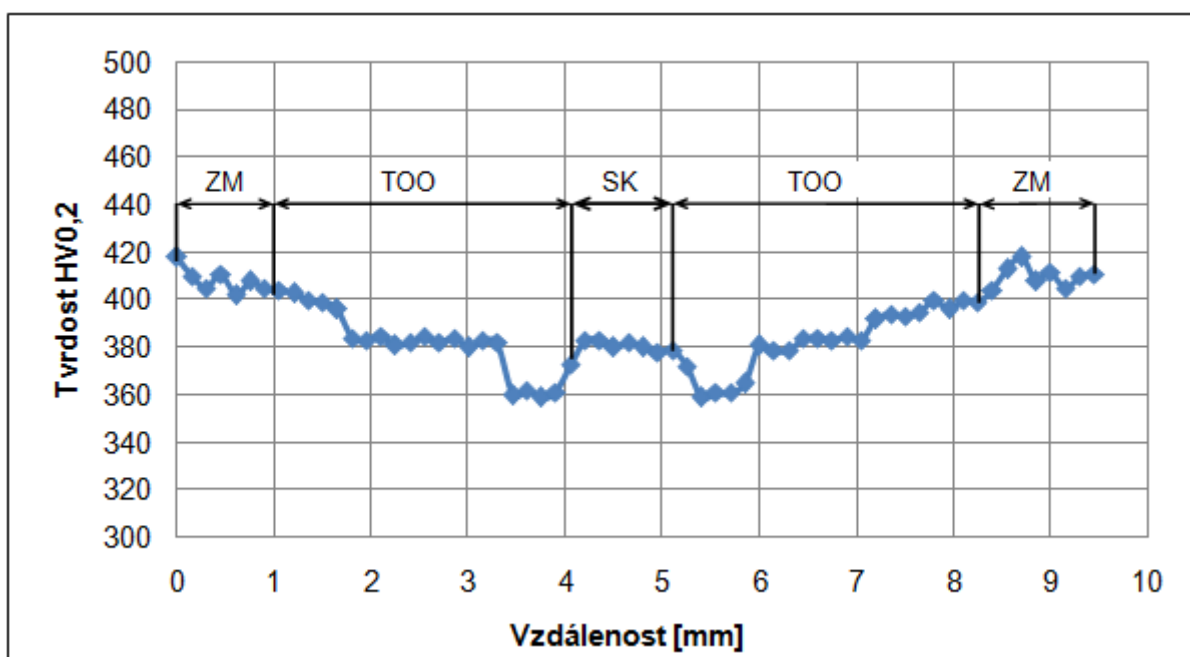
V případě nízké rychlosti svařování (Obr. 7.12) je v tepelně ovlivněné oblasti patrný výraznější stupňovitý pokles tvrdosti oproti menším rychlostem svařování.

### Zaostření svazku

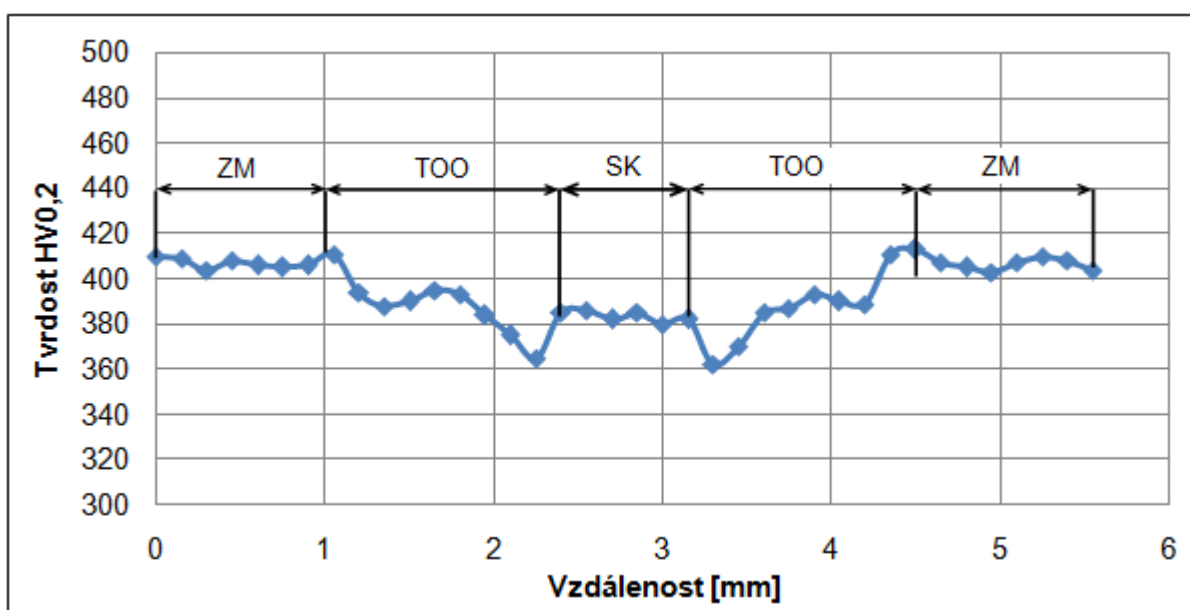
Hodnoty tvrdosti při změně zaostření svazku se téměř neliší od hodnot tvrdosti při měnící se rychlosti svařování.

Hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu se pohybovaly od 375 do 385 HV<sub>0,2</sub> pro všechny možnosti zaostření svazku (zaostření na povrch vzorku, nad a pod povrch vzorku).

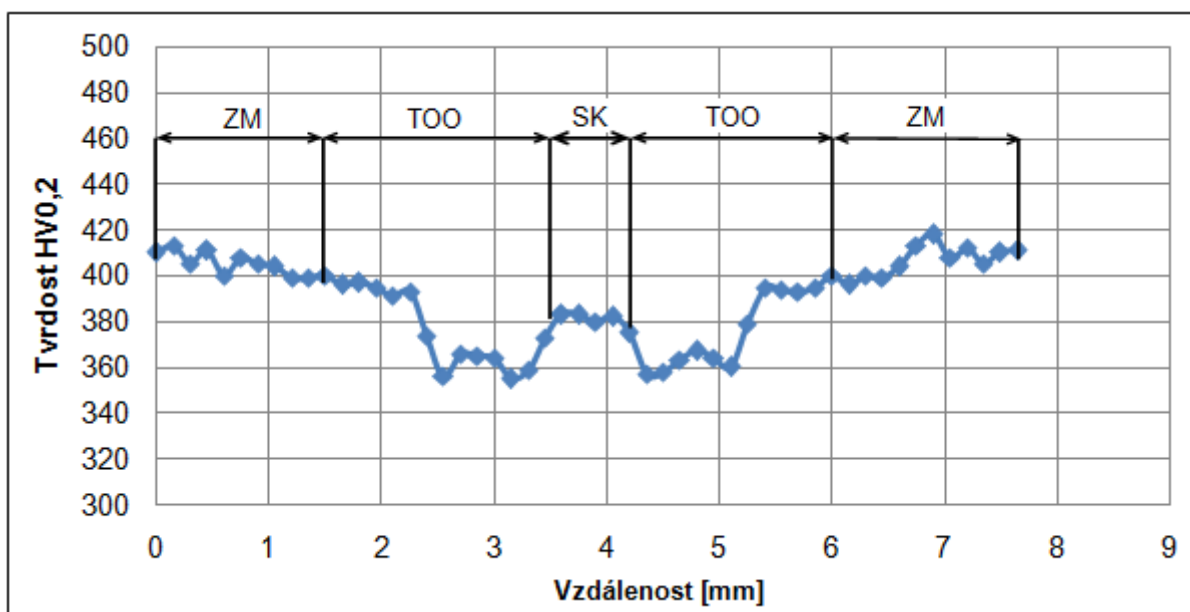
V tepelně ovlivněné oblasti, jejíž šířka závisí na zaostření svazku, došlo k postupnému stupňovitému poklesu tvrdosti až na hodnotu 360 HV<sub>0,2</sub>. Dané průběhy tvrdosti jsou na Obr. 7.13, 7.14 a 7.15.



Obr. 7.13 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku pod povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.14 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.15 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku nad povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ .

### 7.3.2 Průběh tvrdosti průvaru u vzorku po rozpouštěcím ohřevu

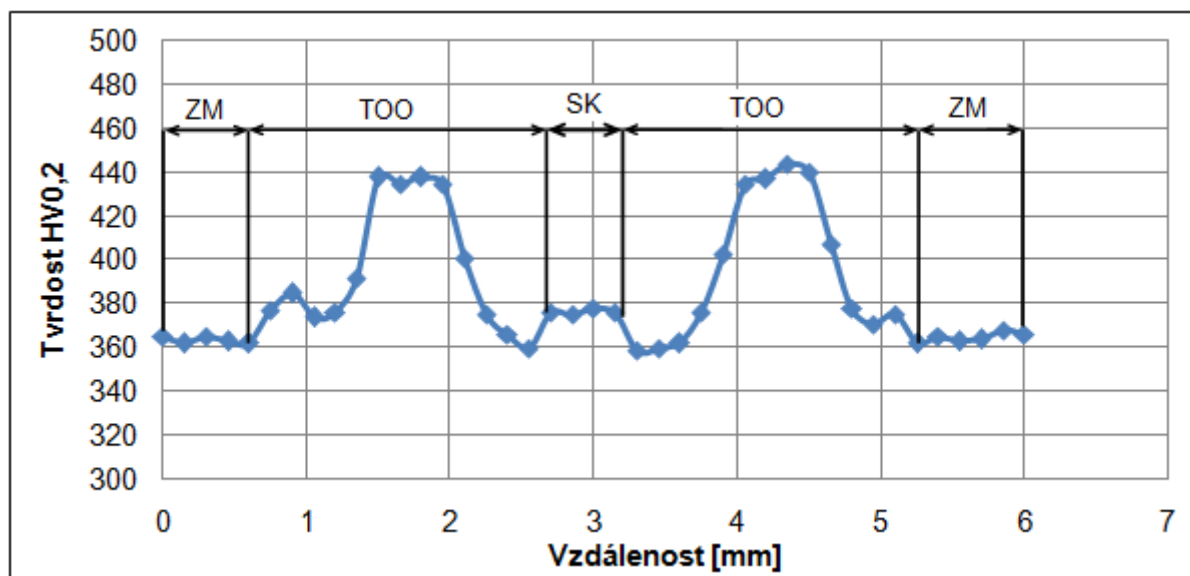
Jednotlivé průběhy tvrdosti jsou měřeny na všech průvarech s rozdílnými parametry svařování (rychlost svařování, zaostření svazku).

#### Rychlost svařování

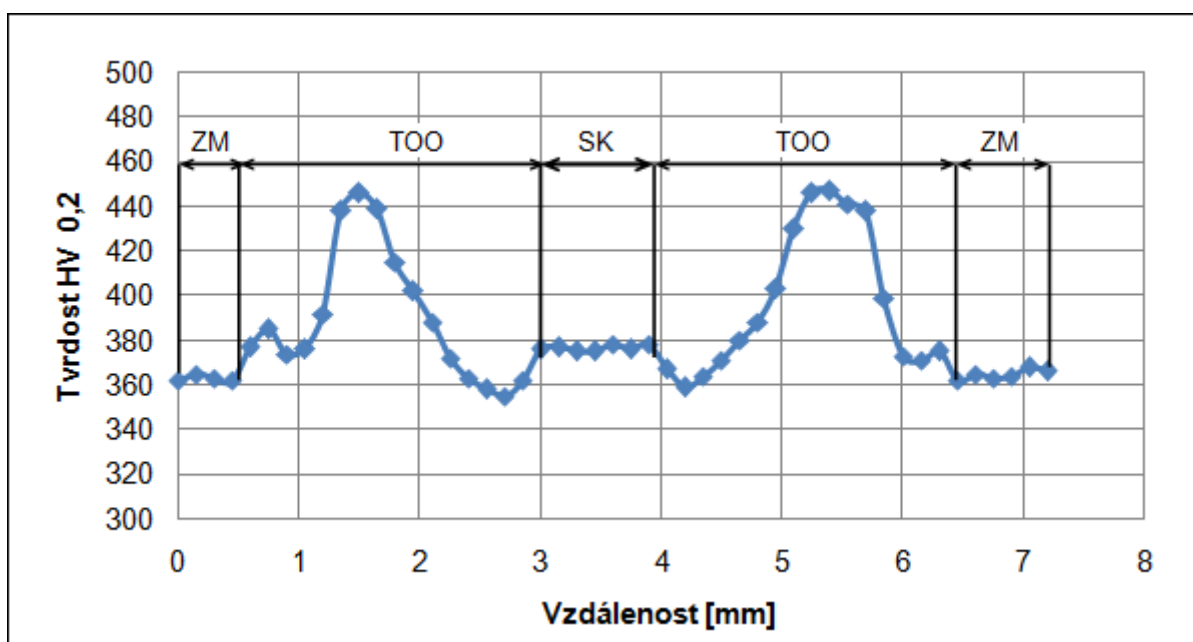
Při měření tvrdosti dle Vickerse se hodnota HV0,2 základního materiálu oceli AMS 5659 po rozpouštěcím ohřevu pohybovala v rozsahu 360 – 365 HV0,2.

Ve svarovém kovu došlo ke zvýšení tvrdosti oproti základnímu materiálu, naměřené hodnoty se pohybovaly od 375 do 385 HV0,2.

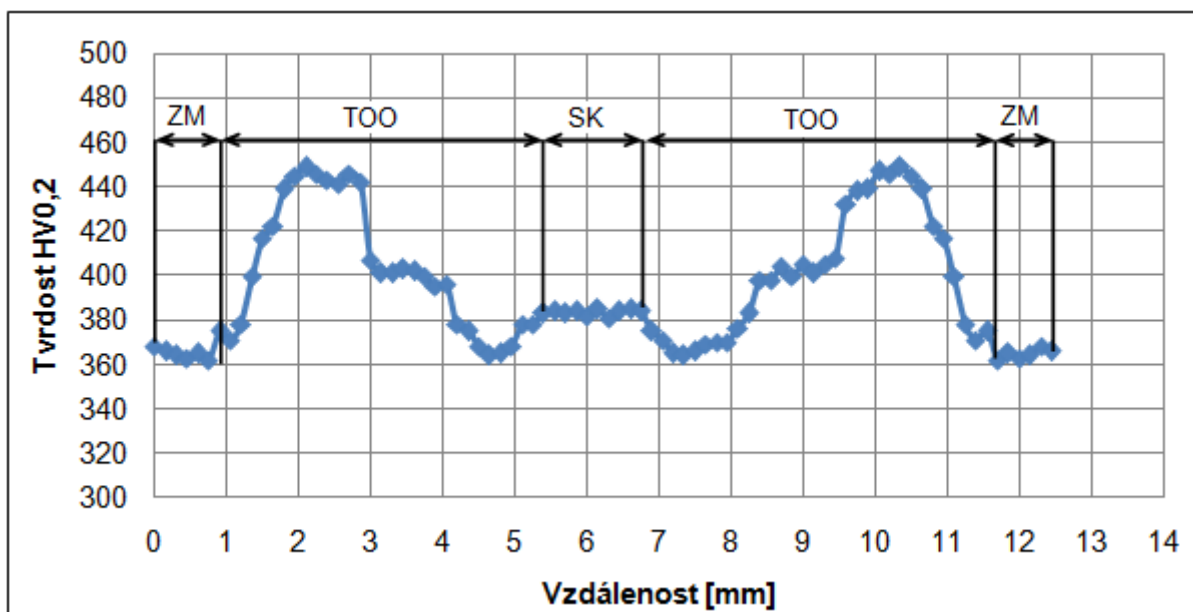
V tepelně ovlivněné oblasti, jejíž šířka závisí na rychlosti svařování, došlo k postupnému stupňovitému nárůstu tvrdosti až na hodnotu 440 HV0,2. Dané průběhy tvrdosti jsou na Obr. 7.16, 7.17 a 7.18.



Obr. 7.16 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 20 \text{ mm.s}^{-1}$ .



Obr. 7.17 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.18 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

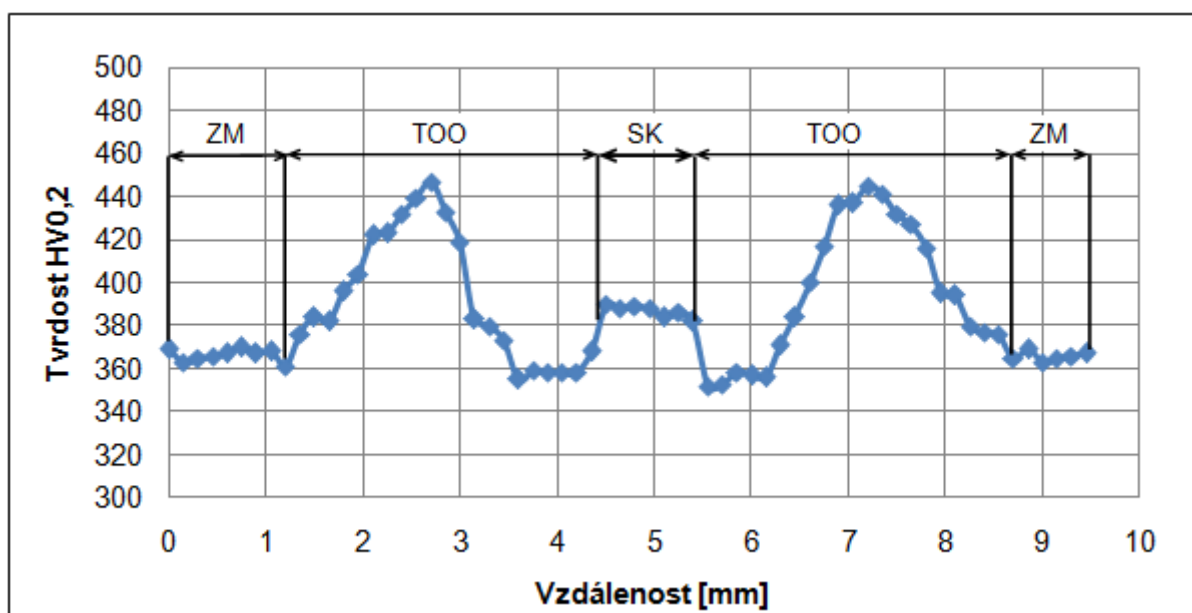
V případě nízké rychlosti svařování (Obr. 7.18) je v tepelně ovlivněné oblasti patrný výraznější stupňovitý nárůst tvrdosti oproti menším rychlostem svařování.

### Zaostření svazku

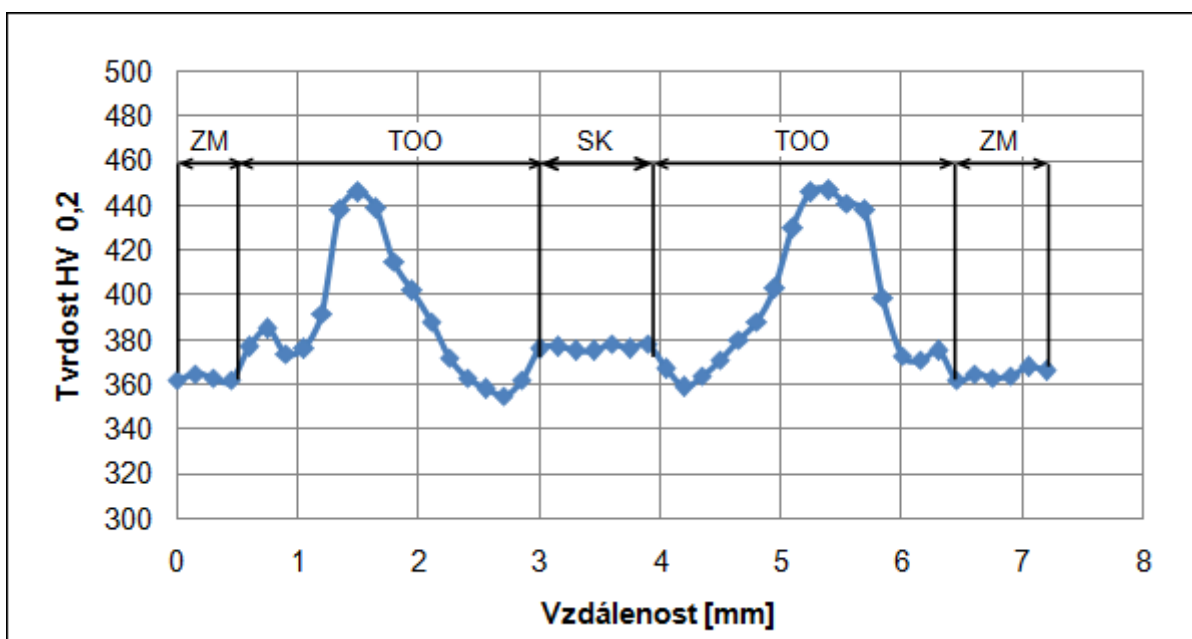
Hodnoty tvrdosti při změně zaostření svazku se téměř neliší od hodnot tvrdosti při měnící se rychlosti svařování.

Hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu se pohybovaly od 375 do 385 HV<sub>0,2</sub> pro všechny možnosti zaostření svazku. (zaostření na povrch vzorku, nad a pod povrch vzorku).

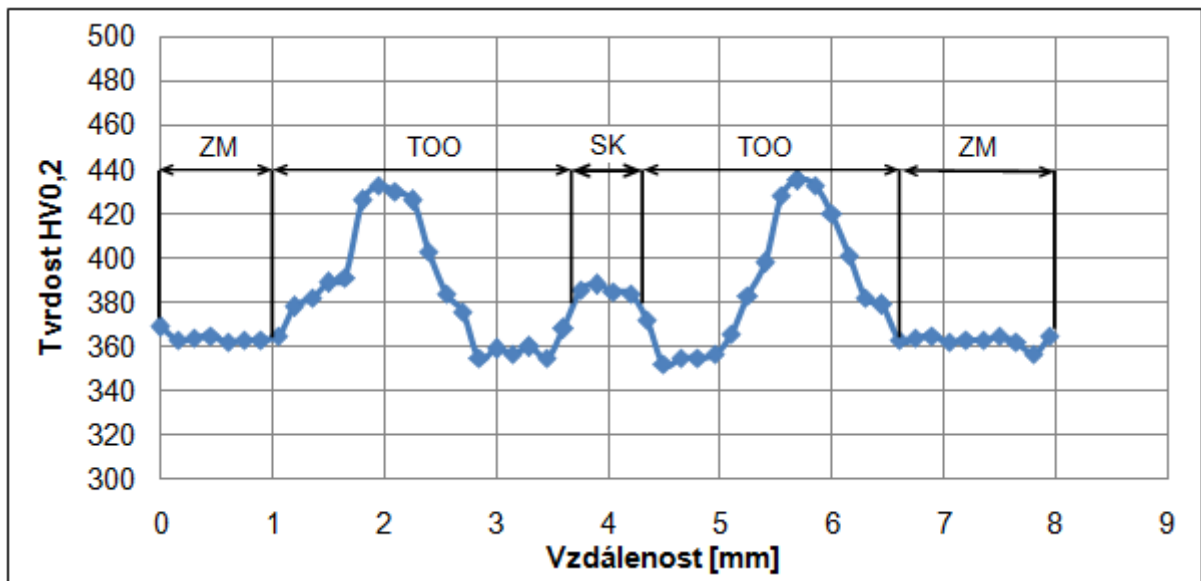
V tepelně ovlivněné oblasti, jejíž šířka závisí na zaostření svazku, došlo k postupnému stupňovitému nárůstu tvrdosti až přes hodnotu 440 HV<sub>0,2</sub>. Dané průběhy tvrdosti jsou na Obr. 7.19, 7.20 a 7.21.



Obr. 7.19 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku pod povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.20 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.21 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku nad povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 7.3.1 Průběh tvrdosti průvaru u znovu vytvrzeného vzorku

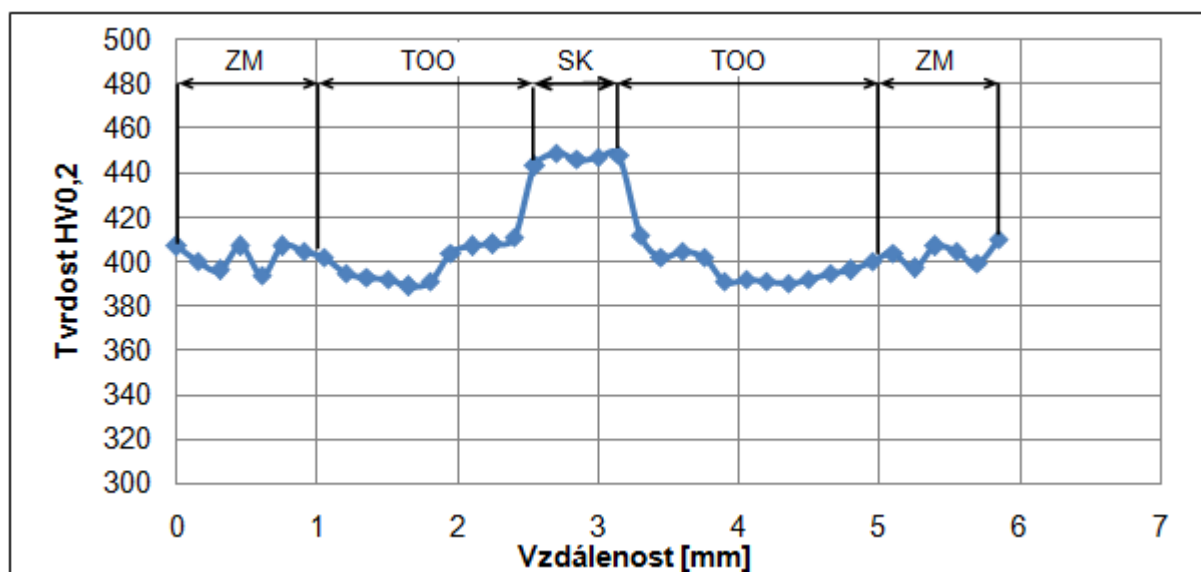
Jednotlivé průběhy tvrdosti jsou měřeny na všech průvarech s rozdílnými parametry svařování (rychlost svařování, zaostření svazku).

#### Rychlost svařování

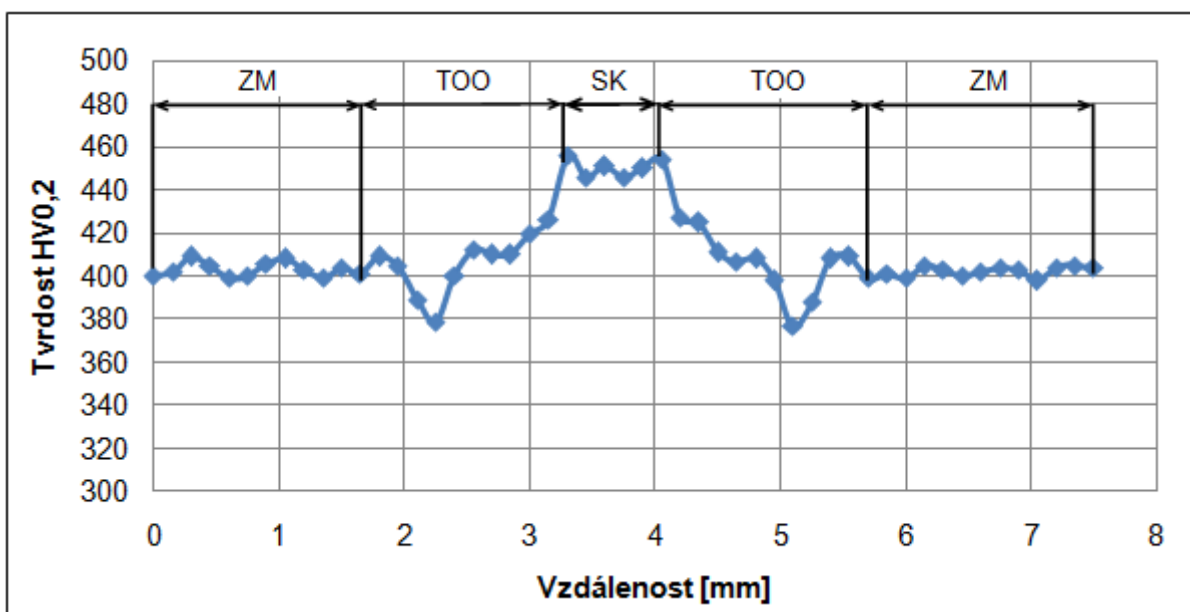
Při měření tvrdosti dle Vickerse se hodnota HV<sub>0,2</sub> základního materiálu oceli AMS 5659 po opětovném vytvrzení pohybovala v rozsahu 400 – 410 HV<sub>0,2</sub>.

Tvrdość svarového kovu se oproti tvrdosti základního materiálu po opětovném vytvrzení výrazně zvedla. Hodnoty tvrdosti při různých rychlostech svařování ( $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se pohybovaly od 445 do 455 HV<sub>0,2</sub>.

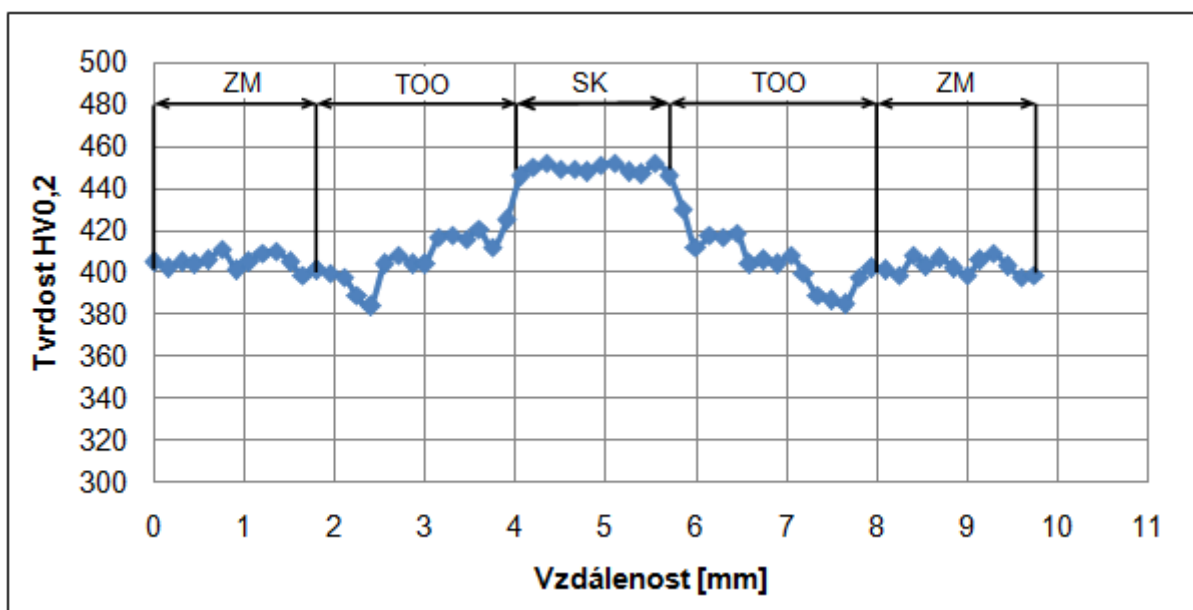
V tepelně ovlivněné oblasti došlo nejprve k poklesu tvrdosti až na hodnotu 380 HV<sub>0,2</sub> směrem od rozhraní TOO se základním materiálem. Poté následoval postupný nárůst tvrdosti na úroveň tvrdosti svarového kovu. Dané průběhy tvrdosti jsou na Obr. 7.21, 7.22 a 7.23.



Obr. 7.21 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.22 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ .



Obr. 7.23 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 5 \text{ mm.s}^{-1}$ .

V případě nízké rychlosti svařování (Obr. 7.23) je v tepelně ovlivněné oblasti patrný výraznější stupňovitý nárůst tvrdosti směrem k svarovému kovu oproti menším rychlostem svařování.

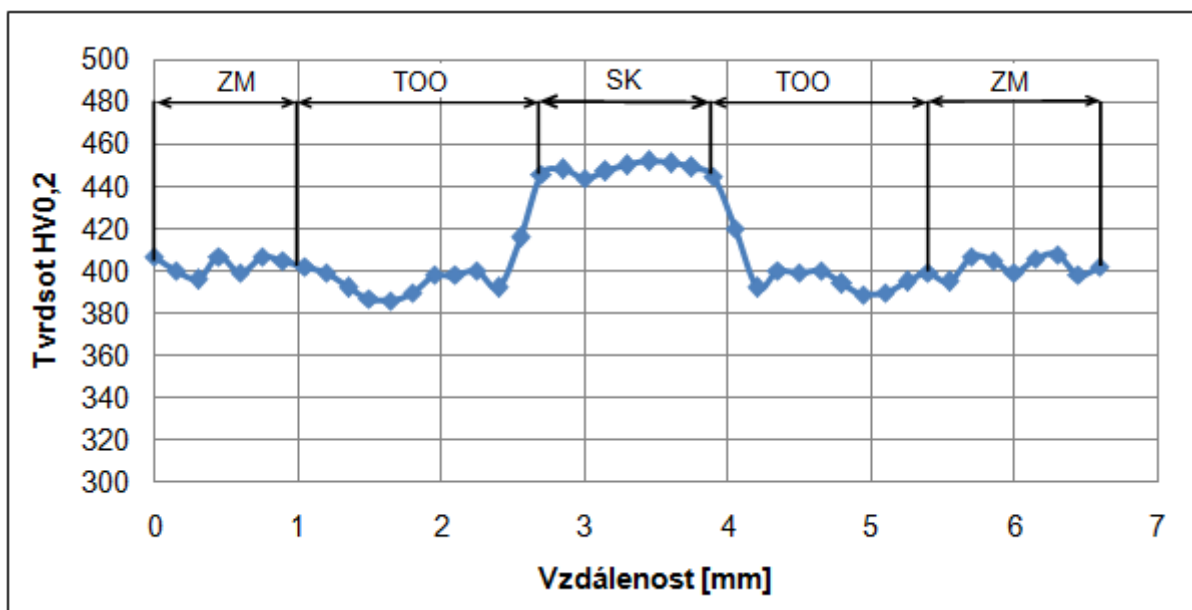


### Zaostření svazku

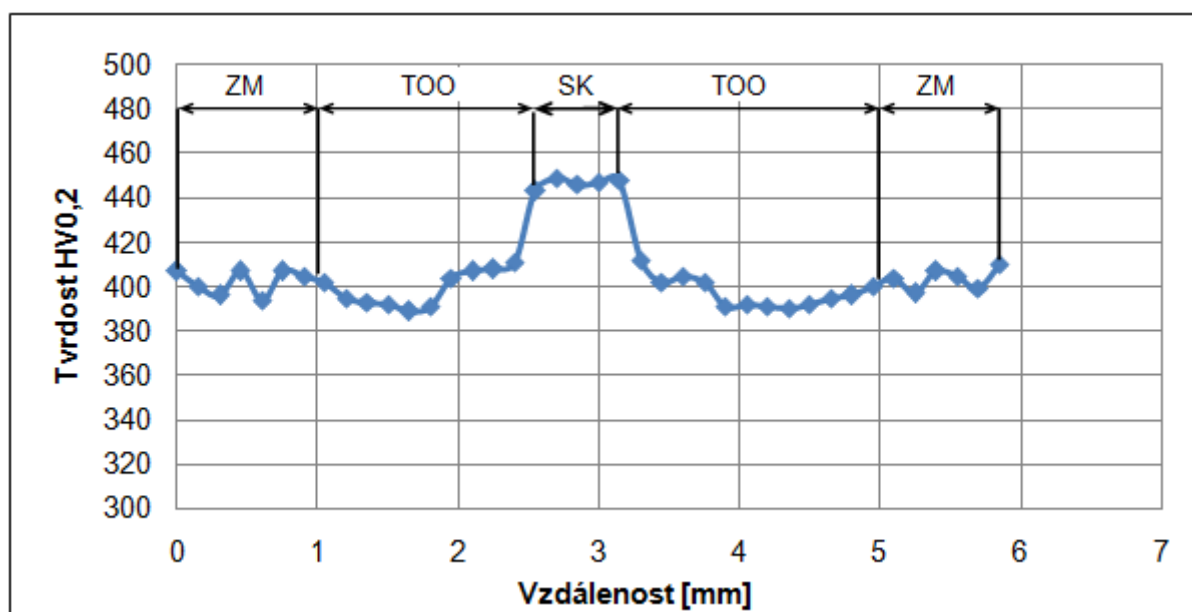
Hodnoty tvrdosti při změně zaostření svazku se téměř neliší od hodnot tvrdosti při měnící se rychlosti svařování.

Tvrdost svarového kovu se oproti tvrdosti základního materiálu po opětovném vytvrzení výrazně zvedla. Hodnoty tvrdosti při různém zaostření svazku se pohybovaly od 445 do 455 HV<sub>0,2</sub>.

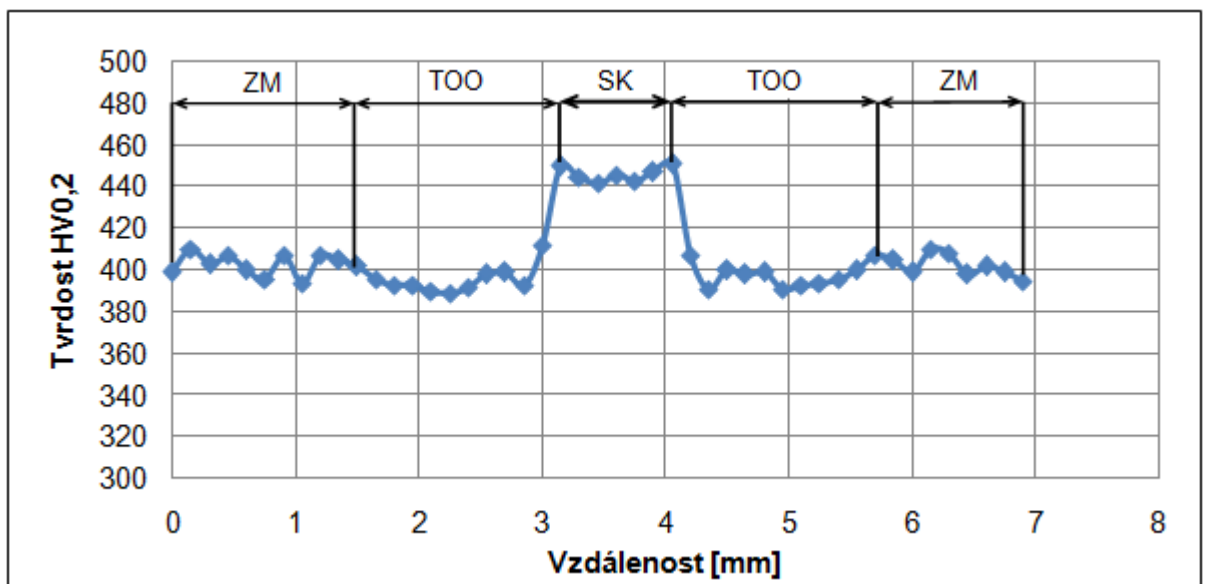
V tepelně ovlivněné oblasti došlo nejprve k poklesu tvrdosti až na hodnotu 390 HV<sub>0,2</sub> směrem od rozhraní TOO se základním materiálem. Dále je možné pozorovat nárůst hodnoty tvrdosti na úroveň tvrdosti svarového kovu. Dané průběhy tvrdosti jsou na Obr. 7.24, 7.25 a 7.26.



Obr. 7.24 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku pod povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.25 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.26 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku nad povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ .

### 7.3.2 Průběh tvrdosti průvaru u vzorku vytvrzeného po rozpouštěcím ohřevu

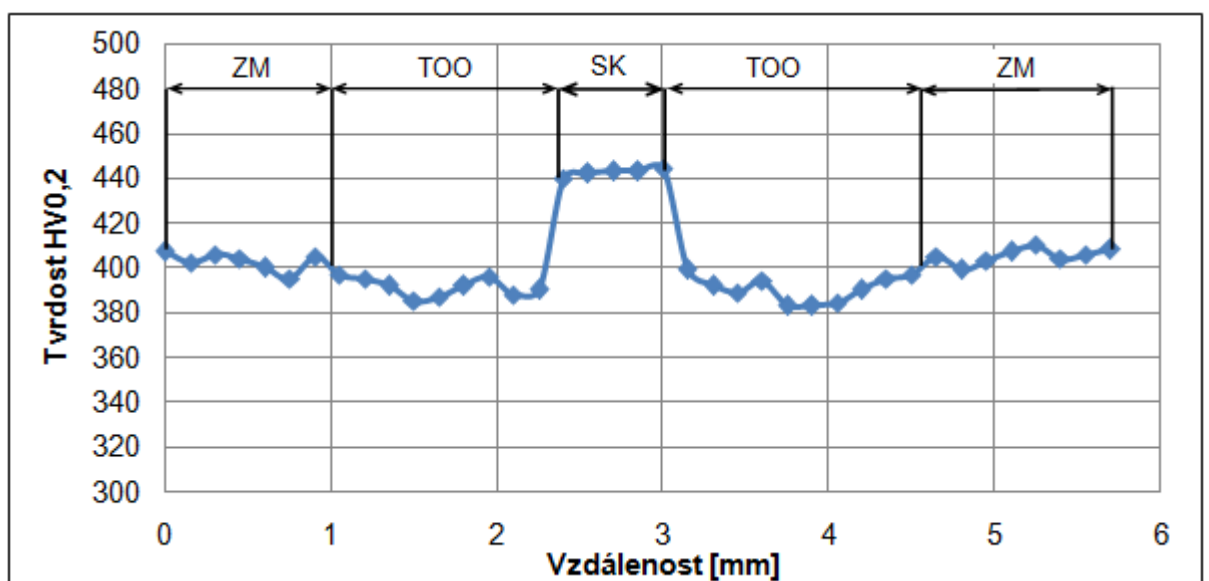
Jednotlivé průběhy tvrdosti jsou měřeny na všech průvarech s rozdílnými parametry svařování (rychlost svařování, zaostření svazku).

#### Rychlost svařování

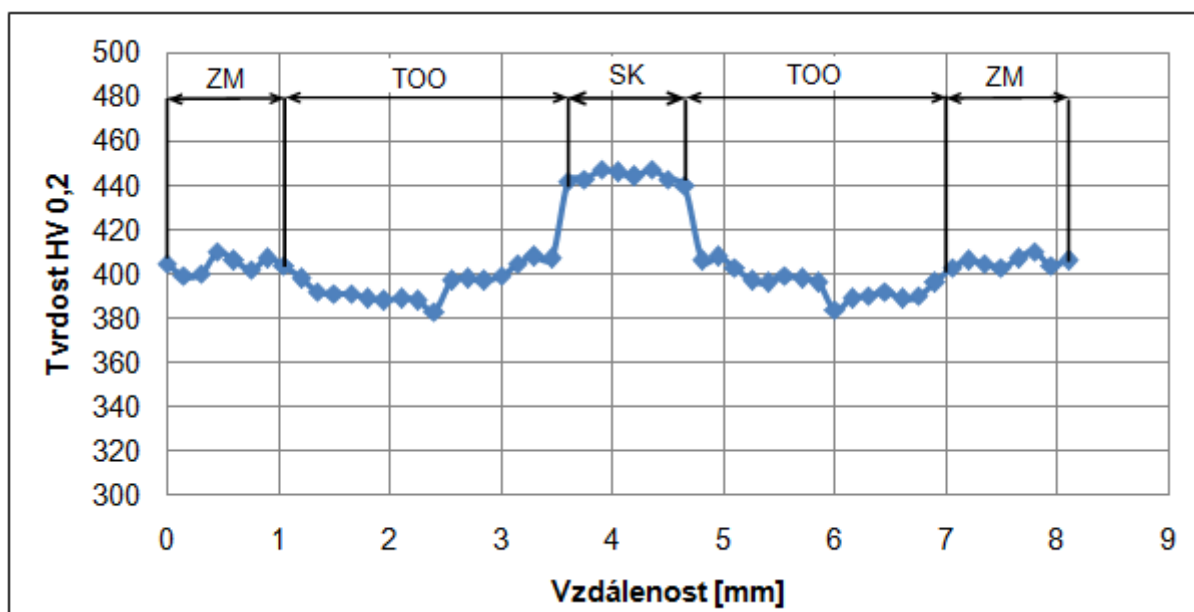
Při měření tvrdosti dle Vickerse se hodnota HV0,2 základního materiálu oceli AMS 5659 vytvrzeného po rozpouštěcím ohřevu pohybovala v rozsahu 400 – 410 HV0,2.

Tvrđost svarového kovu se oproti tvrdosti základního materiálu výrazně zvedla. Hodnoty tvrdosti při různých rychlostech svařování ( $20 \text{ mm.s}^{-1}$ ,  $10 \text{ mm.s}^{-1}$  a  $5 \text{ mm.s}^{-1}$ ) se pohybovaly od 445 do 455 HV0,2.

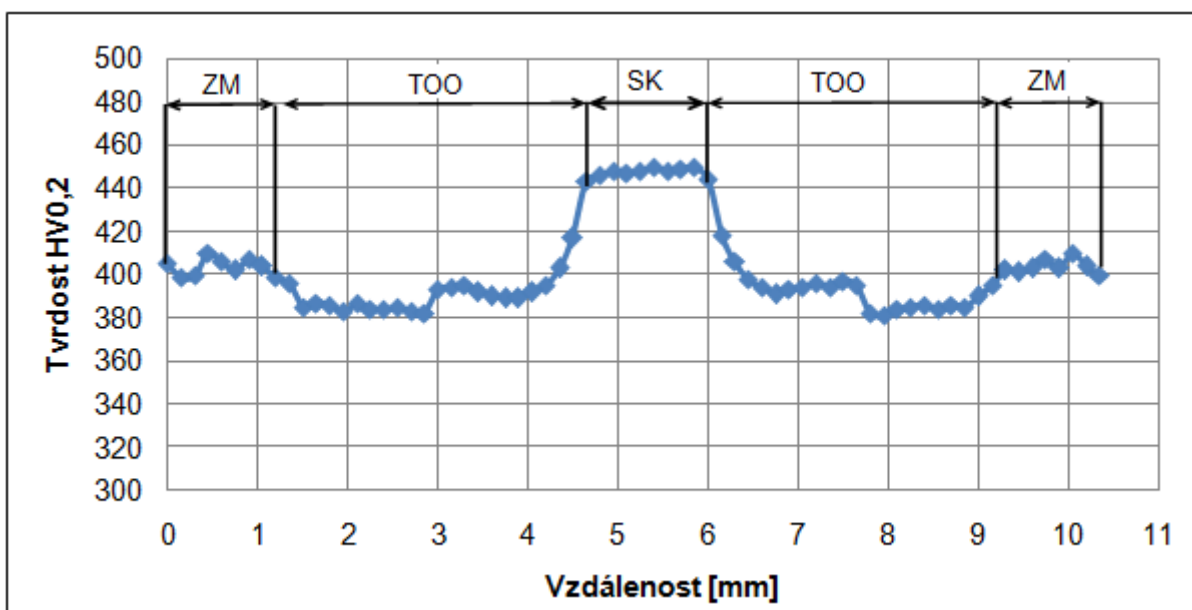
V tepelně ovlivněné oblasti došlo nejprve k poklesu tvrdosti až na hodnotu 380 HV0,2 směrem od rozhraní TOO se základním materiálem. Poté následoval nárůst tvrdosti na úroveň tvrdosti svarového kovu. Dané průběhy tvrdosti jsou na Obr. 7.27, 7.28 a 7.29.



Obr. 7.27 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 20 \text{ mm.s}^{-1}$ .



Obr. 7.28 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ .



Obr. 7.29 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 5 \text{ mm.s}^{-1}$ .

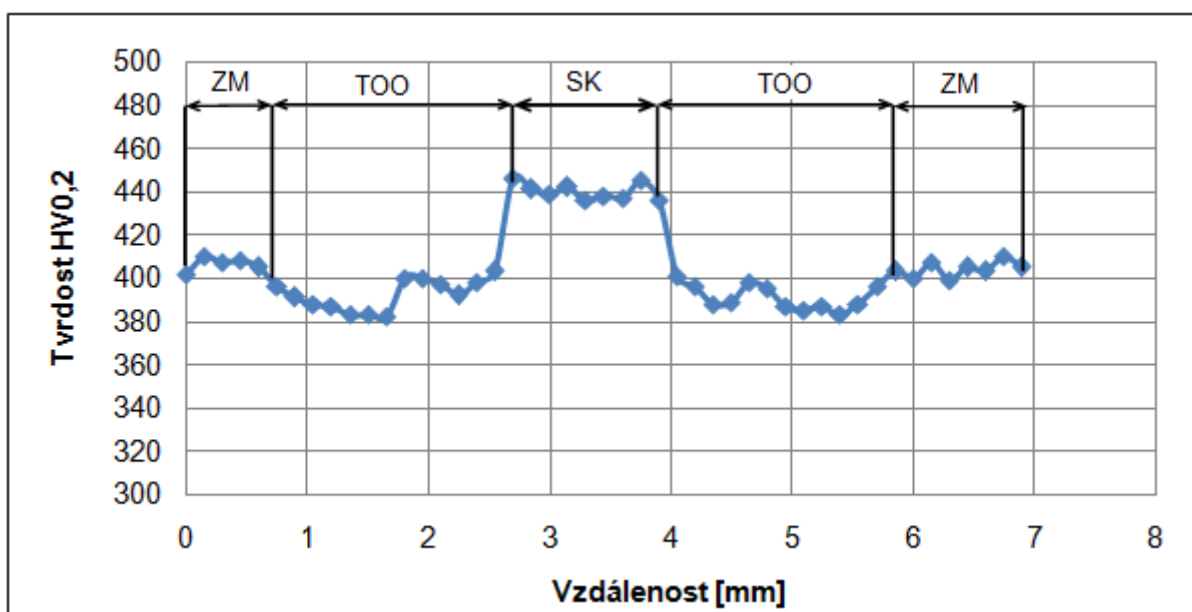
V případě nízké rychlosti svařování (Obr. 7.29) je v tepelně ovlivněné oblasti patrný výraznější stupňovitý nárůst tvrdosti směrem k svarovému kovu oproti menším rychlostem svařování.

### Zaostření svazku

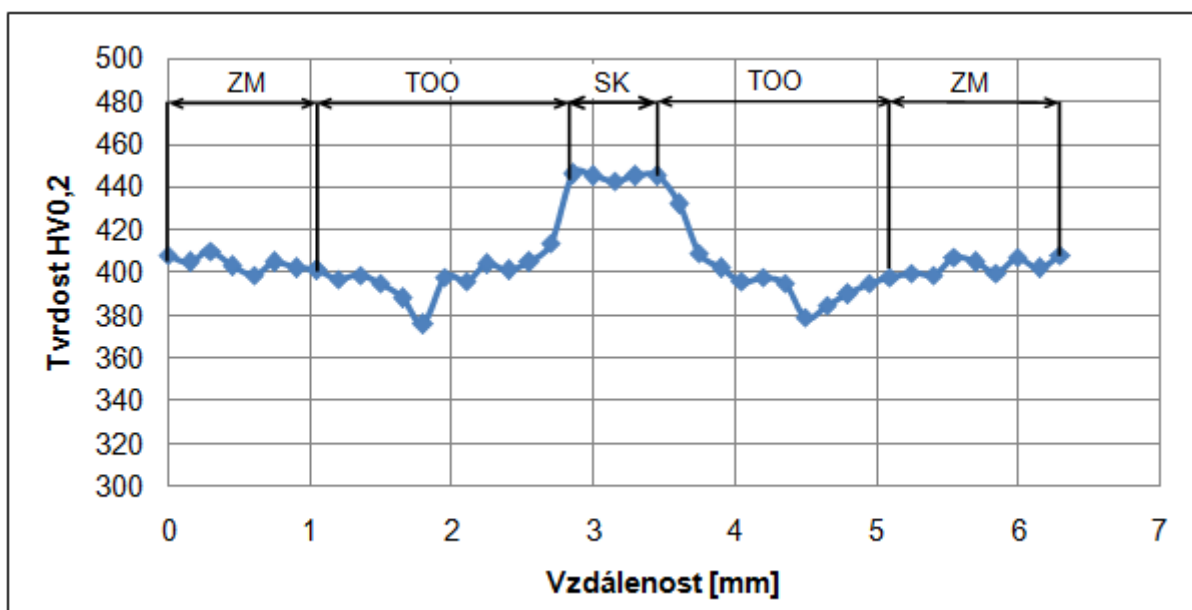
Hodnoty tvrdosti při změně zaostření svazku se téměř neliší od hodnot tvrdosti při měnící se rychlosti svařování.

Tvrdość svarového kovu se oproti tvrdosti základního materiálu výrazně zvedla. Hodnoty tvrdosti při různém zaostření svazku se pohybovaly od 435 do 445 HV<sub>0,2</sub>.

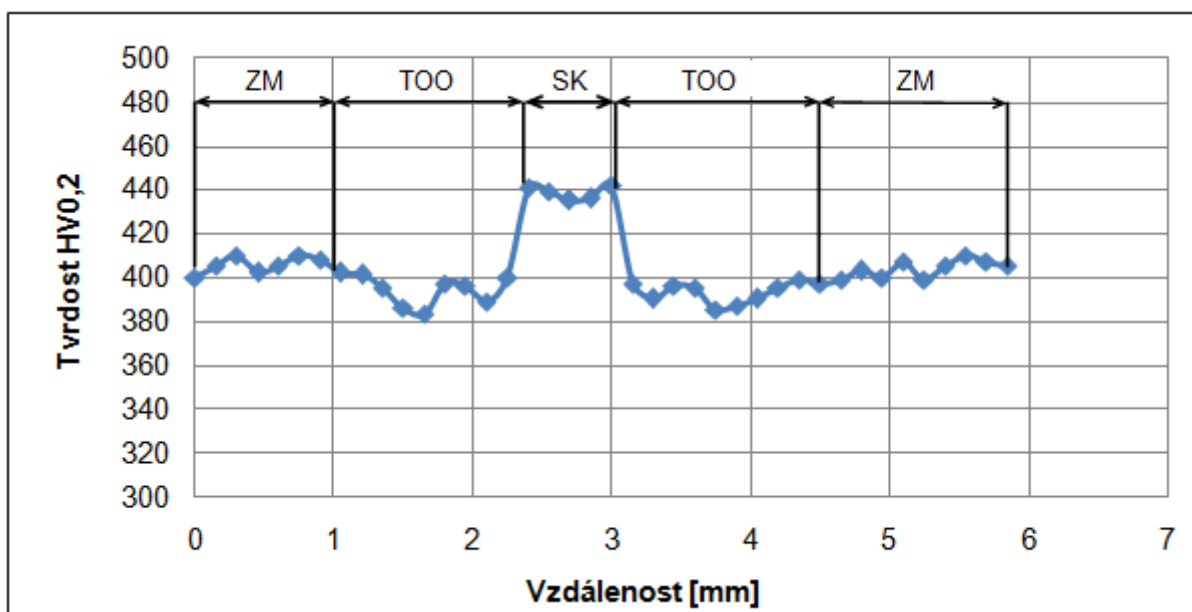
V tepelně ovlivněné oblasti došlo nejprve k poklesu tvrdosti až na hodnotu 380 HV<sub>0,2</sub> směrem od rozhraní TOO se základním materiálem. Následuje nárůst hodnoty tvrdosti až na úroveň tvrdosti svarového kovu. Dané průběhy tvrdosti jsou na Obr. 7.30, 7.31 a 7.32.



Obr. 7.30 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku pod povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 7.31 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

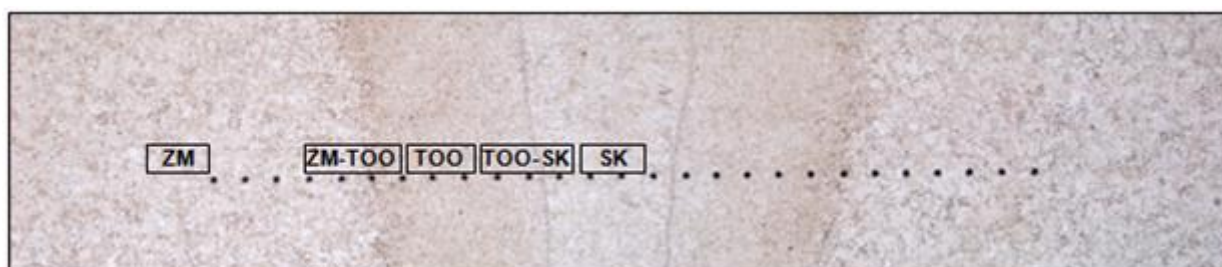


Obr. 7.32 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku nad povrch vzorku,  $v_s = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### 7.4 Mikrostruktura průvarů a tepelně ovlivněné oblasti

Struktura průvaru byla hodnocena v oblasti svarového kovu, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu. Zdokumentované struktury v oblasti základního materiálu a průvaru jsou shodné pro všechny parametry svařování a „strukturní stavy“ oceli AMS 5659. Oblasti hodnocení mikrostruktury jsou znázorněné na Obr. 7.33

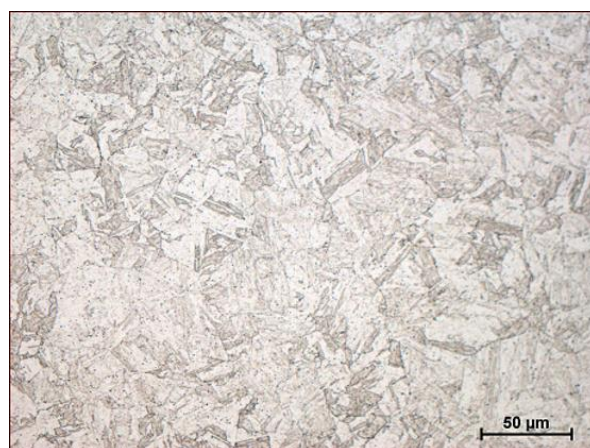
**Mikrostruktura základního materiálu (ZM)** neovlivněného svarem je tvořena nízkouhlíkovým jemnozrnným martenzitem s rovnoměrně rozptýlenými karbidickými fázemi (Obr. 7.34). Také jsou ve struktuře pozorovány hranaté karbidy Nb (Obr. 7.35).



Obr. 7.33 Oblasti hodnocení mikrostruktury.



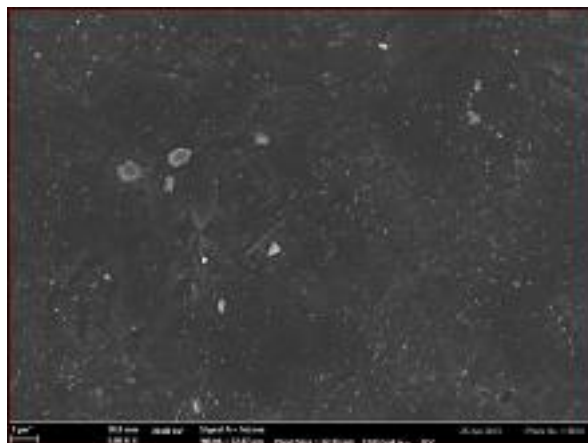
Obr. 7.34a) Základní materiál - 200x.



Obr. 7.34b) Základní materiál - 500x.

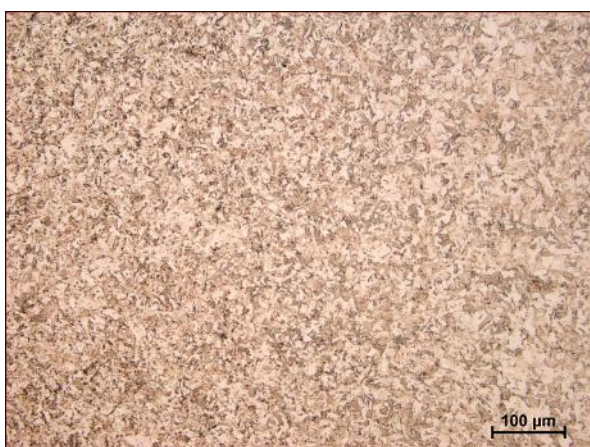


Obr. 7.35a) Karbidy NbC v ZM.



Obr. 7.35b) Karbidy NbC v ZM.

**Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti (TOO)** je tvořena strukturou martenzitického typu (Obr. 7.36). V TOO je pozorována oblast normalizace charakterizovaná nejmenší velikostí zrna navazující na základní materiál (Obr. 7.37) a hrubozrnná oblast, pozorována na rozhraní svarového kovu a TOO (Obr. 7. 38 a 7.39). Mezi jednotlivými oblastmi TOO nebyl pozorován výrazný přechod. Hrubozrnná oblast plynule přechází v normalizovanou oblast. Na rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti jsou pozorovány sferoidizované karbidy Nb (Obr. 7.40)



Obr. 7.36a) Tepelně ovlivněná oblast - 200x.



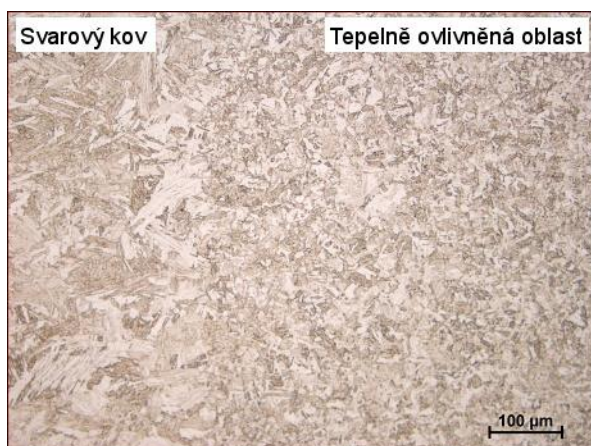
Obr. 7.36b) Tepelně ovlivněná oblast - 500x.



Obr. 7.37a) Přechod mezi ZM a TOO - 200x.



Obr. 7.37b) Přechod mezi ZM a TOO - 500x.



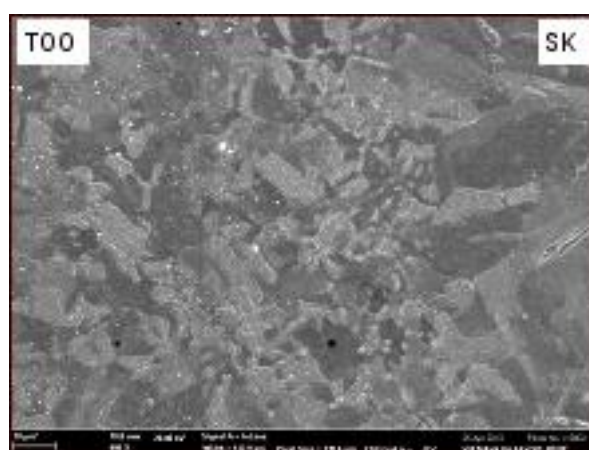
Obr. 7.38a) Přechod mezi SK a TOO - 200x.



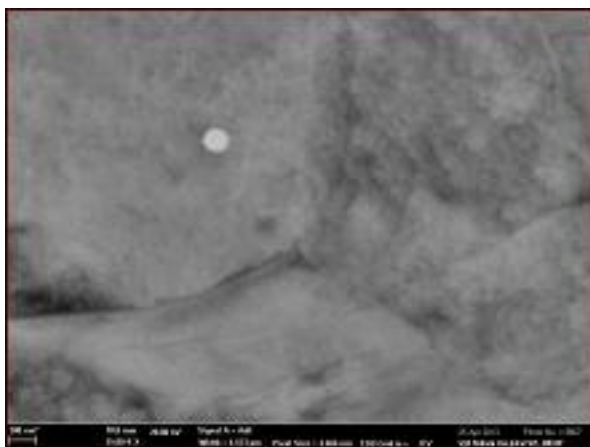
Obr. 7.38b) Přechod mezi SK a TOO - 500x.



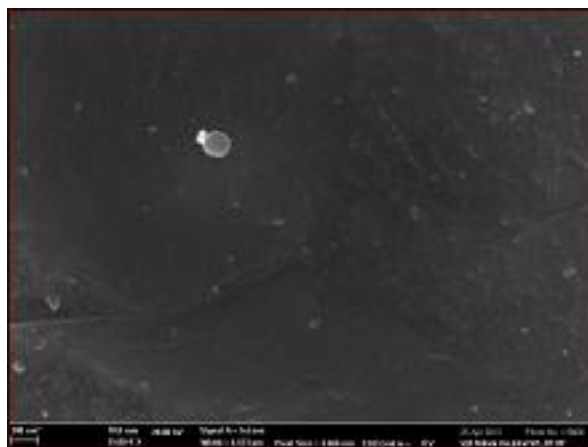
Obr. 7.39a) Přechod mezi SK a TOO.



Obr. 7.39b) Přechod mezi SK a TOO.



Obr. 7.40a) Karbidy NbC, rozhraní SK a TOO.



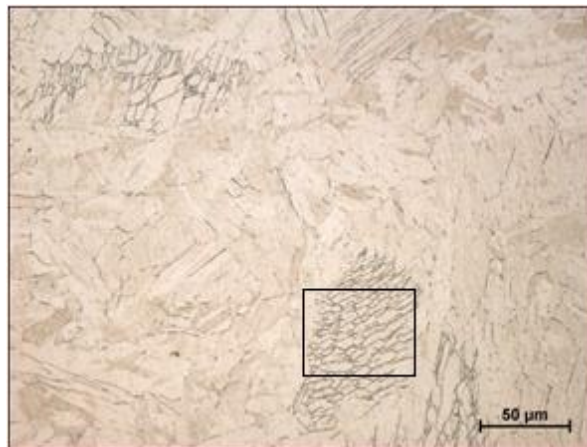
Obr. 7.40b) Karbidy NbC rozhraní SK a TOO

**Mikrostruktura svarového kovu** je také tvořena strukturou martenzitického typu. Struktura svarového kovu se na rozdíl od tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu vyznačuje hrubším zrnem s patrnou dendritickou morfologií. U zrn lze pozorovat orientaci ve směru nejvyššího odvodu tepla (Obr. 7.41). Útvary označené na Obr. 7.41b pozorované ve svarovém kovu jsou způsobené leptáním, kdy došlo k výraznému naleptání této oblasti, z důvodu vhodně orientovaných krystalografických

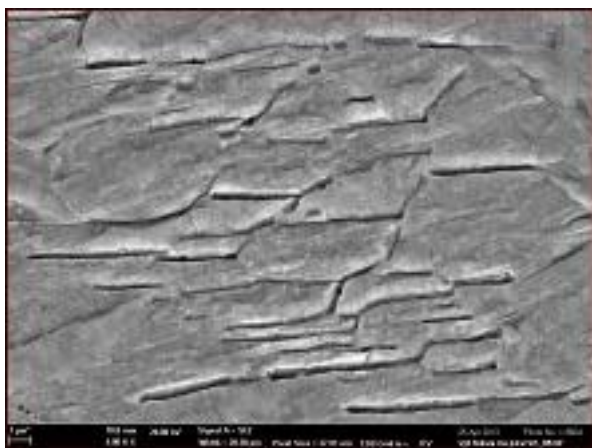
rovin martenzitických desek, které se daleko lépe leptají. Nejedná se o trhliny, což je patrné z Obr. 7.42.



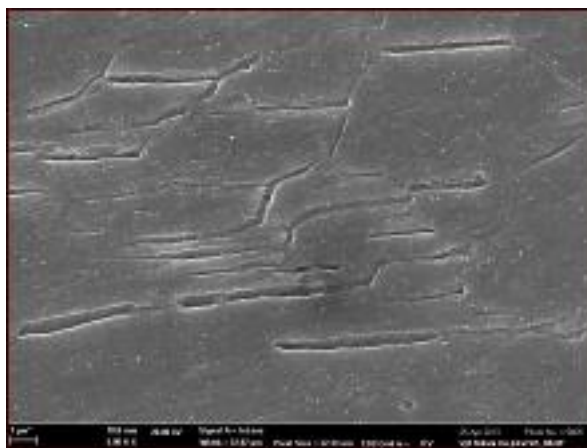
Obr. 7.41a) Svarový kov - 200x.



Obr. 7.41b) Svarový kov - 500x.



Obr. 7.42a) Přepletané oblasti ve SK.



Obr. 7.42b) Přepletané oblasti ve SK.



## 8 DISKUSE VÝSLEDKŮ

### 8.1 Vliv parametrů svařování na geometrii svaru

Pro praktické využití svařování elektronovým svazkem je nutné zjistit vliv významných parametrů svařování na tvar a rozměry výsledného průvaru. V této práci je popsán pouze vliv rychlosti svařování při stejném zaostření svazku a vliv zaostření svazku při stejné rychlosti.

Vzhledem k tomu, že se tvary a rozměry průvarů provedených na oceli AMS 5659 ve vytvrzeném stavu a po rozpouštěcím ohřevu téměř nelišily je hodnocení vlivu parametrů svařování na geometrii svaru provedeno na oceli AMS 5659 ve vytvrzeném stavu H1025. Z tohoto poznatku je možné poukázat na stabilitu a reprodukovatelnost svařovacího procesu.

#### 8.1.1 Rychlost svařování

Při vyšších rychlostech svařování je v místě dopadu paprsku absorbováno méně energie než při nižších rychlostech svařování. Dá se tedy očekávat pokles hloubky a šířky průvaru. Toto tvrzení lze potvrdit zjištěnými hodnotami rozměrů průvaru a tepelně ovlivněné oblasti uvedenými v Tab. 7.2.

Naopak při nižších rychlostech svařování, kdy je teplo výrazněji odváděno do okolí průvaru, narůstá i oblast, ve které teplota materiálu překročí teplotu tavení.

Z profilu závislosti hloubky průvaru na rychlosti svařování (Obr. 7.1) je vidět, že hloubka průvaru neklesá s rostoucí rychlostí svařování lineárně, ale mnohem pomaleji. Tento průběh je téměř shodný s průběhem na Obr. 3.9 (kapitola parametry svařování) udávaný literaturou [8], patrná odlišnost je způsobena nedostatečným počtem experimentálních hodnot.

Pokud je doba působení elektronového svazku kratší než relaxační doba  $\tau$  (rovnice 2.3), teplota v místě dopadu svazku roste lineárně podle rovnice (2.4).

V případě delšího působení teplota roste s  $t^n$ , kde  $n < 1$  (rovnice 2.6). Pomalejší růst teploty je dán odvodem tepla do okolí. Doba působení elektronového svazku na jedno místo je tedy nepřímo úměrná rychlosti svařování.

Jedním z důležitých parametrů hodnocení geometrie svaru je také poměr hloubky k šířce průvaru. V případě rychlosti svařování  $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  je hodnota poměru 8,0, při rychlosti  $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  je 11,5 a při  $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  je 11,0. Z tohoto hlediska by mohla být pro daný materiál a parametry svařování optimální rychlost svařování  $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Volba optimální rychlosti svařování je důležitá i z dalšího pohledu. Při nízkých rychlostech svařování se taví větší množství materiálu, které je vytlačováno k povrchu svaru a může dojít k nadměrnému převýšení svaru a k tvorbě dutin v oblasti kořene svaru. Naopak při vyšších rychlostech svařování může nastat výrazný pohyb taveniny, což vede k rozstříknutí taveniny do okolí nebo vzniku zápalu podél hlavy a kořene svaru.

### 8.1.2 Zaostření svazku

Z naměřených hodnot (Tab. 7.4) vyplývá, že průvar o maximální hloubce a minimální šířce vzniká v případě malých průvarů (do 10 mm) při svazku zaostřeném na povrch. Oproti hloubce průvaru se šířka s měnícím se zaostřením výrazně nemění.

V případě velkých hloubek průvarů lze očekávat změny v rozměrech při daném zaostření. Literatura [8, 2] udává, že pro dosažení hlubšího průvaru je výhodnější zaostření svazku mírně pod povrch vzorku. To se v našem případě nepotvrdilo. Nejhlubšího průvaru bylo dosaženo při zaostření svazku na povrch vzorku. Mohlo to být způsobeno tím, že se nejednalo o hluboké průvary, kde by se změna fokusace svazku výrazněji projevila. Literatura [8, 2] také udává možné snížení vzniku defektů v oblasti kořene průvaru zaostřením svazku pod povrch součásti, tento jev byl pozorován a je popsán v následující kapitole.

Graf na Obr. 7.2 znázorňuje hodnoty hloubky průvarů v závislosti na odchylce fokusačního proudu  $\Delta I_F$  od výchozí hodnoty (tzv. defokusace). Z profilu křivky je patrná podobnost se závislostí na Obr. 3.16 udávanou literaturou [4].

Hodnota poměru hloubky k šířce průvaru je v případě zaostření svazku pod povrch 4,8 při zaostření na povrch 11 a při zaostření nad povrch 7. Z tohoto hlediska by mohlo být pro daný materiál a parametry svařování optimální zaostření svazku na povrch součásti.

## 8.2 Vliv parametrů svařování na defekty v průvaru

Defekty v průvaru mohou být ovlivněny řadou parametrů svařování (proud svazku, vychylování a pulzace svazku, pozice svařování, pracovní tlak atd.) V této práci je posouzen pouze vliv rychlosti svařování při stejném zaostření svazku a vliv zaostření svazku při stejné rychlosti svařování. Vzhledem k tomu, že se defekty v průvaru u oceli AMS 5659 ve vytvrzeném stavu a po rozpouštěcím ohřevu téměř nelišily je hodnocení provedeno na oceli ASM 5659 ve vytvrzeném stavu H1025.

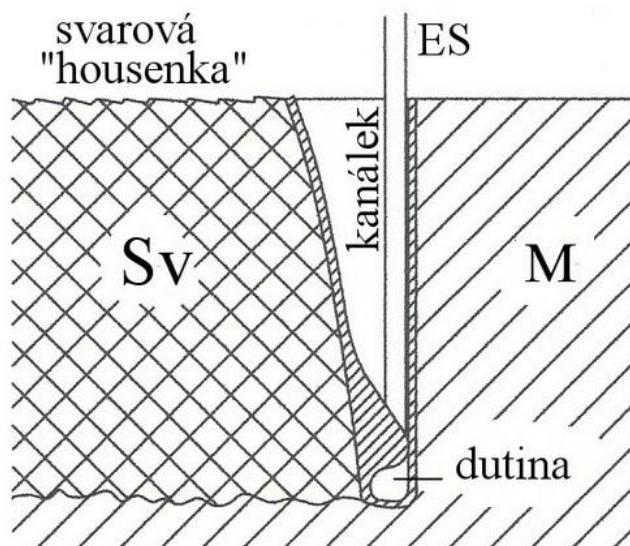
**Při různých rychlostech svařování** nejsou ve střední části průvaru, oblasti hlavy a tepelně ovlivněné oblasti nalezeny žádné zjevné vady. Defekty jsou pozorovány až v oblasti kořene průvaru.

V oblasti kořene průvaru je pozorováno několik dutin, které mají protáhlý oválný tvar v ose průvaru. Velikost některých dutin dosahuje hodnoty až 500  $\mu\text{m}$ . Při nejvyšší rychlosti svařování ( $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) je výskyt dutin výraznější oproti menším rychlostem svařování ( $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ), ale výskytu dutin se snížením rychlosti zcela nezabránilo.

Také jsou v oblasti kořene průvaru pozorovány tzv. řetízkovité nespojitosti. Jedná se o jistý druh studeného spoje. Vyskytují se převážně v neprůchozích svarech. Mohou vznikat v důsledku špatného zaplnění kapiláry taveninou. Ve spojení s vysokým polem napětí a deformacemi v oblasti průvaru mohou vést až ke vzniku trhlin.

**Při různém zaostření svazku** nejsou ve střední části průvaru, oblasti hlavy a tepelně ovlivněné oblasti nalezeny žádné zjevné vady. Defekty jsou ve stejné míře jako při rychlosti svařování ( $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) pozorovány v oblasti kořene průvaru při zaostření svazku na a nad povrch vzorku. V případě zaostření svazku pod vzorek nejsou v oblasti kořene průvaru pozorovány žádné defekty.

Tvorba dutin zejména při neprůchozích svařích je problém, který může souviset s tím, že se svařuje ve vakuu. Při zahřátí na vysokou teplotu v místě dopadu svazku dochází k uvolňování např. pohlcených plynů. Většinou tyto plyny stačí uniknout před začátkem tuhnutí. Někdy se však při svařování přesto vytvoří u kořene dutiny tím, že tavenina nestačí kapiláru zcela zaplnit (Obr. 8.1).



Obr. 8.1 Vznik dutin u kořene svaru [8].

Zabránění vzniku defektů v případě slepého svaru není zcela možné. Pouze vhodným řízením svařovacího procesu, který umožní únik plynných složek před ztuhnutím taveniny, lze tyto defekty snížit na takovou míru, že jsou v průvaru podle určitého klasifikačního stupně přípustné. Dá se toho dosáhnout několika způsoby:

- malou rychlostí svařování,
- fokusací svazku,
- opakovaným přetavením svaru,
- kmitajícím nebo kroužícím svazkem atd.

Dalším způsobem zamezení těchto defektů je vyhnout se neprůchozím svarům vhodným konstrukčním uspořádáním svarového spoje.

V případě vhodné rychlosti svařování a zaostření svazku je možné dosáhnout snížení defektů v oblasti kořene průvaru. Na druhou stranu toto přizpůsobení parametrů může vést ke vzniku mělkého a širokého průvaru s následnými většími deformacemi a tepelným ovlivněním okolí svaru, což není vždy vhodné.

Je třeba dodat, že defekty jsou pozorované v kolmém řezu pouze v jedné náhodně vybrané oblasti. Pro přesnější posouzení by bylo nutné provést několik dalších řezů, nebo využít některou z nedestruktivních metod hodnocení svaru, např. prozařovací, nebo ultrazvukovou metodu, popřípadě CT.

### 8.3 Měření tvrdosti v oblasti průvaru

Hodnocení tvrdosti na rozhraní svarového kovu (SK) a tepelně ovlivněné oblasti (TOO) základního materiálu (ZM) je důležitou součástí při hodnocení strukturní stability provedeného průvaru. Z výsledků tvrdosti byl viditelný průběh změn v tepelně ovlivněné oblasti a oblasti průvaru. Rozdíly v mechanických vlastnostech jednotlivých oblastí mohou mít negativní dopad na životnost svarového spoje během jeho provozu.

#### 8.3.1 Průběh tvrdosti průvaru u vzorku ve vytvrzeném stavu

Průběh tvrdosti pro jednotlivé parametry svařování (rychlost svařování, zaostření svazku) a jejich hodnoty se téměř neliší. Pouze se mění šířka jednotlivých oblastí v závislosti na množství vneseného tepla.

V tepelně ovlivněné oblasti dochází k poklesu tvrdosti až na hodnotu 360 HV<sub>0,2</sub>, která odpovídá přibližně tvrdosti dané oceli po rozpouštěcím ohřevu. Stupňovitý pokles tvrdosti je pravděpodobně způsoben rozpuštěním nebo zhrubnutím zpevňující precipitační fáze.

V případě nízké rychlosti svařování ( $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a zaostření svazku pod povrch vzorku je patrnější stupňovitý pokles tvrdosti směrem ke svarovému kovu oproti menším rychlostem svařování ( $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a zaostření svazku (zaostření na povrch a nad povrch vzorku). Je to dáno širší tepelně ovlivněnou oblastí, která souvisí s absorbováním většího množství energie než při nižších rychlostech svařování, nebo zaostření svazku na, případně nad povrch vzorku.

Hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu jsou také pro jednotlivé parametry svařování shodné a pohybují se od 375 do 385 HV<sub>0,2</sub>.

#### 8.3.2 Průběh tvrdosti průvaru u vzorku po rozpouštěcím ohřevu

Průběh tvrdosti pro jednotlivé parametry svařování (rychlost svařování, zaostření svazku) a jejich hodnoty se opět téměř neliší. Pouze se mění šířka jednotlivých oblastí v závislosti na množství vneseného tepla.

V tepelně ovlivněné oblasti dochází ke stupňovitému nárůstu tvrdosti až na hodnotu 440 HV<sub>0,2</sub> odpovídající tvrdosti oceli AMS 5659 ve vytvrzeném stavu H900, při kterém se dosahuje nejvyššího zpevnění (viz. Tab. 6.3 v kapitole Ocel AMS 5659). Nárůst tvrdosti je pravděpodobně způsoben vhodnými podmínkami pro mechanismus precipitačního zpevnění. V případě zpevnění tepelně ovlivněné oblasti se nejedná o rovnovážnou precipitaci, která probíhá při dané teplotě několik hodin, ale vhodnou kombinací vysoké teploty a doby na této teplotě může precipitační zpevnění proběhnout ve velice krátké době.

Výraznější stupňovitý nárůst tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti je také pozorován u nejnižší rychlosti svařování a zaostření svazku pod povrch vzorku.

Hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu jsou také pro jednotlivé parametry svařování shodné a pohybují se od 375 do 385 HV<sub>0,2</sub>.

Hodnoty tvrdosti svarového kovu jsou pro ocel AMS 5659 ve vytvrzeném stavu a po rozpouštěcím ohřevu shodné. Je to dáno stejnou hrubozrnnou strukturou svarového kovu, která vznikla po přetavení dané oblasti.

### **8.3.3 Průběh tvrdosti průvaru u znovu vytvrzeného vzorku**

Průběh tvrdosti pro jednotlivé parametry svařování (rychlost svařování, zaostření svazku) a jejich hodnoty se neliší.

Tvrdość základního materiálu po vytvrzení již vytvrzeného vzorku na stejný stav (H1025) se shoduje s původní hodnotou tvrdosti 400 až 410 HV<sub>0,2</sub>. Opakované vytvrzení na tentýž stav nemá tedy na změnu tvrdosti výrazný vliv.

V tepelně ovlivněné oblasti došlo k poklesu tvrdosti na hodnoty 380 HV<sub>0,2</sub>. Průběh tvrdosti vykazuje plynulejší přechod mezi základním materiálem a tepelně ovlivněnou oblastí směrem ke svarovému kovu. Vlivem vytvrzujícího procesu došlo v tepelně ovlivněné oblasti k vyrovnání výrazných přechodů mezi jednotlivými oblastmi, vzniklé tepelným ovlivněním, které jsou pozorovány na předchozích strukturních stavech.

Tvrdość svarového kovu se oproti tvrdosti základního materiálu po opětovném vytvrzení výrazně zvedla. Hodnoty tvrdosti při různých rychlostech svařování (20 mm.s<sup>-1</sup>, 10 mm.s<sup>-1</sup> a 5 mm.s<sup>-1</sup>) a zaostření svazku (zaostření na, pod a nad povrch vzorku) se pohybovaly od 445 do 455 HV<sub>0,2</sub>. Tyto hodnoty odpovídají tvrdosti oceli AMS 5659 ve vytvrzeném stavu H900, při kterém se dosahuje nejvyššího zpevnění (viz Tab. 6.3 v kapitole Ocel AMS 5659). Rozdíl precipitačního zpevnění v tepelně ovlivněné oblasti a svarovém kovu může být způsoben hrubozrnnou strukturou svarového kovu, kde jsou podmínky pro mechanismus vytvrzení výrazně odlišné oproti přetvářené jemnozrnné struktuře v oblasti základního materiálu případně tepelně ovlivněné oblasti.

### **8.3.4 Průběh tvrdosti průvaru u vzorku vytvrzeného po rozpouštěcím ohřevu**

Průběh tvrdosti pro jednotlivé parametry svařování (rychlost svařování, zaostření svazku) a jejich hodnoty se opět téměř neliší. Průběh tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti a svarovém kovu je shodný s průběhem tvrdosti u znovu vytvrzeného vzorku. Je to dáno stejným způsobem vytvrzení, kdy došlo v obou případech k rozdílné úrovni precipitačního zpevnění v oblasti svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti.

Tvrdość základního materiálu 400 až 410 HV<sub>0,2</sub> se shoduje s tvrdostí oceli AMS 5659 dodané ve vytvrzeném stavu H1025. Z toho lze usoudit, že námi provedený způsob a postup vytvrzení vzorku na požadovaný stav byl správný.

#### 8.4 Mikrostruktura průvaru a tepelně ovlivněné oblasti

Mikrostruktura základního materiálu po rozpouštěcím ohřevu je téměř vždy martenzitická s určitým podílem karbidické fáze, je to díky počátku martenzitické transformace ( $M_s$ ), která se pohybuje okolo teploty  $105^\circ\text{C}$ . Nicméně se ve struktuře může objevit i zbytkový austenit, ale to nebylo zjišťováno. V případě oceli AMS 5659 se jedná o nízkouhlíkový laťkový martenzit.

Místy jsou ve struktuře pozorovány karbidy Nb, literatura [40] udává možný výskyt dvou typů karbidů Nb, které mají FCC mřížku, první typ NbC obsahuje 87% Nb a druhý typ obsahuje 53% Nb. Také udává občasný výskyt částic bohatých na Cr typu  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , které při studiu mikrostruktury nejsou v martenzitické struktuře zjištěny.

Struktury jednotlivých oblastí průvaru a tepelně ovlivněné oblasti při různých výchozích stavech (vytvrzený stav a stav po rozpouštěcím ohřevu) se na světelném (SM) a elektronovém rastrovacím mikroskopu (REM) příliš nelišily. Je pozorována pouze změna velikosti zrna v tepelně ovlivněné oblasti oproti základnímu materiálu. Také struktura svarového kovu se vyznačuje hrubším zrnem s patrnou dendritickou morfologií, kde je pozorována orientace zrn ve směru nejvyššího odvodu tepla.

Nepříliš patrné rozdíly ve struktuře jsou dány tím, že jednotlivé pochody ve struktuře probíhají na manometrické úrovni. Jedná se o precipitační pochody, kdy vznikají precipitáty o velikosti několika nanometrů. V literatuře [35, 40] jsou popsány dvě fáze vzniku těchto jemných precipitátů. První fáze zpevnění probíhá precipitací při teplotě  $450$  až  $500^\circ\text{C}$ , kdy vznikají precipitáty o velikosti  $8 - 12$  nm tvořící charakteristický „herringbone“ vzor. Druhá fáze zpevnění je způsobena precipitací při teplotě  $550$  až  $750^\circ\text{C}$ , při které vznikají koherentní kulovité precipitáty o velikosti  $15$  nm bohaté na Cu s FCC strukturou.

Zmíněné precipitační pochody, které se ve struktuře odehrály v jednotlivých oblastech průvarů ve vytvrzeném stavu a stavu po rozpouštěcím ohřevu, jsou na tak malé úrovni, že metodami světelné (SM) a rastrovací elektronové mikroskopie (REM) nejsou zjistitelné. Pro podrobnější studium struktury v oblasti průvaru a tepelně ovlivněné oblasti by se muselo se využít např. transmisní elektronové mikroskopie.

Změny, ke kterým došlo v průvaru a tepelně ovlivněné oblasti jsou patrné pouze z hodnot tvrdosti, které jsou zpracovány v předchozích kapitolách. Z profilu průběhu tvrdosti je viditelné, že k ovlivnění základního materiálu došlo ve větší míře a vzdálenosti od svarového kovu než je patrné ze struktur přechodu mezi základním materiálem a tepelně ovlivněnou oblastí.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo provést rozbor problematiky svařování precipitačně vytvrditelné oceli AMS 5659, používané v průmyslu pro hydraulické válce, pomocí elektronového svazku. K objasnění příčin a následků jednotlivých problémů bylo použito dostupné literatury a provedeno vyhodnocení experimentálních průvarů na dané oceli.

Teoretický rozbor slouží jako obecný přehled k porozumění základních principů technologie využívající vysokoenergiový paprsek. Seznamuje také s konkrétním využitím elektronového svazku v oblasti svařování.

Experimentální část popisuje provedení průvarů na oceli AMS 5659 a přípravu vzorků pro hodnocení strukturní stability průvarů a tepelně ovlivněné oblasti. Část zabývající se studiem průvaru a tepelně ovlivněné oblasti popisuje vliv jednotlivých parametrů svařování na geometrii průvaru, vznik defektů a strukturní změny.

Pro vyhodnocení a srovnání vlastností oceli v oblasti průvaru a tepelně ovlivněné oblasti bylo použito metod světelné mikroskopie (SM), rastrovací elektronová mikroskopie (REM) a metody měření tvrdosti dle Vickerse.

Výsledky dosažené z jednotlivých metod hodnocení průvaru se vyznačovaly dobrou shodou se získanými teoretickými poznatky o daném materiálu a technologii svařování.

Na základě pozorovaných a získaných dat byla potvrzena možnost svařování dané oceli pomocí elektronového svazku. Přesto pro určení vhodnosti nasazení technologie svařování svazkem elektronů pro průmyslovou výrobu hydraulických válců je třeba doplnit získané informace v této práci o další hodnocení mechanických vlastností a detailnější popis strukturních změn.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] VISSER, A. *Werkstoffabtrag durch Elektronen-und Photonenstrahlen*. Bern: Technische Runhschau, 1972. Český překlad L. Zobač, ÚPT AV ČR.
- [2] SCHULTZ, H. *Electron beam welding*. Cambridge: Abington, 1993. 232 s. ISBN 18-557-3050-2.
- [3] Laboratoř mikroskopie atomárních sil. *Doplňkové texty různého založení* [online]. 24. 2. 2011 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/TEM-teorie.pdf>
- [4] TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvarania*. 1.vyd. Bratislava: Alfa, 1989. 383 s. ISBN 80-05-00097-9.
- [5] MELEKA, A. H. *Electron-beam Welding: Principles and Practice*. London: McGRAW-HILL, 1971, 331 s. ISBN 07-094218-8.
- [6] 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.
- [7] ZOBAČ, M. *Řízení a diagnostika elektronového svazku pro pokročilé technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 158 s. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.
- [8] ZOBAČ, L. *Praktická příručka pro uživatele elektronové svářečky*. Brno, 2007. 29 s. <http://ebt.isibrno.cz/knihy/prirucka/proces-vnikani-svazku-do-hloubky>
- [9] STEIGERWALD STRAHLTECHNIK SST [online]. Dostupné z <http://www.steigerwald-eb.de/en/>.
- [10] PRO-BEAM [online]. Dostupné z <http://www.pro-beam.de/>.
- [11] VOLKER, A., UWE, C., DOBENECK, D., KRÜSSEL, T., LÖWER, T. *Electron Beam Welding: The fundamentals of a fascinating technology*. 1. vyd. Germany: pro-beam AG & Co. KGaA, 2011.
- [12] Vráblík et al. Electron beam welding – a key technology to construct vehicles for road, rail, sea, air and space. In ; Metal, 2010.
- [13] Podklady firmy pro-beam AG & Co.KGaA
- [14] Zobač, L. *Vakuová technika*. Praha: SNTL, 1954
- [15] TŘÍSKA, V. *Technologie výroby letadel: nerozebíratelné spojování, odlévání a tvářeni*. Vyd. 1. Brno: Univerzita obrany, 2007, 118 s. ISBN 978-80-7231-303-7.



- [16] PREPARED UNDER THE DIRECTION OF THE ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. *ASM handbook*. 1st print. Materials Park: ASM International, 2011, 920 s. ISBN 978-1-61503-133-7.
- [17] ŽÁK, J., NOVÁK, M. *Teorie svařování*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1988, 142 s.
- [18] OCHODEK, V. Struktura svaru, In: *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů (kolektiv autorů)*. 2. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- [19] KUNCIPÁL, J. *Teorie svařování: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní fakulty vysokých škol technických*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [20] PILOUS, V. *Technologie kovových materiálů*. 2. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008, 125 s. ISBN 978-80-7043-699-8.
- [21] BARTÁK, J., PILOUS, V., KOVAŘÍK, R. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. Ostrava: ZEROSS, 2002, 418 s. ISBN 80-85771-97-7.
- [22] SHWARZ, D. *Hodnocení svarových spojů* [on-line]. 31.8.2009. [cit.2013-05-26] Dostupné z: < [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2009-2\\_Hodnocen%C3%AD%20svarov%C3%BDch%20spoj%C5%AF.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2009-2_Hodnocen%C3%AD%20svarov%C3%BDch%20spoj%C5%AF.pdf) >
- [23] SILBERNAGEL, A. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. Vyd. 1. Editor Donald S Lopez. Ostrava: Kovosil, 2011, 284 s. Princeton readings in religions. ISBN 978-80-903694-6-7.
- [24] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [25] LAI, J.K.L, Kin H.L., Chan, H. S. *Stainless steels: an introduction and their recent developments* [online]. Dubai, United Arab Emirates: Bentham eBooks, 2012, s. 64-70 [cit. 2013-05-26]. ISBN 978-1-60805-305-6.
- [26] Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *MM Průmyslové spektrum*. 2003, roč. 2003, č. 7 s 46.
- [27] LAI, J.K.L, Kin H.L., Chan, H. S. *Stainless steels: an introduction and their recent developments* [online]. Dubai, United Arab Emirates: Bentham eBooks, 2012, s. 64-70 [cit. 2013-05-26]. ISBN 978-1-60805-305-6.
- [28] DUPÁK, J., VLČEK, I. Elektronové dělo pro svařování v přístrojové technice. *Jemná mechanika a optika*, 1999, roč. 44, č. 7-8, s. 239-241. ISSN 0447-6441.
- [29] Vlček, I., Zobač, M., Dupák, L., Dupák, J., Kapounek, P. [Prototyp stolní elektronové svářečky MEBW-60/2](#). *Jemná mechanika a optika*, 2008, roč. 53, č. 1 s. 27-29, ISSN 0447-6441.

- [30] Vlček, I., Zobač M. Křížový stolek do stolní elektronové svářečky. *Jemná mechanika a optika*, 2008, roč. 51, č. 11-12, s. 214–216, ISSN 0447–6441.
- [31] BOSCH. Controller Area Network (CAN) Specification - Version 2.0. Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 1991.
- [32] MICROSOFT. *Dynamic Data Exchange* [online]. [cit. 13. 7. 2009]. Dostupné z: [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms648711\(VS.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms648711(VS.85).aspx).
- [33] HABIBI, H.R. Atomic structure of the Cu precipitates in two stages hardening in maraging steel. *Materials Letters* [online]. 2005, vol. 59, 14-15, s. 1824-1827 [cit. 2013-05-26]. DOI: 10.1016/j.matlet.2004.09.058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X05001278>
- [34] AGHAIE-KHAFRI, M., ZARGARAN A. High temperature tensile behavior of a PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2010, vol. 527, 18-19, s. 4727-4732 [cit. 2013-05-26]. DOI: 10.1016/j.msea.2010.03.099. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509310003862>
- [35] AGHAIE-KHAFRI, M., ADHAMI F. Hot deformation of 15-5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2010, vol. 527, 4-5, s. 1052-1057 [cit. 2013-05-26]. DOI: 10.1016/j.msea.2009.09.032. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092150930901079X>
- [36] Podklady firmy Jihlavan a.s.
- [37] International GmbH - Special Materials/Aerospace. *Böhler International GmbH* [online]. 2011 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://www.boehler-international.com/N701DE.pdf>
- [38] MAZANEC, Karel a Ludmila HYSPECKÁ. *Fyzikálně metalurgické vlastnosti martenzitu ocelí*. 1. vyd. Praha: Academia, 1983, 172 s.
- [39] Martensite. *Industrial Heating Thermal processing technical journal covering heat treating* [online]. 2013- [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://www.industrialheating.com/articles/90008-martensite>
- [40] HABIBI BAJGUIRANI, H.R. The effect of ageing upon the microstructure and mechanical properties of type 15-5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2002, vol. 338, 1-2, s. 142-159 [cit. 2013-05-26]. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00062-X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092150930200062X>
- [41] DOLEŽAL, P., PACAL, B. Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálu. [online]. 8. 4. 2013 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>

- [42] Labexchange - Datenschutzerklärung. [online]. 13. 2. 2013 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z:  
[http://www.labexchange.com/en/buydevices/d/?sn=16681&tx\\_labexchange\\_pi3\[archiv\]=1](http://www.labexchange.com/en/buydevices/d/?sn=16681&tx_labexchange_pi3[archiv]=1)
- [43] NETME Centre. [online]. Fakulta strojního inženýrství – Vysoké učení technické v Brně, 2013- [cit. 2013-05-26]. Dostupné z:  
<http://www.netme.cz/aktualita/24/Novinky%20ve%20vybaven%C3%AD%20laborato%C5%99%C3%AD%20divize%20AMM,elektronov%C3%ADmikroskop>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

1 Výkres hydraulického válce.....	11
1.1 Wolframové vlákno a krystal LaB <sub>6</sub> .....	13
1.2 Hustota výkonu elektronového svazku a průměr svazku .....	14
1.3 Vliv elektrického pole na elektron.....	16
1.4 Vliv magnetického pole na pohybující se elektron.....	17
1.5 Optická soustava.....	19
1.6 Srovnání závislostí difrakční, sférické, chromatické a „tepelné“ vady .....	20
2.1 Graf závislosti relaxačního času $\tau$ na teplotní difuzivitě různé hodnoty R a $d/2$ ..	23
2.2 Praktická hloubka vniku elektronů v závislosti na urychlovacím napětí.....	24
2.3 Povrchové jevy .....	25
2.4 Průběh vzniku svaru.....	26
2.5 Analýza sil působících v kapiláře .....	26
2.6 Nesymetrické rozložení teploty v okolí klíčové dírky .....	27
2.7 Detail svarové housenky .....	27
3.1 Elektronové svářečky .....	28
3.2 Třibodové svařování ozubených kol.....	29
3.3 Filtr pevných částic.....	29
3.4 Schéma vícepráskové technologie za předehřevu a současného svařování ....	29
3.5 Elektronové dělo .....	30
3.6 Schéma magnetické fokusační čočky .....	31
3.7 Schéma deflektoru .....	31
3.8 Závislost rychlosti svařování na hloubce průvaru.....	33
3.9 Závislost hloubky průvaru na výkonu svazku .....	34
3.10 Různé efekty při svařování.....	34
3.11 Vliv proudu svazku a urychlovacího napětí na průměr svazku.....	35
3.12 Vliv fokusačního proudu $I_F$ na polohu zaostření .....	35
3.13 Vliv zaostření svazku na tvorbu dutin.....	36
3.14 Závislost hloubky průvaru na průměru svazku $d_F$ při různém zaostření .....	36
3.15 Závislost hloubky průvaru na fokusačním proudu $I_L$ .....	37
3.16 Závislost hloubky svaru na pracovním tlaku.....	38
4.1 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje.....	40
6.1 Elektronová svářečka MEBW 60/2.....	45

6.2	Uspořádání fyzikální části a vakuového systému elektronové svářečky. ....	45
6.3	Schéma elektronového děla svářečky MEBW 60/2.....	46
6.4	Držák katody s řídicí elektrodou .....	47
6.5	Elektronové dělo .....	47
6.6	Schéma optické soustavy elektronového děla .....	48
6.7	Pracovní komora a vakuový systém MEBW 60/ .....	48
6.8	Křížový stolek.....	49
6.9	Blokové schéma řízení elektronové svářečky MEBW 60/2 .....	49
6.10	Zdroj vysokého napětí.....	50
6.11	Zobrazení pomocí bočního detektoru a osového detektoru .....	51
6.12	Ovládací panel svářečky EMBW 60/2 a grafický displej.....	51
6.13	Snímek uživatelského rozhraní PC software svářečky EMBW 60/2.....	52
6.14	Mikrostruktura deskového martenzitu .....	54
6.15	Substruktura deskového martenzitu.....	54
6.16	Dvojčata v deskovém martenzitu .....	55
6.17	Karbidy NbC v martenzitu a karbidy NbC z extrakční repliky .....	55
6.18	Karbidy Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> v martenzitu a karbidy Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> z extrakční repliky .....	55
6.19	Závislost tvrdosti na teplotě vytvrzení (čas vytvrzení 2 hod) .....	56
6.20	Precipitáty Cu po vytvrzení na 500°C po 2 hodin .....	56
6.21	Kulovitý precipitát Cu po vytvrzení na 650 °C .....	57
6.22	Kulovitý tvar precipitátu po vytvrzení na 700°C po dobu 2 hod, difrakční obraz. 57	
6.23	Náčrt provedení experimentálních průvarů. ....	59
6.24	Provedené experimentální průvary. ....	59
6.25	Náčrt odebrání vzorků a zalisované vzorky.....	59
6.26	Elektronový rastrovací mikroskop Zeiss a světelný mikroskop Olympus GX-51	60
7.1	Závislost hloubky průvaru na rychlosti svařování. ....	61
7.2	Závislost hloubky průvaru na rozostření svazku.....	63
7.3	Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 20 \text{ mm.s}^{-1}$ ....	64
7.4	Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ....	65
7.5	Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 5 \text{ mm.s}^{-1}$ .....	65
7.6	Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ....	66
7.7	Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku nad povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ...	67
7.8	Defekty v kořeni průvaru, zaostření svazku pod povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ...	67
7.9	Řada vtisků v oblasti průvaru. ....	68

7.10 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 20 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	68
7.11 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	69
7.12 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 5 \text{ mm.s}^{-1}$ ....	69
7.13 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku pod povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	70
7.14 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	70
7.15 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku nad povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	71
7.16 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 20 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	71
7.17 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	72
7.18 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 5 \text{ mm.s}^{-1}$ ....	72
7.19 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku pod povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	73
7.20 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	73
7.21 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku nad povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	74
7.22 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 20 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	74
7.23 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	75
7.24 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 5 \text{ mm.s}^{-1}$ ....	75
7.25 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku pod povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	76
7.26 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	76
7.27 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku nad povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	77
7.28 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 20 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	77
7.29 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	78
7.30 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 5 \text{ mm.s}^{-1}$ ....	78
7.31 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku pod povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	79
7.32 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku na povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	79
7.33 Průběh tvrdosti v průvaru, zaostření svazku nad povrch vzorku, $v_s = 10 \text{ mm.s}^{-1}$ ..	80
7.34 Oblasti hodnocení mikrostruktury .....	80
7.35a) Základní materiál .....	80
7.35b) Základní materiál, detail .....	80
7.36a) Karbidy NbC v ZM .....	81
7.36b) Karbidy NbC v ZM .....	81
7.37a) Tepelně ovlivněná oblast .....	82
7.37b) Tepelně ovlivněná oblast .....	82
7.38a) Přejít mezi ZM a TOO .....	81
7.38b) Přejít mezi ZM a TOO .....	81
7.39a) Přejít mezi SK a TOO .....	81
7.39b) Přejít mezi SK a TOO .....	81

7.40a) Přejchod mezi SK a TOO .....	82
7.40b) Přejchod mezi SK a TOO .....	82
7.41a) Karbidy Nb na rothraí SK a TOO .....	82
7.41b) Karbidy Nb na rothraí SK a TOO .....	82
7.42a) Svarový kov .....	83
7.42b) Svarový kov .....	83
7.43a) Přejleptané oblasti SK .....	83
7.43b) Přejleptané oblasti SK .....	83
8.1 Vznik dutin u kořene svaru.....	86

**SEZNAM TABULEK**

1.1 Fyzikální vlastnosti elektronu .....	12
1.2 Srovnání různých zdrojů tepla.....	15
1.3 Hustoty výkonu elektronového svazku pro různé aplikace.....	15
2.1 Tepelné koeficienty pro vybrané materiály.....	22
2.2 Hloubka vniku elektronů (v $\mu\text{m}$ ) pro vybrané materiály .....	25
5.1 Chemické složení běžně používaných martenzitických PH oceli .....	43
5.2 Chemické složení austenitických PH oceli .....	43
5.3 Chemické složení semiaustenitických PH oceli .....	44
6.1 Základní technické parametry svářečky MEBW 60/2.....	46
6.2 Chemické složení oceli AMS 5659.....	53
6.3 Mechanické vlastnosti oceli AMS 5659 .....	53
6.4 Parametry tepelného zpracování oceli AMS 5659 .....	53
6.5 Parametry elektronového svazku při experimentu. ....	58
6.6 Tvrdost dle Vickerse - oblasti zkušebního zatížení pro kovové materiály .....	60
7.1 Parametry elektronového svazku při experimentu. ....	61
7.2 Hodnoty rozměrů průvarů pro různé rychlosti svařování.....	62
7.3 Parametry elektronového svazku při experiment. ....	62
7.4 Hodnoty rozměrů průvarů pro různé zaostření svazku.....	63
7.5 Parametry elektronového svazku při experimentu. ....	64
7.6 Parametry elektronového svazku při experimentu. ....	66



**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK****Fyzikální a matematické konstanty**

$A$	Konstanta emise	$40 - 70 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$
$c$	Rychlost světla	$299\,792 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
$e$	Elementární elektrický náboj	$-1,602\cdot 10^{-19} \text{ C}$
$e$	Eulerovo číslo	$2,71828$
$h$	Planckova konstanta	$6,626\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$
$k$	Boltzmannova konstanta	$1,38\cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
$m_e$	Klidová hmotnost elektronu	$9,1\cdot 10^{-31} \text{ kg}$
$r_e$	Poloměr elektronu	$2,818\cdot 10^{-15} \text{ m}$
$\mu_0$	Permeabilita vakua	$1,2566\cdot 10^{-6} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$

**Symboly**

$a$	Koeficient tepelné vodivosti (2.2, str. 21)	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
$A$	Práce potřebná na přemístění náboje (1.7, str. 15)	J
$A$	Anoda (str. 30)	-
$A_{C1}$	Teplota transformace austenitu na ferit (str. 40)	$^{\circ}\text{C}$
$A_{C3}$	Teplota eutektoidní přeměny (str. 40)	$^{\circ}\text{C}$
$B_e$	Magnetická indukce (1.13, str. 15)	T
$c$	Měrná tepelná kapacita (2.2, str. 21)	$\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$\bar{c}$	Střední hodnota tepelné kapacity (2.5, str. 22)	$\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$d$	Průměr svazku (2.3, str. 22)	mm
$D/f$	Světelnost čočky (1.18, str. 19)	$\mu\text{m}$
$d_b$	Vada způsobená difrakcí elektronů (1.18, str. 19)	-
$d_{dt}$	Vada způsobená tepelný pohyb elektronů (1.20, str. 19)	-
$d_F$	Průměr svazku (str. 36)	mm
$d_{Fopt}$	Optimální průměr svazku v ohnisku (1.5, str. 14)	mm
$d_{ch}$	Chromatická vada (1.19, str. 19)	-
$E$	Intenzita elektrického pole (1.6, str. 15)	$\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$
$e\cdot\varphi_0$	Výstupní práce elektronu (1.4, str. 14)	eV
$E_0$	Dopadající energie v bodě (2.2, str. 21)	J
$E_E$	Energie elektronu (str. 12)	W s
$f$	Ohnisková vzdálenost (1.17, str. 18)	mm
$F$	Síla (1.6, str. 15)	N
$F_0$	Velikost emitující plochy (1.1, str. 12)	$\text{mm}^{-2}$
$F_1$	Síla tlaku elektronového svazku (str. 26)	N
$F_2$	Elektromagnetická síla vnikající od svazku ele. (str. 26)	N
$F_3$	Síla reakce na odpařování (str. 26)	N
$F_4$	Statický tlak par v kapiláře (str. 26)	N

F5	Síla vznikající z povrchového napětí (str. 26)	N
F6	Gravitační síla (str. 26)	N
F7	Hydrostatická síla tekutého kovu (str. 26)	N
H	Intenzita magnetického pole (1.15, str. 18)	[A.cm <sup>-1</sup> ].
I <sub>F</sub>	Proud svazku (str. 35)	mA
I <sub>L</sub>	Proud svazku (1.19, str. 19)	mA
I <sub>S</sub>	Stálý proud svazku (1.5, str. 14)	mA
I <sub>S</sub>	Proud svazku (str. 36)	mA
J <sub>e</sub>	Hustota emisního proudu (1.4, str. 14)	A cm <sup>-2</sup>
K	Katoda (str. 30)	-
l	Délka dráhy elektronu ve vychylujícím poli (1.15, str. 18)	cm
M	Zmenšení (1.17, str. 18)	-
N <sub>1opt</sub>	Optimální hustota výkonu svazku v ohnisku (1.5, str. 14)	W cm <sup>-2</sup>
O	Fokusační čočka (str. 30)	-
P <sub>0</sub>	Plošná hustota výkonu (1.1, str. 12)	W mm <sup>-2</sup>
p <sub>A</sub>	Absorpce výkonu na jednotku objemu (2.4, str. 22)	W mm <sup>-3</sup>
r	Vzdálenost od bodového zdroje (2.2, str. 21)	mm
R	Hloubka vniku elektronů (2.3, str. 22)	μm
r <sub>0</sub>	Kruhová emisní ploška (1.2, str. 12)	mm
R <sub>0</sub>	Směrová hustota (1.1, str. 12)	A cm <sup>-2</sup>
r <sub>k</sub>	Poloměr katody (1.20, str. 19)	mm
R <sub>pr</sub>	Hloubka vniku elektronů (2.7, str. 24)	mm
t	Čas od počátku působení elektronového svazku (2.2, str. 21)	s
T	Absolutní teplota (str. 13)	°C
T <sub>(max,t)</sub>	Maximální absorpce energie (2.6, str. 23)	J
T <sub>(r,t)</sub>	Diferenciální rovnice vedení tepla (2.2, str. 21)	-
tgΘ	Vychýlení elektrický polem (1.15, str. 18)	°
U	Rozdíl potenciálů (1.7, str. 15)	V
U <sub>B</sub>	Urychlovací napětí (str. 12)	V
U <sub>T</sub>	Napětí odpovídající tepelné energii elektronu (1.3, str. 13)	V
v	Rychlost elektronu (1.8, str. 15)	m.s <sup>-1</sup>
V	Deflektor (str. 30)	-
v <sub>e</sub>	Rychlost elektronu (str. 12)	m s <sup>-1</sup>
W	Wehneltův válec (str. 30)	-
W <sub>k</sub>	Práce spotřebovaná na udělení kinetické energie (1.8, str. 15)	J
z	Hloubka max. absorpce výkonu (2.4, str. 22)	mm
α	Aperturní úhel svazku (1.21, str. 20)	°
α <sub>0</sub>	Úhel mezi směrem vektoru rychlosti a směrem magnetických siločar (1.2, str. 12)	°
α <sub>0</sub>	Vstupní úhel divergence (1.17, str. 18)	°
α <sub>1</sub>	Výstupní úhel divergence (1.17, str. 18)	°

$\delta_{oe}$	Sférická vada (1.21, str. 20)	-
$\epsilon_w$	Koeficient ztráty energie (2.8, str. 24)	-
$\kappa$	Elektrická vodivost (2.1, str. 21)	S
$\lambda$	Koeficient tepelné vodivosti (2.3, str. 22)	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_e$	Vlnová délka (str. 12)	$\mu m$
$\Sigma \epsilon_F$	Celkové teplo fázových přeměn (2.5, str. 22)	J
$\tau$	Doba transferu energie (2.1, str. 21)	s
$\tau_{50}$	Relaxační čas pro hloubku vniku $R = 50 \mu m$ (str. 24)	s
$\tau_d$	Relaxační čas pro průměr svazku (2.3, str. 22)	$\mu s$
$\tau_R$	Relaxační čas pro hloubku vniku (2.3, str. 22)	$\mu s$
$\varphi$	Hustota (2.4, str. 22)	$g.cm^{-3}$
$\bar{\rho}$	Střední hodnota hustoty (2.5, str. 22)	$g.cm^{-3}$
$\nu$	Kmitočet (str. 12)	Hz
$\Omega$	Prostorový úhel (1.1, str. 12)	$^{\circ}$

### Zkratky

AMS	Aerospace Material Specification
BCC	Mřížka kubická prostorově středěná
CT	Rentgenová tomografie
DDE	Dynamic Data Exchange
EBSD	Difrakce zpětně odražených elektronů
EDS	Energiově disperzní spektroskopie
EMBW	Micro Electron Beam Welder
ET	Metoda vířivých proudů
FCC	Mřížka kubická plošně centrovaná
HV	Měření tvrdosti dle vickerse
LaB <sub>6</sub>	Lanthan hexaborid
MAG	Označujeme poloautomatické svařování kovů v ochranné atmosféře inertního aktivního plynu.
MT	Magnetická prášková metoda
NDT	Nedestruktivní zkoušky svarů
PH	Precipitačně vytvrditelná ocel
PT	Kapilární (penetrační) metoda
REM	Rastrovací elektronová mikroskopie
ROS	Svařování ručně obalenou elektrodou
RT	Prozařovací metoda
SK	Svarový kov
SM	Světelná mikroskopie
TIG	Obloukové svařování v inertní atmosféře neroztavitelnou wolframovou elektrodou
TOO	Tepelně ovlivněná oblast

UT	Ultrazvuková metoda
VT	Vizuální kontrola
WDS	Vlnově disperzní spektroskopie
ZM	Základní materiál

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1      Materiálový list oceli AMS 5659 [36].

Příloha 2      Protokol o chemickém složení.