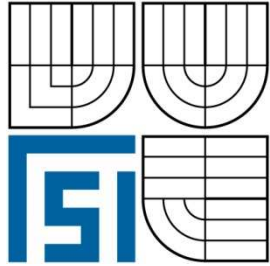


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA APLIKACÍ SVAZKU ELEKTRONŮ V PRŮMYSLU

ANALYSIS OF APPLICATION ELECTRON BEAM IN INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN RUDYK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAROSLAV KUBÍČEK

BRNO 2011

Zadání

Licenční smlouva

ABSTRAKT**Martin RUDYK: Analýza aplikací svazku elektronů v průmyslu**

Tato bakalářská práce analyzuje jednotlivé aplikace využití svazku elektronů v průmyslové praxi, jako je svařování, obrábění, navařování, tepelné zpracování materiálu a gravírování. Rovněž srovnává jednotlivé aplikace s obdobnou metodou speciálního tavného svařování jako je svařování laserem. Popisuje jeho výhody a nevýhody, principy vzniku svazku, apod. V práci je popsáno svařovací zařízení, jeho popis, funkce, popis svarových spojů pro různé materiály, svažitelnost různých materiálů.

Klíčová slova: Elektron, svazek, svařování, energie, laser

ABSTRACT**Martin RUDYK: Analysis of application electron beam in industry**

The bachelor's thesis analyses individual methods of usage electron beam in an industrial practice, as a welding, machining, deposition, heat treatment material and gravure. As well it compares individual application with analogous method of special fusing welding like a laser welding. It describes his benefits and disadvantages, principles of the beam rise, etc. In the thesis a welding equipment, its function, weld metal connections for various materials, weldability of the different materials are described.

Key words: Electron, beam, welding, energy, laser

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RUDYK, Martin. *Analýza aplikací svazku elektronů v průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s. , Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Analýza aplikací svazku elektronů v průmyslu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 10. října 2011

.....
Podpis

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi, Ing. Ladislavu Zobačovi, Ing. Martinu Zobačovi, Ph.D., RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání	
Licenční smlouva	
Abstrakt	
Prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
1 Úvod [2].....	9
1.1 Vznik svarového spoje.....	9
2 Rozdělení metod svařování [2].....	9
2.1 Rozdělení metod svařování dle normy ČSN EN 34063, resp. ČSN ISO 857 [2].....	10
2.2 Speciální metody tavného svařování [1], [2].....	11
2.2.1 Svařování plazmou.....	12
2.2.2 Svařování laserem.....	13
2.2.3 Svařování svazkem elektronů.....	14
3 Svařování svazkem elektronů [2], [3], [8], [6], [7].....	15
3.1 Historie [3], [8].....	15
3.1.1 Vývoj elektronového svařování u nás [8].....	16
3.2 Vytvoření a interakce svazku elektronů [3], [6], [7].....	20
3.2.1 Volné elektrony.....	20
3.2.2 Pohyb elektronů, urychlení elektrickým polem.....	20
3.2.3 Vliv magnetického pole, význam.....	22
3.2.4 Přeměna kinetické energie elektronů na tepelnou.....	24
3.2.5 Chování svazku elektronů při interakci s kovem.....	24
3.3 Konstrukce elektronové svářečky.....	28
3.3.1 Základní části a rozdělení svářeček [3], [10], [11].....	28
3.3.2 Elektronová tryska.....	31
3.3.3 Pracovní komora.....	34
3.3.4 Polohovací zařízení [3].....	36
3.3.5 Zdroj vysokého napětí a řídicí systémy.....	37
3.3.6 Čerpací systém [4].....	38
3.4 Svařitelnost materiálů [3], [7].....	38
3.4.1 Legované materiály a oceli.....	39
3.4.2 Kovy s vysokou teplotou tavení (W, Mo, Ta, Zr).....	39
3.4.3 Hliník.....	40
3.4.4 Měď a její slitiny.....	40
3.4.5 Titan a jeho slitiny.....	40
3.4.6 Nikl a jeho slitiny.....	40
3.4.7 Svařování odlišných materiálů.....	41
3.4.8 Výhody, nevýhody, využití svařování svazkem elektronů.....	42
4.1 Fyzikální podstata, parametry, chování obou druhů paprsků.....	45
4.2 Srovnání obou metod při obrábění [4].....	46
5 Aplikace využívající svazku elektronů [3], [10], [12].....	47
5.1 Děrování [3], [10], [12] (angl. drilling).....	47
5.1.1 Historie.....	47
5.1.2 Princip metody.....	48

5.1.3 Pracovní režimy.....	48
5.1.4 Obrobitelnost materiálů.....	49
5.2 Tepelné zpracování povrchové vrstvy [3], [5], [9], [11] (angl. surface treatment).....	49
5.2.1 Žíhání [11] (angl. annealing).....	52
5.2.2 Kalení [11] (angl. hardening).....	52
5.2.3 Přetavení [3], [8], [11] (angl. remelting).....	52
5.2.4 Navařování [5], [11] (angl. deposition).....	53
5.2.5 Povlakování [5], [11] (angl. coating).....	54
5.3 Texturování a gravírování [10], [13], [14] (angl. texturing).....	54
Závěr.....	56
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých zkratk a symbolů	

1 ÚVOD [2]

Všeobecně lze svařování definovat jako nerozebíratelné spojování dvou částí materiálů za současného působení tepla při teplotě tavení obou materiálů nebo tlaku, který vyvolá deformaci kontaktních ploch.

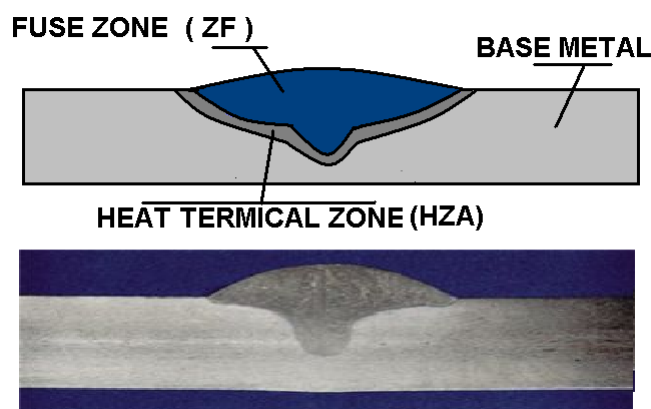
Při tavném svařování může nebo nemusí být použitý přídavný materiál. Tento má tavicí teplotu stejnou nebo blízkou teplotě tavení základních materiálů.

1.1 Vznik svarového spoje

Vlastní spojení se vytvoří za působení meziatomových sil a adhezních vazeb na teplem nebo tlakem aktivovaných kontaktních plochách. U pevných látek se vyskytují různé typy vazeb, kterým odpovídají různé typy rozložení elektronů a iontů. Ionty jsou v atomu uspořádány tak, aby potenciální energie krystalu byla co možná nejmenší. Základem vazby je mrak valenčních elektronů, které mohou volně přecházet od atomu k atomu. Ke kovové vazbě dochází tehdy, když přitažlivé síly mezi kovovými ionty a elektronovým mrakem převyšují odpudivé síly elektronů v tomto mraku. Ionty jsou uspořádány podle přesně definovaného rozložení, podle něhož v pevných látkách existují mezi ionty síly přitažlivé a odpudivé. Mezi druhy aktivační energie patří termická, mechanická a radiační aktivace.

2 ROZDĚLENÍ METOD SVAŘOVÁNÍ [2]

Základními druhy metod svařování jsou tavné a tlakové svařování. U **tavného svařování** je svarového spoje dosaženo přivedením tepelné energie do oblasti svaru. Zde dochází k natavení základního, popř. přídavného materiálu. Tekutá fáze je potom navázána na povrch tuhé fáze adhezními silami. Během tuhnutí taveniny se slabé adhezní síly mění na chemickou vazbu ve formě krystalové mřížky. Rostou nová zrna a původní rozhraní zaniká. Kolem svarového kovu je pásmo, kde dosáhla teplota rekrytalizační hodnoty tzv. tepelně ovlivněná oblast (heat thermal zone) obr. 1.1.



Obr. 2.1 Struktura svarového spoje při tavném svařování [2]

U tlakové metody svařování vzniká spoj za působení mechanické energie. Dojde k aktivaci povrchových atomů a makro nebo mikrodeformací se přiblíží spojované povrchy na vzdálenost působení meziatomových sil a následně je vytvořen vlastní spoj.

U obou těchto základních výše uvedených způsobů je zapotřebí překonat energetickou hladinu potenciální energie na rozhraní spojovaných ploch.

2.1 Rozdělení metod svařování dle normy ČSN EN 34063, resp. ČSN ISO 857 [2]

Metody tavného svařování (0)

1. Svařování elektrickým obloukem (1)
 - a) Obloukové svařování tavící se elektrodou (101)
 - b) Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (111)
 - c) Gravitační obloukové svařování obalenou elektrodou (112)
 - d) Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu (114)
 - e) Vibrační svařování a navařování
 - f) Pod tavidlem (12)
 - g) Obloukové svařování v ochranné atmosféře (13)
 - h) Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu-MIG (131)
 - i) Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu-MAG (135)
 - j) Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu (136)
 - k) Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu (137)
 - l) Obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu-WIG (141)
2. Elektrostruskové svařování (72)
3. Svařování plazmové (15)
4. Svařování plazmové MIG svařování (151)
5. Svařování magneticky ovládaným obloukem (185)
- 6. Elektronové svařování (76)**
7. Plamenové svařování (3)
 - a) kyslíko-acetylenové svařování (311)
 - b) kyslíko-vodíkové svařování (313)
8. Svařování slévárenské
9. Svařování světelným zářením (75)
10. Laserové svařování (751)
11. Aluminotermické svařování (71)
12. Elektroplynové svařování (73)
13. Indukční svařování (74)

B) Metody tlakového svařování (4)

1. Tlakové svařování za studena (48)
2. Odporové svařování (2)
 - a) stykové
 - α) stlačovací stykové svařování (25)
 - β) odtavovací stykové svařování (24)
 - b) přeplátováním
 - α) bodové odporové svařování (21)
 - β) švové odporové svařování (22)
 - γ) rozválcovací švové svařování (222)
 - δ) výstupkové (23)
 - ε) vysokofrekvenční odporové svařování (291)
3. Svařování indukční (74)
4. Svařování v ohni
 - a) kovářské svařování (43)
 - b) tlakové svařování s plamenovým ohřevem (47)
5. Třecí svařování (42)
6. Ultrazvukové svařování (41)
7. Výbuchové svařování (44)

2.2 Speciální metody tavného svařování [1], [2]

Rozvoj některých odvětví průmyslu (letecký, jaderný, kosmický, elektrotechnika) podnítil i rozvoj dalších metod svařování, neboť svařování rozdílných druhů materiálů někdy i o rozdílných tloušťkách není běžnými metodami možné.

Mezi tyto metody patří svařování plazmou, laserem a **svazkem elektronů**.

Zde dochází k protavení celé tloušťky svařovaného materiálu pomocí vysoké plošné hustoty výkonu nad 10^5 W.cm^{-2} . Dochází k velmi rychlému zvýšení teploty v tavné lázni na teplotu bodu varu kovu a vytvoří se kapilára vyplněná parami kovů. Vlastní svar se tvoří po průchodu zdroje tepla. Tyto metody svařování patří mezi tzv. **vysokovýkonné metody svařování**. To znamená, že je svařovaný materiál po velmi krátkou dobu vystaven účinku vysokého výkonu energie. Tak se zabraňuje významnějším difúzním pochodům, propalu legujících prvků a deformaci svařovaných dílců. Spoje jsou kvalitnější a doba svařování mnohem kratší. Hlavní nevýhodou těchto metod je především pořizovací cena svařovacích zařízení. Proto se tyto metody omezují na použití v hromadné výrobě (např. automobilový průmysl, elektrotechnika, ...) nebo pro speciální výrobní procesy (např. letecká výroba). Další nevýhodou je speciální úprava svařovaného materiálu, jako je především přesné slícování jednotlivých dílů. Spára mezi jednotlivými díly musí být menší,

než je např. průměr laserového paprsku či svazku elektronů. Popis jednotlivých metod je uveden v další kapitole. Srovnání plošné hustoty výkonu jednotlivých metod svařování a některých jiných druhů zdrojů energií, viz Tab. 2.1.

Zdroj energie	nejmenší průměr [μm]	nejvyšší hustota výkonu [W/cm^2]
slunce a lupa	100	$1 \cdot 10^{-2}$
plamen	1000	$5 \cdot 10^3$
elektrický oblouk	100	$1 \cdot 10^4$
elektronový svazek	$3 \div 20$	$1 \cdot 10^9$
laserový svazek	$3 \div 50$	$1 \cdot 10^{12}$

Tab. 2.1 Srovnání metod svařování dle jejich plošné hustoty výkonu [4]

2.2.1 Svařování plazmou

Princip této metody je založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem. Svařitelnost materiálů i parametry svařování jsou u plazmového svařování podobné jako u metody WIG (obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu). U této metody je však dosahováno vysokých svařovacích rychlostí, výhodnějšího poměru šířky svaru k jeho hloubce (1:1,5 až 1:2,5) a spolehlivé provaření kořene. Je možno svařovat všechny druhy ocelí, měď, hliník, titan, nikl molybden a jejich slitiny. Parametry svařování vysokolegovaných ocelí se pro tloušťky 2 až 10 mm pohybují v těchto rozmezích: napětí mezi 28 až 40 V a svařovací proud mezi 110 až 300 A. Obdobné parametry jsou používány i pro svařování niklu a jeho slitin. U svařování titanu jsou přibližně o 15 až 20 % nižší. Na rozdíl od metody WIG jsou svařovací rychlosti podstatně vyšší (85 až 20 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$), plošná hustota výkonu cca $10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Mikroplazmovým svařováním je možno svařovat tenké fólie tl. 0,01 mm i plech tl. 2 mm. U svařování tenkých fólií je důležitá příprava svarové mezery, která by měla dosahovat 10 až 20 % tloušťky fólie. K dalším nevýhodám této metody patří i nutnost použití zvláštních upínacích přípravků pro odvod tepla a zajištění polohy během svařování.

Výhody plazmového svařování

- možnost mechanizace svařování
- svary jsou čisté, bez pórů a bublin

- dobré mechanické vlastnosti spoje
- velmi dobrý průvar i tvar svaru
- svařovat lze střídavým i impulsním proudem
- není nutno podkládat svarový kořen
- u středních tloušťek plechu poměrně jednoduchá úprava svarových ploch

2.2.2 Svařování laserem

Název LASER vznikl ze začátečních písmen anglického popisu samotné podstaty jeho principu činnosti Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Vlastní zesilovací proces začíná excitací (vybuzením) iontů nebo molekul na horní vibrační hladinu a vyzáření fotonů (kvanta energie elektromagnetického záření) proběhne při přechodu těchto iontů nebo molekul z vyšší metastabilní hladiny zpět na hladinu základní. Tento jev se stimuluje fotonem o stejných vlastnostech. Jedná se řetězovou reakci. Je nadále stimulován dalšími průchody rezonátorem – aktivním prostředím laseru. Tento rezonátor je složen ze dvou zrcadel o vzájemné vzdálenosti rovnající se násobku vlnové délky emitovaného záření.

Aktivní prostředí je tvořeno výbrusem daného druhu materiálu a čerpání je zajištěno kryptonovými výbojkami, které jsou uzavřené v reflexních dutinách. Záření se pro průmyslové účely musí fokusovat. Je tedy dále vedeno zrcadly do technologické hlavy, kde dochází k fokusaci na povrch svařovaného materiálu.

Aktivní prostředí je buď z pevného materiálu (např. rubín, neodýmové sklo) nebo plynu (plynové CO₂ lasery - tvořeno směsí plynů He+N₂+CO₂ uzavřených ve skleněné trubici).

Mezi výhody pevnolátkových laserů patří možnost vedení částečně fokusovaného svazku světlovodnými kabely. U plynových laserů je výhodou nepřerušovaný svazek velkého výkonu. Plošná hustota výkonu se může v dopadové ploše pohybovat až $10^{13} \text{ W.cm}^{-2}$.

Výhody fokusovaného svazku fotonů:

- vysoká hustota výkonu, pro svařování se používá rozsah výkonu 10^4 až 10^8 W.cm^{-2}
- monochromaticnost záření (o jedné vlnové délce)
- vysoká koherence (se stejnou fází)
- velmi mála divergence (rozbíhavost) svazku fotonů
- svazek fotonů nemá žádný elektrický náboj a není tedy nijak ovlivňován magnetickým polem (možnost svařovat i ve velmi úzkých mezerách)
- výkon lze velmi přesně dávkovat
- možnost soustředění svazku na velmi malou plochu o průměru až $10 \mu\text{m}$

Při svařování laserem vzniká kapilára vyplněná parami kovů pod vysokým tlakem a tyto jsou vysokou teplotou ionizovány a laserem indukovaná plazma (páry kovu) tryská z místa svaru vysokou rychlostí. Ta potom brání pronikání svazku fotonů do svarové spáry, pohlcuje značnou část záření a tím snižuje hloubku vniku. Plazma se vychyluje ofukováním ochranným plynem, který plní ještě funkci ochrannou (chrání tavnou lázeň a tuhnutí svarový kov před oxidací) Používají se tyto ochranné plyny (Ar, Ar + CO₂, N₂, He) a tato metoda svařování nepotřebuje ke své činnosti vakuum.

2.2.3 Svařování svazkem elektronů

O této metodě speciálního tavného svařování bude pojednáno v další samostatné kapitole.

3 SVAŘOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ [2], [3], [8], [6], [7]

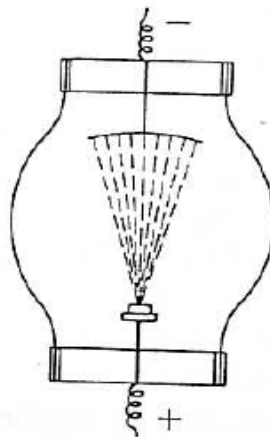
3.1 Historie [3], [8]

Název **elektronový svazek** označuje volné elektrony, které se pohybují ve vakuu vysokou rychlostí přibližně stejným směrem, obvykle v úzkém kuželovém prostoru.

Před více než sto lety dělali pokusy s katodovými paprsky v plynech (1869) fyzikové **Hittorf a Crookes** (**William Crookes** *1832, britský chemik a fyzik, člen Královské společnosti v Londýně, švédské, italské a francouzské Akademie věd) a následně je použili k tavení kovů (1879) a to byla správná cesta až k dnešním CNC strojům, ve kterých se elektronovým svazkem svařují např. součásti tryskových motorů.

Zpočátku byly katodové paprsky jen zajímavý fyzikální jev, který v roce 1895 přivedl **Röntgen** (**Wilhelm Conrad Röntgen**, *1845, německý fyzik, jeden z nejvýznamnějších experimentátorů 19. století, v roce 1901 mu byla za objev rentgenového záření udělena Nobelova cena za fyziku) k objevu zvláštního druhu záření, které vysvětlili **Thompson** (**Sir Joseph John Thomson**, *1856, anglický experimentální fyzik, který objevil v roce 1897 elektron při studiu vlastností katodového záření, za to získal v roce 1906 Nobelovu cenu za fyziku) a **Millikan** (**Robert Andrews Millikan**, *1868, americký fyzik, v roce 1923 obdržel Nobelovu cenu za fyziku za výzkum elementárního elektrického náboje a fotoelektrického jevu) pohybujícími se elektrony.

Co se týkalo procesů na zpracování materiálů, ty se tenkrát jevily jako nevýznamné. Co hůře, při všech těchto pokusech bylo vznikající teplo chápáno jako velká nevýhoda pro nutnost chlazení anody, aby se neroztavila. Teprve až **Marcello von Pirani** (*1880, německý fyzik) využil tento jev ke konstrukci pícky (Obr.3.1), ve které tavil „elektronovými paprsky“ práškový tantal a jiné kovy, a kterou patentoval v letech 1905 a 1907.



Obr. 3.1 Pícka Marcella von Piraniho [3]

V následujících desetiletích se elektronovými svazky zabývali i další vědci. Langmuir, Child, Richardson, Dushman, a Wehnelt se zaměřili na jejich získávání. Busch, Rogowski, Flegler Davisson, Calbrick a další vypracovávali základy elektronové optiky.

Svazky elektronů se používaly v osciloskopech a mikroskopech. Von Ardenne (1938) je použil pro vrtání kovů, a spolu s Rühlem (1939) k tavení a odpařování kovů. Dalšímu rozvoji bránil nedostatek výkonných vakuových čerpadel (pro správnou funkci je nezbytné vytvoření vakua, viz. dále).

Dalším průlomem ve zpracování materiálů s pomocí elektronového svazku nastal v roce 1948, kdy německý fyzik **Steigerwald (Karl Heinz Steigerwald, * 1920, německý fyzik)** v té době se zabývající vývojem výkonnějších zdrojů elektronů pro elektronové mikroskopy, ukázal, že elektronový svazek může být využit jako tepelný nástroj, zvláště pro přesné vrtání drahokamů použitých jako ložisko v hodinkách a pro pájení, tavení a svařování kovů ve vakuu.

V té době byl elektronový svazek považován jen za alternativní ohřev ke svařování obloukem nebo plynem, výhodným pro svařováním reaktivních materiálů ve vakuu. K přelomu došlo až v roce 1958, kdy se **J.A Stohrovi** ve Francii poprvé podařilo svařit 5 mm tlusté desky ze slitiny **Zircaloy** (slitina s 97 % Zr s legováním Sn, Ni, Cr, Fe, z nichž se skládají zařízení v jaderných reaktorech). Plynulým zvětšováním proudu elektronového svazku se nakonec podařilo spojit obě desky svárem, který byl hlubší než byla jeho šířka. Byly to ale USA, kde se začalo využívat svazku elektronů pro svařování a byl plně pochopen technický význam. Až potom došlo k postupnému zavedení této metody svařování i do Evropy (Francie a Velké Británie). Elektronové svářečky našly uplatnění v jaderném a leteckém průmyslu. Docházelo k vývoji větších pracovních komor, zvýšení výkonu elektronového svazku, strojů pro velkosériovou výrobu.

3.1.1 Vývoj elektronového svařování u nás [8]

V 60. letech došlo k největšímu rozvoji této metody svařování a i tehdejší Československo nezůstalo pozadu. Jako první se zapojil Výzkumný ústav zvaračský v Bratislavě, (již začátkem šedesátých let) a v roce 1965 také Ústav přístrojové techniky ČSAV v Brně. U obou institucí však probáhal odlišný vývoj a zaměření. V Bratislavě se tomuto tématu věnovala početná skupina výzkumných pracovníků. Bylo zde silné výrobní zázemí a vývoj směřoval k využití metody v průmyslové praxi. Naproti tomu v Brně šlo spíše o okrajovou záležitost, nebyla nijak zvlášť podporovaná. Bratislavský Výzkumný ústav zvaračský nezaznamenal žádný velký úspěch se svojí první svářečkou. Ovšem vytvořil, realizoval a dodal do průmyslové praxe řadu úspěšných jednoúčelových zařízení. V současné době se už výrobou elektronových svářeček nezabývá.

V ÚPT ČSAV v Brně realizoval Ing. Ladislav Zobač první pokusy se svařováním elektronovým svazkem na experimentálním, víceúčelovém

technologickém zařízení na přelomu let 1965/6. Celý jeho postup a popis zveřejnil v roce 1967 v časopise Slaboproudý obzor [4]. Na základě toho článku zažádal Ústav jaderného výzkumu v Řeži o výrobu elektronové svářečky. A to nejenom pro laboratorní účely a i pro další realizaci v průmyslu. Dalšími „klienty“ se staly: Závod pro výstavbu jaderných elektráren v Bolevci, později Tesla Opočno, VUSE Běchovice, VAAZ v Brně, Jaderná elektrárna v Jaslovských Bohunicích, a ovšem i ÚPT v Brně.

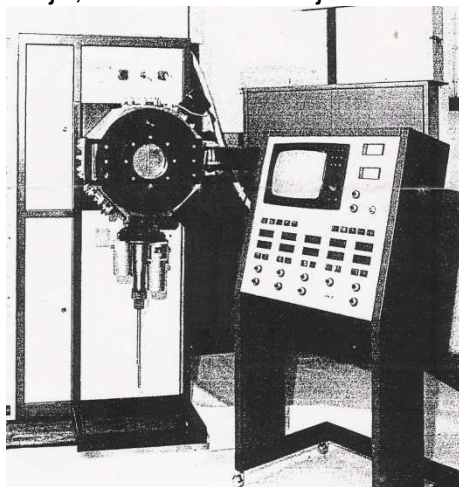
V následujících letech 1969-70 bylo prakticky svépomocí v ČSSR vyrobeno celkem 7 svářeček o výkonech shodně 1,5 kW. viz. fotografie na obr. 3.2. Tato svářečka je po zmodernizování dosud intenzivně využívána.



Obr. 3.2 Elektronová svářečka ES2 [8]

O totéž se pokusily i dvě výše uvedené firmy Tesla Opočno a Bratislavské elektrotechnické závody, ovšem bez většího komerčního úspěchu.

Výsledek pokusu Tesly v Opočně ukazuje obr. 3.3. Koncepte zařízení je, kromě modernější elektroniky, převzata ze svářečky ES2.



Obr. 3.3 Elektronová svářečka Tesly Opočno [8]

Po odchodu Ing. Ladislava Zobače z UPT (v r. 1990) pokračuje ve vývoji a využití elektronových svářeček tým mladších pracovníků (s Ing. Janem Dupákem v čele). Tým provedl další modernizaci svářečky ES2, a hlavně vyvinul novou, malou svářečku pro svařování drobných rotačních součástí [5], viz. obr. 3.4. Elektronová svářečka ES2 (průměr komory 600 mm, elektronová tryska 50kV/1500W) a stolní elektronová svářečka (průměr komory 230 mm, tryska 50kV/500W nebo 50kV/1500W).



Obr. 3.4 Elektronová svářečka pro svařování malých rotačních součástí [8]

Tato svářečka je také využívána ve firmě VAKUUM Praha.

Hlavní zájem o elektronové svařování v ČR je v oblasti jaderného výzkumu. Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s. používá elektronový svazek pro tzv. rekonstituci vzorků radioaktivních materiálů. Svářečka je zde proto provozována v tzv. „horké“ komoře. Pro tento účel si ÚJV Řež od r. 1994 nechal vyrobit ve spolupráci s Ing. Ladislavem Zobačem již tři tyto svářečky o výkonu 6 kW. viz obr. 3.5.



Obr. 3.5 Elektronová svářečka ES3 v ÚJV v Řeži [8]

Podobně si i pro svoji potřebu vyrobil elektronovou svářečku i podnik Delong Instruments v Brně, viz. obr. 3.6. Vše podle dokumentace dodané Ing. Ladislavem Zobačem.



Obr. 3.6 Elektronová svářečka firmy Delong Instrumets, Brno [8]

Elektronové svářečky v ČR vyrobené svépomocí převažují nad profesionálními dovezenými ze zahraničí.

Jedna z nich, výrobce Ústav prof. M. V. Ardeneho v Drážďanech byla používána v Ústavu jaderných paliv ve Zbraslavi u Prahy koncem šedesátých let. Další výkonná svářečka od fy Sciaky (Francie) byla v podniku Motorlet v Jinonicích. Německá firma Leybold-Heraeus vyrobila a dodala dvě svářečky do Výzkumného ústavu vakuové elektrotechniky v Praze a podniku Sigma v Opavě, tyto už ovšem nepracují.

Anglická firma Wentgate dodala v roce 1976 elektronovou svářečku do Tesly Brno. Dle dostupných informací pracuje dodnes (tedy již ve firmě Delong Industrial).

V sedmdesátých letech zakoupil podnik První brněnská strojírna elektronovou svářečku od firmy Steigerwald, pro svařování parogenerátorů v pobočném závodě v Třebíči. Tato svářečka již neexistuje.

Pokud jde o další svařování elektronovým svazkem v ČR, nedá se očekávat zájem o vlastní elektronovou svářečku na žádném novém pracovišti nebo firmě, hlavně pro jeho vysoké pořizovací náklady. Zařízení bude využíváno tam, kde ho již mají a jsou schopni ho udržovat, konkrétně v Brně firmy Delong Instruments a Delong Industrial a ÚPT AV ČR a ÚJV Řež, a.s.

3.2 Vytvoření a interakce svazku elektronů [3], [6], [7]

3.2.1 Volné elektrony

Přestože je elektron nejlehčí částicí hmoty (jeho klidová hmotnost $m_e = 9,1 \cdot 10^{-32}$ kg, elektrický náboj $q = -e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C), patří jeho svazky k jednomu z nejuvýkonnějších zdrojů tepla pro svařování. Jeho malá hmotnost je ovšem vyvážena jeho záporným elementárním nábojem. Ten umožňuje při přiložení elektrického napětí udělit elektronům velké zrychlení, resp. rychlost (při napětí 150 kV je velikost rychlosti přibližně $2 \cdot 10^8$ ms⁻¹, což je přibližně 2/3 rychlosti světla). Množství elektronů v atomech je určeno atomovým, resp. protonovým číslem v Mendělejevově periodické soustavě prvků a závisí rovněž na druhu chemického prvku. Nacházejí se v různých energetických hladinách v obalu atomu. Nejméně vázány jsou u kovů elektrony na vnějších hladinách. To kovům umožňuje jejich elektrickou vodivost, protože se tyto elektrony mohou volně pohybovat krystalovou mřížkou. Nemohou však opustit povrch kovu, protože jejich kinetická energie není větší než energie potenciálové bariéry, která existuje při povrchu.

Volné elektrony můžeme získat z vnějších hladin snadno přivedením energie na povrch kovu a tím vyvolání emise (výstupu) elektronů. Energie, kterou potřebují elektrony k překonání bariéry, se nazývá výstupní práce. Kov mohou opustit pouze ty elektrony, které mají kinetickou energii alespoň rovnou výstupní práci. Podle způsobu přivedení energie se emise dělí na: termoelektrickou, sekundární, fotoelektrickou a tunelovou emisi. Pro účely svařování svazkem elektronů se používají první dva způsoby emisí.

3.2.2 Pohyb elektronů, urychlení elektrickým polem

Jak uvedeno výše, nejčastějším způsobem získání volných elektronů je zahřátí elektrody, tedy použití termokatody. Na tuto jsou kladeny velké požadavky, dále viz další kapitola.

Ohřev katod se stanovuje na teplotu, kdy mají elektrony dostatek energie k překonání potenciální bariéry a mohly přejít do okolí katody (elektronový mrak). Velikost proudové hustoty emisního proudu se stanoví podle vzorce dle Richardsona a Thomsona [6]

$$J_e = A_j \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-e \cdot \varphi_0}{k \cdot T}} \quad [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (3.1)$$

kde J_e	je proudová hustota emisního proudu
A_j	je konstanta emise závisící na povrchu (pro většinu kovů má hodnotu $40 \sim 70 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$)
T	je absolutní teplota katody
e	je Eulerovo číslo (2,71828...)
$-e \cdot \varphi_0$	je výstupní práce elektronů z kovu

k je Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)

Jak z uvedeného vztahu vyplývá, hodnota emisního proudu závisí hlavně na teplotě katody. Neúměrné zvyšování této teploty může ovšem vést k odpařování materiálu katody a tím logicky i ke snížení její životnosti.

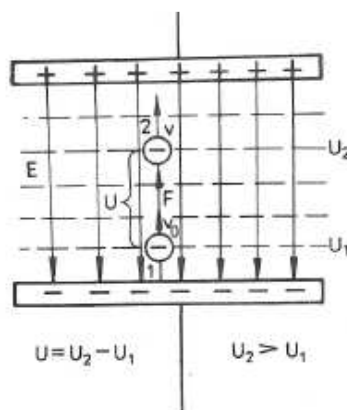
Volné elektrony se tak mohou pohybovat a pokud jsou vloženy do elektrického nebo magnetického pole, tak jim může být uděleno velké zrychlení. Pro elektrickou sílu působící na elektron v homogenním elektrickém poli s intenzitou E , vytvořeného mezi dvěma rovnoběžnými dostatečně vzdálenými deskami platí vztah [6]

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{E} \quad [\text{N}] \quad (3.2)$$

kde znaménko (-) před pravou stranou rovnice vyjadřuje to, že elektron má záporný náboj a výsledná elektrická síla má opačný směr, než směr vektoru intenzity el. pole E . Práce, vykonaná, resp. spotřebovaná elektrickým polem na přemístění náboje z jednoho místa na druhé je dána vztahem [6]

$$A = e \cdot U = e \cdot (U_2 - U_1) \quad [\text{J}] \quad (3.3)$$

kde U je rozdíl potenciálů mezi body 1 a 2 (obr. 3.2)



Obr. 3.2 Vliv homogenního el. pole na elementární náboj [6]

Práce se spotřebuje na kinetickou energii elektronu a je rovna [6]

$$W_k = \frac{m_e \cdot (v^2 - v_0^2)}{2} \quad [\text{J}] \quad (3.4)$$

kde m_e je hmotnost elektronu [kg]

a v a v_0 jsou rychlosti elektronu v bodech 1, resp. 2 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Ze zákona o zachování celkové mechanické energie vyplývá, že součet potenciální a kinetické energie v daném okamžiku zůstává konstantní, tedy [6]

$$A = W_k \quad (3.5)$$

$$e \cdot U = \frac{m_e \cdot (v^2 - v_0^2)}{2} \quad (3.6)$$

za předpokladu, že počáteční rychlost elektronu po jeho uvolnění bude nulová, lze vztah upravit na [6]

$$e \cdot U = \frac{m_e \cdot v^2}{2} \quad (3.7)$$

pak po úpravě je pro výslednou rychlost elektronu následující vztah a vyplývá z něj, že závisí pouze na vstupním urychlujícím napětí (rozdílu potenciálů urychlujícího elektrického pole) [6]

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m_e} \cdot U} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.8)$$

dosazením jednotlivých veličin pro hmotnost m_e a náboj e elektronu získáváme přibližný vztah pro velikost rychlosti elektronu [6]

$$v = 600 \cdot \sqrt{U} \quad [\text{km} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.9)$$

Z uvedeného vyplývá, že rychlosti, jak uvedeno výše v úvodu se přibližují rychlosti světla a při těchto rychlostech probíhají i další procesy.

Změnou velikosti a směru počáteční rychlosti, jako i velikosti a směru přiloženého elektrického napětí můžeme dosáhnout toho, že se budou elektrony pohybovat po přesně určené dráze.

3.2.3 Vliv magnetického pole, význam

Tento vliv je podobný jak u pole elektrického. Obecně se síla, která působí na nabitou částici, určí ze vztahu [6]

$$F = B_e \cdot v \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}] \quad (3.10)$$

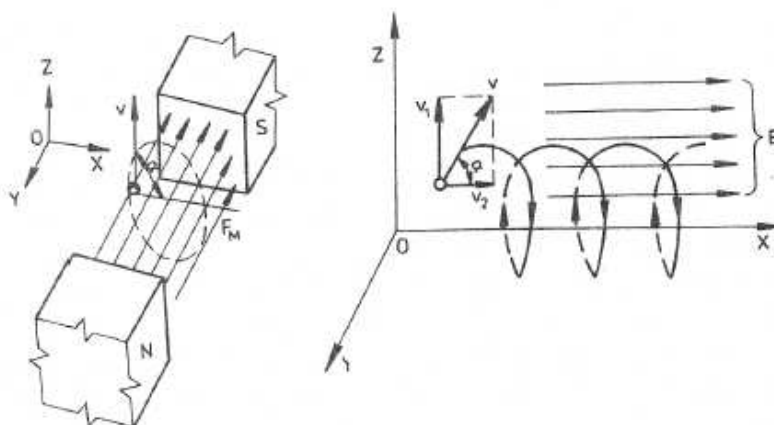
kde B_e je magnetická indukce [T]
 α je úhel mezi směrem vektoru rychlosti a směrem magnet.
 siločar [°]

Z uvedeného vztahu vyplývá, že v případě, že se elektron pohybuje ve stejném směru jako mají směr magnetické indukční siločáry, tedy, když úhel α je roven nule, nepůsobí na volný elektron žádná síla a pohybuje se dále neovlivněn. V případě jakéhokoliv nenulového úhlu α dochází k ovlivnění volného elektronu magnetickým polem. Když je úhel α roven $\pi/2$ je ovlivnění největší a výsledná síla má velikost [6]

$$F = B_e \cdot v \quad [\text{N}] \quad (3.11)$$

Směr působící síly je určen pravidlem levé ruky. Je vždy kolmá na směr okamžité rychlosti elektronu v a na směr siločar magnetického pole. Z 2. Newtonova zákona vyplývá, že tato síla uděluje elektronu o hmotnosti m_e zrychlení o velikosti $Be \cdot \frac{v}{m_e}$. Vektor zrychlení je kolmý na vektor okamžité rychlosti, pak se bude elektron vlivem tohoto dostředivého zrychlení pohybovat po kružnici kolmé k magnetickým siločarám pole.

V případě, že vektor počáteční rychlosti elektronu není kolmý k vektoru magnetické indukce, pak je výsledný pohyb elektronu složen ze dvou složek rychlosti v_1 a v_2 . Vektor rychlosti v_1 směřuje ve směru kolmém na magnetické siločáry a vektor v_2 vodorovně s magnetickými siločarami. V důsledku působení obou složek má výsledná dráha elektronu tvar spirály. Viz. obr. 3.7.



Obr. 3.7 Vliv magnetického pole na volný pohybující se elektron [6]

Magnetické pole se využívá pro fokusaci a ovládání svazku elektronů, dále v další kapitole.

3.2.4 Přeměna kinetické energie elektronů na tepelnou

Elektrony jsou, jak je uvedeno v kapitole 3.2.2, urychleny elektrickým polem a získávají tak značnou kinetickou energii. Po jejich dopadu na svařovaný materiál dochází k jejich nárazům do atomů tohoto materiálu. Jejich rychlost se prudce sníží a jejich kinetická energie se předá atomům svařovaného materiálu. Přesněji dochází k nárazům do elektronů v obalech atomu materiálu, zvláště pak ve vnějším obalu. Energie se tedy nepředává přímo, protože elektrony mají velmi malou relativní hmotnost a nemohou ji předávat přímo o relativně mnoho těžším jádrům atomů. Dalším krokem je předávání získané energie dalšími srážkami mřížkovým fononům (mřížkové fonony – kvantové vibrace mřížky) a tedy i zvyšování energie atomů v mřížce. Tento proces je doprovázen zvýšením teploty materiálu. Je-li dostatek množství přiváděné energie, roste teplota nad bod varu jakéhokoliv známého kovu. Proces předávání energie u plynných nebo kapalných materiálů zřejmě pokračuje obdobným způsobem.

Vlastní proces vnikání elektronového svazku do svařovaného nebo obráběného materiálu není dosud zcela vysvětlen. A to hlavně z důvodu, že jej vzhledem k mimořádným podmínkám (rychlost vzrůstání teploty k vysokým hodnotám, apod.) nelze zkoumat přímo experimentálně. Lze jej jen teoreticky ověřit podle výsledků pokusů (studium výbrusů pokusných svárů).

3.2.5 Chování svazku elektronů při interakci s kovem

Elektrony po dopadu na pevnou látku pronikají pod její povrch do poměrně malé hloubky d dané výrazem [7]

$$d = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot U^2 \quad [mm] \quad (3.12)$$

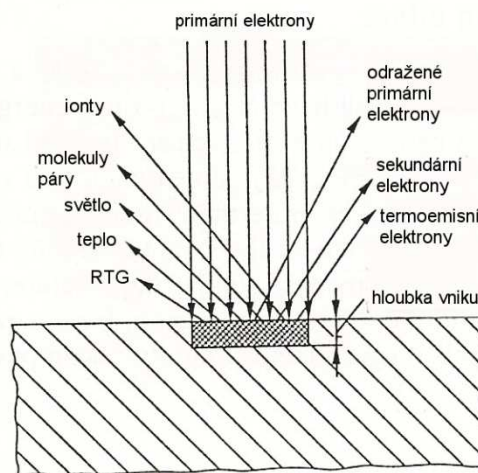
kde ρ je hustota látky $[g \cdot cm^{-3}]$
 U je hodnota urychlovacího napětí $[kV]$

Tato hloubka je v řádech od tisícín do desetin milimetru. Příklady vnikání svazku do různých materiálů v závislosti na použitém urychlovacím napětí jsou uvedeny v tab. 3.1.

	Al	Ag	Cu	Fe	Mg	Mo	Ni	Ti	W	Zn	Zr
50 keV	0,019	0,005	0,005	0,006	0,030	0,005	0,005	0,011	0,002	0,007	0,008
150 keV	0,175	0,045	0,052	0,060	0,271	0,046	0,053	0,105	0,024	0,066	0,073

Tab. 3.1 Příklady vnikání svazku elektronů do různých materiálů [7]

Na této krátké dráze předají elektrony v materiálu všechnu svoji kinetickou energii nepružnými srážkami jejím částicím (dalším elektronům v obalech atomů materiálu). Toto je navenek prezentováno zvýšením teploty zasaženého místa. Některé z tzv. primárních elektronů tvořících svazek nepředávají energii a jsou pružně (bez ztráty energie) odraženy zpět mimo svařovaný materiál. Nebo předají jen část své energie pod povrch předtím, než jsou rovněž vráceny nad povrch jako tzv. „rozptýlené“ (backscattered) elektrony. A také existují i tzv. sekundární elektrony, které jsou z materiálu vyraženy, viz. obr. 3.8.



Obr. 3.8 Průběh procesu při vnikání svazku elektronů do materiálu [7]

Sekundární elektrony se dělí na:

- pružné odražené (u těchto se energie rovná dopadajícím elektronům)
- odražené v důsledku nepružných srážek (zde je energie o něco málo zmenšena)
- elektrony u kterých energie nepřevyšuje 50 eV

Jak je patrné z obr. 3.8 v místě dopadu elektronů vzniká též rentgenové záření (X-rays - rentgenové záření je forma elektromagnetického záření o vlnových délkách 10 nanometrů až 100 pikometrů (odpovídající frekvencím 30 PHz – 30 petahertz - $30 \cdot 10^{15}$ Hz až 6 EHz – exahertz - $30 \cdot 10^{18}$ Hz), využívá se při lékařských vyšetřeních a v krystalografii, jedná se o formu ionizujícího záření a jako takové může být nebezpečné). Má dvě složky. Jedna složka vzniká změnou rychlosti elektronů a je tvořena širokým spojitým frekvenčním spektrem (tzv. brzdné záření). Druhou složku tvoří jen záření o určité frekvenci, charakteristické pro daný materiál. Tyto složky rtg. záření jsou zdraví škodlivé a zamezení

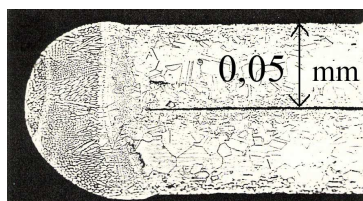
jejich pronikání do okolí musí být dostatečně zajištěno. Jejich tvrdost, tj. schopnost pronikat materiálem, závisí na rychlosti elektronů. Účinnost jejich odstínění závisí na druhu materiálu. Obecně lze říci, že stínící účinek má rostoucí tendenci s rostoucí hodnotou atomového (protonového) čísla prvku, ze kterého je materiál vyroben. Pronikavost rentgenového záření rychle roste a je přímo úměrná urychlovacímu napětí zdroje, proto zdrojům s vyššími hodnotami napětí (> 60 kV) se věnuje zvýšená pozornost.

Jako i u jiných metod svařování, i u svařování svazkem elektronů dochází ke ztrátám energie. Závisí hlavně na materiálu a tvaru svařovaných dílů v místě dopadu svazku. Např. při rovném povrchu ocelových součástí je při povrchu počáteční účinnost asi 0,6, ale po proniknutí svazku do hloubky se zvyšuje na 0,9 až 0,95 a materiál je tedy více zahříván. V důsledku toho se teplota v místě vniknutí velmi rychle zvyšuje až na hodnoty, kdy dochází ke změně skupenství na kapalné a pak i plynné. Fakt, že je možné provádět úzké hluboké svary, viz. obr. 3.9, dokazuje, že změnou skupenství se změní i podmínky interakce elektronů s látkou, že se zde spotřebovává již jen minoritní část celkové energie svazku a majoritní část elektronů pokračuje v zahřívání do hloubky materiálu na čele svazku.



Obr. 3.9 Ukázka úzkého svaru hliníku o hloubce 150mm [8]

Svazek elektronů může být použit i při spojování drobných, tenkých součástí (např. svaru dvou membrán z nerezavějící oceli, 0,05 mm tlustých), viz. foto výbrusu na obr. 3.10.



Obr. 3.10 Ukázka svaru dvou membrán [8]

Ze znalosti měrných a skupenských tepel jednotlivých materiálů lze vypočítat, i když jen orientačně, rychlost postupu tavení různých kovů koncentrovaným elektronovým svazkem s určitou plošnou hustotou výkonu v místě jeho dopadu, viz. tab. 3.2.

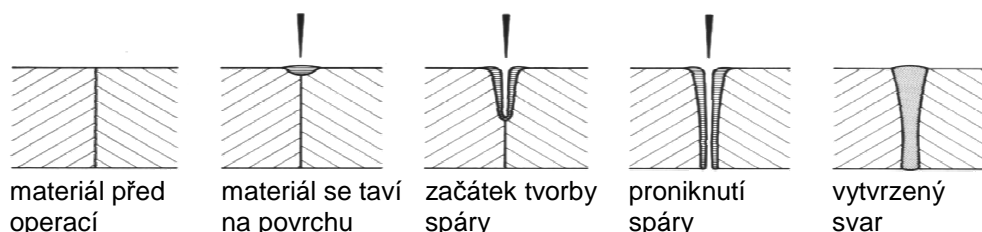
	Al	Ag	Cu	Fe	Mg	Mo	Ni	Ti	W	Zr
t [μs]	70,75	15,38	30,97	40,47	35,26	40,55	41,38	56,74	28,26	10,24
„ s “ [mm/s]	274,8	324,9	189,1	165,0	855,5	126,9	142,5	205,6	96,16	570,4

Tab. 3.2 Doby t potřebné ke změně látky z pevné fáze při pokojové teplotě na páru a „mezní rychlost vnikání s “ svazku při plošné hustotě jeho výkonu 10^4 W/mm^2 [8]

Při vnikání svazku elektronů pod povrch materiálu byly zjištěny následující skutečnosti.

- prvotní elektrony předají svou kinetickou energii na velmi krátké dráze v řádech setin mm, viz. výše
- přesto elektronovým svazkem o velkém výkonu ($10^7 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$) lze protavit materiál do hloubky několika desítek cm
- při malé plošné hustotě výkonu v místě dopadu (rozostřený svazek) jsou účinky podobné jako u klasických metod svařování

Svařovaný materiál, který je bombardován koncentrovaným svazkem elektronů se velmi rychle roztaví a změní se v páru kovů. Tato se dále a při teplotě nad 2700 K expanduje. Tímto aktivně vytlačuje roztavený kov pod dopadající svazek a do stran svarové spáry. Tím uvolňuje elektronům cestu k dalšímu pronikání materiálem. Rychle se vytvoří kráter, který je uvnitř vyplněn párou obklopenou obálkou z roztaveného materiálu (Obr. 3.11). Zasahuje-li tento proces současně čelní plochy dvou součástek oddělených jen velmi úzkou spárou, dojde ke smísení taveniny obou částí a po ztuhnutí se spojí oba díly. Tato metoda svařování nepředpokládá použití přídavného materiálu, ale taky ho nevylučuje.

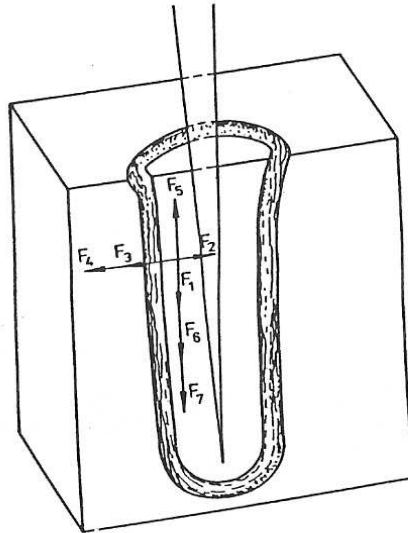


Obr. 3.11 Postup pronikání svazku elektronů materiálem [2]

Ve svarové kapiláře působí následující síly, které závisí na parametrech svařování. viz. obr. 3.12.

- síla proudu elektronů F_1

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



Obr. 3.12 Rozložení sil při vnikání svazku elektronů do materiálu [2]

3.3 Konstrukce elektronové svářečky

3.3.1 Základní části a rozdělení svářeček [3], [10], [11]

Zařízení, které generuje, ovlivňuje a přivádí svazek elektronů k svařovanému nebo obráběnému materiálu se nazývá *elektronová svářečka*. Během vývoje této metody svařování bylo vytvořeno nespočetné množství typů různých svářeček, rozměrově malý a relativně jednoduchých, nebo větších rozměrů, velmi složitých a logicky i nákladných zařízení. Je přirozené, že se tato metoda pro svoji mimořádnost používá v nejrůznějších oborech techniky. Ve většině případů nelze vytvořit nějaké univerzální zařízení – svářečku. Je nezbytné vytvořit zvláštní a jedinečnou konstrukci, určenou pro daný účel. Těchto svářeček není ve světě mnoho, odhadem jsou jich stovky.

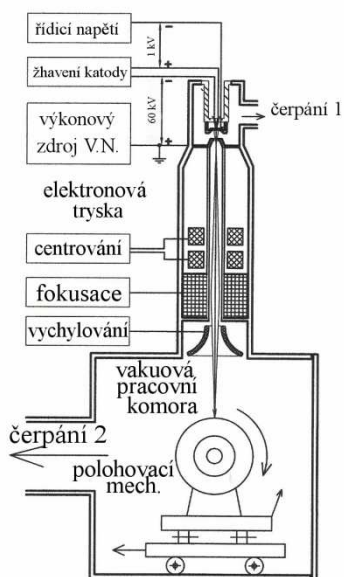
Charakter konstrukce je určen především skutečností, že pro řádnou a bezvadnou funkci zařízení je nutno vytvořit v pracovním prostoru vysoké vakuum. A to z několika důvodů:

- zajištění termoemise elektronů
- tepelná a chemická izolace katody
- zamezení vzniku oblouku mezi elektrodami

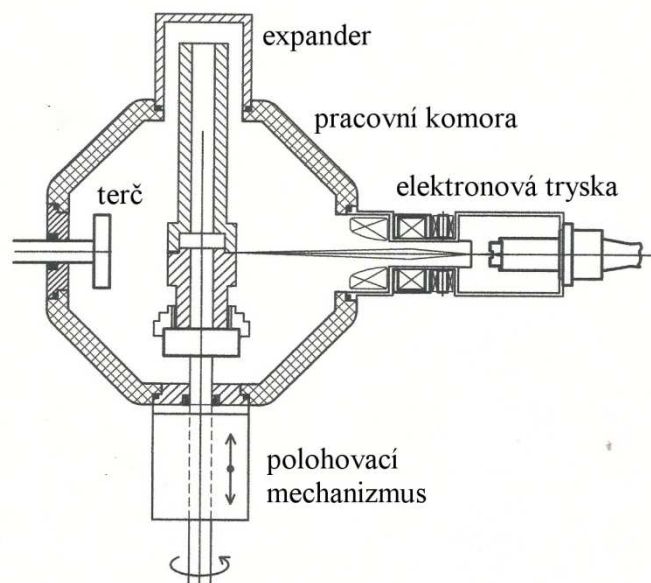
- zamezení srážek elektronů s molekulami vzduchu, které způsobují zbrzdění elektronů a jejich vychýlení z přímého směru

To vše konstrukci daného zařízení značně komplikuje a prodražuje. Rovněž pořizovací náklady a cena elektrického vybavení a polohovacích mechanismů jsou nemalé. Vlastní svařování probíhá k pracovní komoře.

Základní schéma malé a jednoduché elektronové svářečky je na obr. 3.13. Další koncepce uspořádání je znázorněna na obr. 3.14.



Obr. 3.13 Schéma jednoduché elektronové svářečky [8]



Obr. 3.14 Schéma malé „univerzální“ svářečky [8]

Elektronové svářečky mohou být rozděleny do tří skupin:

- univerzální svářečky
- krokové svářecí stroje,
- průběžné svářecí stroje.

a obsahují tyto následující funkční prvky:

- **elektronovou trysku** (základní prvek),
- pracovní komoru,
- polohovací zařízení,
- zdroj vysokého napětí,
- řídicí prvky, pozorovací zařízení
- čerpací zařízení,
- svařovací pomůcky.

Jednotlivé části jsou uspořádány kolem pracovní komory, která je centrem každé elektronové svářečky. Je zde také ovládací pult, kde jsou soustředěny řídicí prvky spolu se vstupem dat a monitorovacím zařízením, které může být doplněno vizuálním displejem. Za zadní stěnou pracovní komory jsou umístěna vakuová čerpadla, akusticky oddělená od pracovního prostoru obsluhy. Elektronová tryska je speciálním kabelem spojena se zdrojem vysokého napětí. U některých zařízení může být umístěna i vodorovně.

Univerzální svářečky jsou obvykle vybaveny polohovacím zařízením, které je navíc možné přesunout mimo pracovní komoru a usnadnit tak upnutí svařovaného materiálu.

Konstrukce krokových a průběžných svařovacích strojů jsou přizpůsobeny přímo konkrétnímu účelu a geometrii svařovaných materiálů, popř. ještě potřebám výrobních linek, jejichž součástí jsou.

3.3.2 Elektronová tryska

Zdroje pro tvorbu elektronových svazků – elektronové trysky (někdy používaný název *děla*) byly vyvinuty nejprve pro jiné než technologické operace, totiž pro elektronové mikroskopy. První pokusy s využitím tepelných účinků svazku elektronů byly provedeny právě v elektronových mikroskopech jejich konstruktéry (Steigerwald).

V prostoru elektronové trysky je nutné vytvoření vysokého vakua $5 \cdot 10^{-4}$ mbaru = $5 \cdot 10^{-2}$ Pa, důvody viz kap. 3.3.1.

Elektronová tryska se skládá z těchto základních prvků:

- katoda (zdroje elektronů)
- elektrická urychlovací čočka
- magnetická fokusační čočka

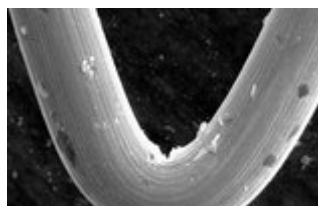
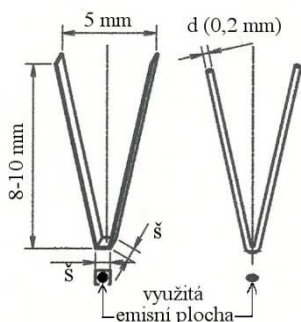
1) Katoda

Volné elektrony získáme pro potřeby svařování jejich emisí do vysokého vakua, viz. kap. 3.2.1. K emisi je zapotřebí dodání kinetické energie těmto elektronům. Nejlepším způsobem se jeví tepelná energie, resp. zahřátí emitoru na vysokou teplotu (teplota katody při svařování 2750 °C). K tomu určené materiály, které jsou svými fyzikálními vlastnostmi schopny snášet tak vysoké teploty, jsou wolfram (teplota tání 3410 °C, teplota varu 5500 °C) buď čistý nebo dotovaný thoriem, a jen výjimečně tantal nebo hexaborid lanthanu.

Protože emitor se nachází na záporném pólu zdroje energie označuje se jako *katoda* (přesněji termokatoda). Množství emitovaných elektronů, tj. *emisní proud*, je závislý na vlastnostech materiálu katody, velikosti jejího povrchu a teplotě. Životnost termokatody je určena zejména: nejvyšší použitou teplotou, chemickými účinky zbytkových plynů (vodní pára). Běžně se dosahuje doby v řádech hodin.

Rozměry katod jsou závislé hlavně na požadovaném výkonu, tj. součinu urychlovacího *napětí a proudu* svazku. U přímo žhavených katod je hustota *emisního proudu* v řádu 100 mA/mm². Z celého povrchu katody se využije pro vytvoření elektronového svazku jen malá část. Pro menší výkony (v řádech jednotek kW) nám stačí jednodušší a tedy i levnější katod ve tvaru krátké vlásky z wolframového drátu o průměru kolem 0,2

mm, kde je vyžita emise z malé plošky jejího vrcholu. Pro výkonnější zdroje musí být plocha pro emisi větší. Zde je pak katoda zhotovena z wolframového pásku širokého 0,5 až 2 mm, ohnutého do tvaru V se skosenou špičkou. Plocha pro emisi má tvar čtverce 0,5 až 2 x 2 mm, ze které můžeme odebírat emisní proud 25 až 200 mA. Tomu odpovídající výkon při urychlovacím napětí 150 kV je až 30 kW, viz. obr. 3.15a, 3.15b.



Obr. 3.15a Typy katod [10]

Obr. 3.15b Mikroskopický snímek katody [10]

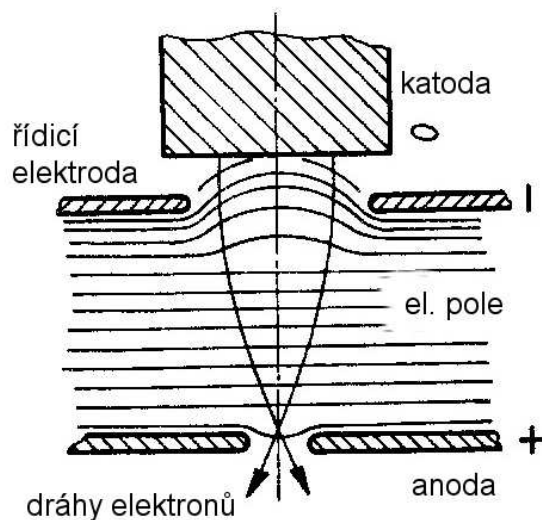
2) Urychlovací elektrická čočka

V další části zařízení je nutné elektronům získaným emisí z katody dodat kinetickou energii (obvykle udávanou v elektronvoltech) a upravit jejich dráhy tak, aby vytvořily svazek co nejmenšího průměru. Toho lze dosáhnout použitím vhodného tvaru urychlovacího

elektrického pole, tj. vhodným tvarem elektrod (anody a katody), které jej vytváří. Mezi ně se vkládá další pomocná tzv. *řídící (Wehneltova) elektroda*, na které se dá nastavit záporný potenciál vůči katodě a tím se dá řídit výkon elektronového svazku spojitě od nuly do požadovaného maxima, tzv. triodový systém.

Pro tvar drah elektronů, tedy celého svazku, je rozhodující *elektrické pole v nejbližším okolí katody*. U povrchu jsou emitované elektrony ovlivňovány nejsilněji, protože jsou relativně v klidu (jejich rychlost s blíží k nule). Toto elektrické urychlovací pole musí mít *fokusační účinek* (tj. směřovat dráhy elektronů emitovaných z míst na katodě vzdálenějších od osy směrem k ose). Ideální stav je, když se všechny dráhy svazků elektronů protínají v jediném bodě. Ideální stav nikdy nenastane, svazek pouze dosáhne jistého minimálního průřezu s nejvyšší plošnou hustotou výkonu v místě, kterému říkáme *křížiště*, viz. obr. 3.16. Toto místo leží v oblasti urychlovací čočky, kde není možné umístit svařence. Svazky procházejí dál (za anodou již stálou rychlostí), přičemž

v jistém místě je vloženo kolem osy elektronového svazku *magnetické rotačně souměrné pole*, které má *fokuzální účinek*, viz. další kapitola.



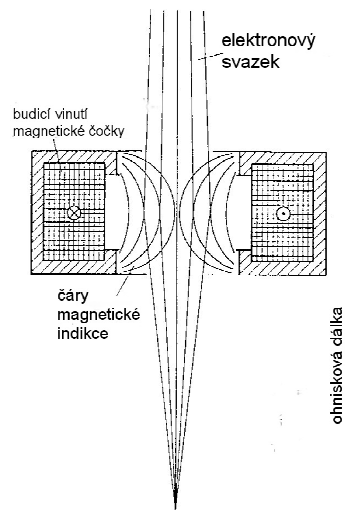
Obr. 3.16 Urychlovací elektrická čočka s tzv. triodovým systémem [7]

3) Fokuzální magnetická čočka

Od prvotního křižště se svazky elektronů pohybují dál bez elektrického pole a jsou mírně rozbíhavé a v místě svařování by nedosahoval požadovaného plošného výkonu. Toho lze dosáhnout použitím *magnetické fokuzální čočky*, resp. *rotačně souměrným magnetickým polem*. To je vytvořené proudem v kruhovém závitě nebo ve válcové cívce a působí na dráhy elektronů v blízkosti osy symetrie podobně jako skleněná spojná čočka na světelné paprsky (dráhy fotonů), viz. kap. 3.2.3. Magnetická čočka je proto vždy „spojná“ (magnetická „rozptylka“ neexistuje). Nemění rychlost elektronů, tj. energii, pouze směr a dráhy mají tvar šroubovic, které se protínají v určitém bodě na ose rotační symetrie, nazývaném „ohnisko“^d. Průměr svazku od 0,1 do 1 mm, podle výkonu a ohniskové délky.

Plošná hustota výkonu v křižšti svazku dosahuje hodnoty 10^7 W/cm². Při této hustotě výkonu se dokáže svazek protavit do značné hloubky.

Svazek je třeba také zaostřit na povrch svařovaného materiálu, proto musíme mít možnost měnit optické vlastnosti magnetické čočky, zejména její ohniskovou délku. Ta se mění změnou proudu v budící cívce. Ohnisková délka je nepřímo úměrná čtverci budícího proudu a rovněž závisí na rychlosti elektronů, tedy urychlovacím napětí, viz. obr. 3.17.



Obr. 3.17 Magnetická fokuzční čočka [7]

Elektronový svazek dopadá na povrch svařovaného předmětu ve tvaru na špičku postaveného úzkého kužele.

Skutečné dráhy elektronů ve jsou značně ovlivněny dalšími vlivy: odpuzivými silami mezi elektrony (prostorový náboj), „tepelnou“ divergencí (chaotický pohyb elektronů při jejich výstupu z katody), astigmatizmem (eliptický, šikmý tvar stopy svazku rozptyl) atd, elektrické a magnetické pole uvnitř trysky. Tyto vady se obvykle, vyjma astigmatizmu, nekorigují, protože by to vyžadovalo nákladnější vybavení. Prakticky není zhoršení svazku pro svařování tak závažné.

Další korekci svazku umožňuje *stigmátor*, který kompenzuje vliv rušivých elektrických a magnetických polí způsobujících *astigmatismus*. *Stigmátor* je prakticky vychylovací systém, má však větší počet cívek vytvářejících korekční magnetické pole. Korekce svazku stigmátorem není snadná a vyžaduje přesný postup podle výrobce svářečky.

3.3.3 Pracovní komora

Konstrukce pracovní komory musí splňovat následující požadavky:

- dostatečné rozměry
- komora musí být dostatečně pevná a tuhá (tlak atmosféry nesmí po vyčerpání ovlivnit nepříznivě vzájemnou polohu osy) trysky, vychylovacího systému a polohovacího zařízení
- velké pracovní komory, pokud mají obecný tvar mají být navrhovány metodou konečných prvků tak, aby jejich deformace vlivem vnějšího tlaku byly minimalizovány)

- pracovní komory (také vnější pláště elektronových trysek) jsou zhotoveny z běžné konstrukční oceli, které účinně snižuje rušivý vliv vnějších magnetických polí
- vnitřní plochy není třeba chránit proti korozi, protože vnitřní prostor je většinu času evakuován
- větší pracovní komory jsou vybaveny pozorovacími okénky, jsou ze speciálního (olovnatého) skla tak, aby dostatečně absorbovala škodlivé rentgenové záření
- vstupní dveře do pracovní komory musí být opatřeny elektrickým blokovacím zařízením

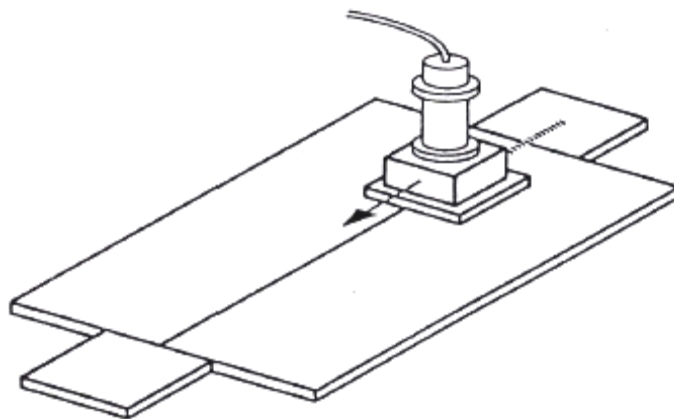
Velikost pracovní komory se volí podle rozměrů svařence. Krokovací stroje pro svařování většího počtu malých součástí mívají větší počet komůrek o objemu jen několik litrů, které mohou být vyčerpány během několika sekund. Pro svařování větších svařenců jsou pracovní komory prostornější o objemu např. 160 m³., viz. foto na obr. 3.18.



Obr. 3.18. Pracovní komora o objemu 32 m³ [11]

V pracovní komoře není nezbytně nutné vytvoření tak vysokého vakua, jak v elektronové trysce (např. při tlaku 10⁻¹ mbaru je ochranný účinek proti chemickým vlivům stejný jak účinek netečného plynu s čistotou 99,9% při svařování oceli TIG metodou, dále rozptyl elektronů srážkami s molekulami zbytkových plynů do tlaku 10⁻² mbaru je zanedbatelný)

Existují i svářečky s mobilní komorou nebo „lokálním vakuem“, např. pro svařování rovných plechů, válcových komor nebo potrubí libovolných rozměrů. Zde je svařovaná součást součástí evakuovaného pracovního prostoru. Tryska klouže po povrchu svařence a její čerpací soustava musí být schopna udržet vysoké vakuum i za značně nepříznivých podmínek a je více stupňová. viz. obr. 3.19.



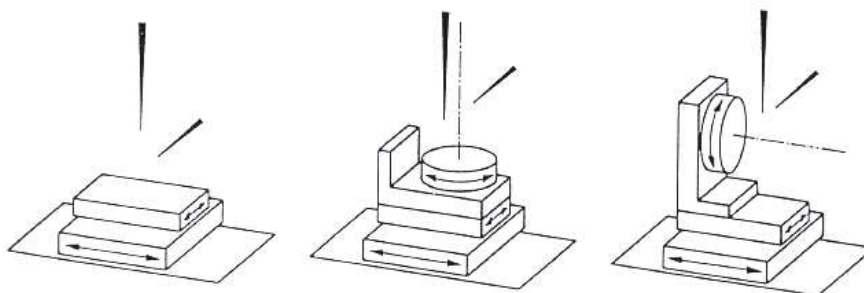
Obr. 3.19 Svářečka s mobilní komorou [3]

3.3.4 Polohovací zařízení [3]

Toto zařízení realizuje vzájemný pohyb svařence a elektronové trysky při vlastní operaci svařování. Tryska se většinou nachází na vnější straně pracovní komory ve stálé poloze a při svařování se pohybuje svařenec. V některých případech je poloha trysky na plášti nastavitelná, např. pro svařování axiálních kruhových spojů různých průměrů. Někdy je tryska pohyblivá uvnitř v komoře.

Nejčastěji má polohovací zařízení podobu křížového stolu nebo otočné desky. Křížový stůl umožňuje pohyb svařence ve směry X a Y, a někdy případně potřeby i ve směru Z, viz. obr. 3.20 vlevo. Na stole jsou drážky pro upnutí svařence a jeho pohyb vykonávají speciální motory, které jsou schopné pracovat ve vakuu. Převod je přes ozubený hřebek nebo kuličkový škroub. Polohu stolu snímá inkrementační snímač a může být korigována. Kolejnice pro pohyblivý stůl jsou chráněny proti znečištění produkty svařování.

Při svařování kruhových axiálních spojů je užíváno polohovací zařízení umístěné na křížovém stole, které umožňuje rotační pohyb kolem svislé nebo vodorovné osy, nebo kolem osy libovolně nakloněné a je dimenzováno podle hmotnosti svařence, viz. obr. 3.20 uprostřed a vpravo.



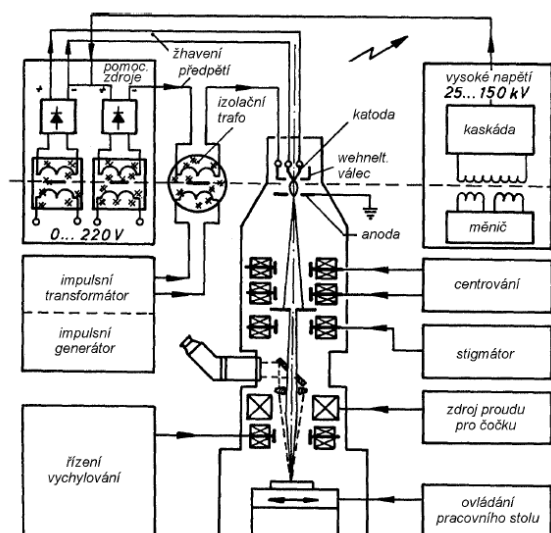
Obr. 3.20 Jednotlivé typy polohovacích mechanismů [3]

Běžně jsou posuvné stoly dimenzovány pro hmotnosti 0,5 až 5 tun, rotační pohybové mechanismy s vodorovnou osou pro hmotnosti 0,1 až 2 tuny. Snímače polohy měří s přesností mikrometrů. Výhodou přitom je skutečnost, že tato zařízení nejsou vystavena žádným silám, jako například u obrábění.

3.3.5 Zdroj vysokého napětí a řídicí systémy

Elektronová tryska potřebuje pro svou funkci výkonný vysokonapěťový zdroj. A to pro urychlování elektronů, zdroj pro žhavení katody a zdroj napětí pro řídicí elektrodu.

Potřebné urychlovací napětí je odebíráno z třífázového transformátoru, jehož primární vinutí je napájeno z třífázové sítě a sekundární vysoké napětí je usměrňováno. Toto usměrněné napětí není pro účely svařování dostatečně stálé a je dále „vyhlazováno“, nebo dále stabilizováno. Schéma zapojení je na obr. 3.21.



Obr. 3.21 Schéma zapojení elektronové trysky [3]

Vysoké napětí a oba další zdroje (žhavicího proudu a řídicího napětí) jsou k elektronové trysce připojeny kabelem se třemi vodiči. Vysokonapěťové části zdroje se nacházejí ve zvláštní nádobě naplněné speciálním izolačním olejem. Pro bezpečnost obsluhy a samotného zařízení jsou řídicí prvky a nádoba zapečetěny. Zařízení musí být používáno v souladu s příslušnými bezpečnostními předpisy.

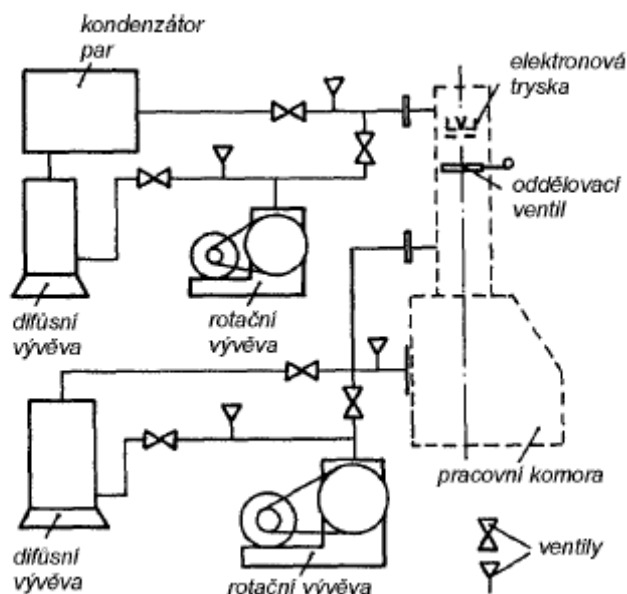
Další části zařízení, hlavně prvky pro řízení zaostřovacího proudu, pohybu svařence a řídicího systému jsou umístěny v oddělené skřínce, která se nachází u pracovní komory, viz. obr. 3.22.



Obr. 3.22 Řídicí panel elektronové svářečky [13]

3.3.6 Čerpací systém [4]

Pro zdárnou funkci elektronové svářečky je zapotřebí vytvoření vysokého vakua, viz. kap. 3.3.1,3.3.2,3.3.3. Schéma na obr. 3.23 zobrazuje složitost vakuového systému se dvěma oddělenými čerpacími soustavami pro čerpání prostoru kolem elektronové trysky a pracovní komory.



Obr. 3.23 Vakuová soustava elektronového svařovacího zařízení [4]

3.4 Svařitelnost materiálů [3], [7]

Pod pojmem „svařitelnost“ si lze představit takovou vlastnost materiálu, kdy operací svařování dojde k jeho spojení a svar bude i bez užití zvláštních opatření bez dutin, trhlin a bude mít podobné mechanické

vlastnosti (tvrdost, pevnost) jako základní materiál. I když některé výsledky svařování vykazují jisté nedostatky nebo k jejich realizaci jsou nutná zvláštní opatření, mohou být považovány za vyhovující.

Materiály lze klasifikovat podle podmínek a požadavků jako :

- A – dobře svařitelné (dobré výsledky bez zvláštních opatření)
- B – podmíněně svařitelné (přijatelné výsledky při určitých opatřeních)
- C – podmíněně použitelné (za omezených nároků na vlastnosti)

3.4.1 Legované materiály a oceli

Na Ústavu přístrojové techniky ČAV v Brně se využívá elektronového svařování ke spojování součástí kryogenních a vakuových přístrojů, které jsou vyrobeny hlavně z nerezavějící oceli. U materiálů z oceli ČSN 17 246-48 vykazovaly svary velmi dobré vlastnosti, ocel lze hodnotit jako velmi dobře svařitelnou. Naproti tomu u oceli ČSN 17 242 byly zjištěny vážné nedostatky. Vlivem většího obsahu uhlíku (0,25 %) má vlastnosti tvrdého materiálu (až 700 HV), který při rychlém chladnutí křehne a vlivem vnitřního pnutí praská. Takový svar není těsný a pro vakuové přístroje je nepoužitelný.

V případě, že je požadavek svařit materiály se zvlášť vysokým obsahem uhlíku, tzn. že je nebezpečí prasklin za studena, může se tato negativní vlastnost odstranit zahřátím součástí před a po svařování. Toto se provádí rozostřeným svazkem odpovídající hustoty plošného výkonu, s uvážením rozměrů a geometrie svařované součásti.

Při svařování nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí je nutná vysoká čistota materiálu. Obsah fosforu a síry nesmí překročit 0,015% (způsobují výrazný pokles plasticity s možností vzniku trhlin).

3.4.2 Kovy s vysokou teplotou tavení (W, Mo, Ta, Zr)

Elektronovým svazkem lze zahřát jakýkoliv materiál na určitou teplotu, která je limitována pouze jeho fyzikálními vlastnostmi, tedy i na teplotu potřebnou ke svařování. Z výše uvedeného vyplývá, že svařování např. wolframu s nejvyšší teplotou tavení 3683 K, není žádný problém a probíhá obdobně jako u jiného materiálu. Takže o svařitelnosti kovů s vysokou teplotou tavení rozhodují zejména jejich metalurgické vlastnosti a změna vlastností během svařování (např. změny struktury, kde tuto někdy nelze ovlivnit ani svařovacími podmínkami nebo dodatečnými procedurami). Nesmí také např. dojít k přetavení nebo i jen zahřátí nad určitou teplotu. Jedná se o nevratný děj (W, Mo). Tantal a zirkon se svařují elektronovým paprskem bez větších problémů.

3.4.3 Hliník

Vrstva oxidu na povrchu materiálu, který ztěžuje svařování hliníku při běžném tavném svařování v atmosféře, nepředstavuje při svařování elektronovým svazkem ve vakuu žádnou překážku. Hliník má vysokou tepelnou vodivost, což je také problém. Ovšem při vhodné volbě svařovacích parametrů (vysoká hustota výkonu a vyšší rychlost svařování) lze svařovat svazkem elektronů bez problémů a svary jsou relativně úzké a v dobré kvalitě. U tenkostěnných svařenců dochází vlivem malé tepelné kapacity a vysoké tepelné vodivosti hliníku ke zvýšení jejich teploty, která může gradovat až k teplotě tavení a může být i plošně rozšířena ve velkém rozsahu

3.4.4 Měď a její slitiny

I měď má velkou tepelnou vodivost a roztavený materiál tuhne za postupujícím svazkem elektronů velmi rychle. Vlivem toho plynné složky nestačí z materiálu uniknout a vzniká pórovitost ve svaru. Dobře svařitelná je měď s obsahem nečistot jako je P, O, C menším než 5 ppm. Bronz (slitina s barevným okovem Ni, Al, Mn, Sn) je dobře svařitelný. Mosaz (slitina se zinkem) se ve vakuu nedá svařovat z důvodu vysokého tlaku par zinku, který rapidním odpařováním způsobuje rozstříkávání roztavené mědi.

3.4.5 Titan a jeho slitiny

K vlastnostem titanu patří zejména jeho malá měrná hmotnost ($\gamma = 4,5 \text{ g/cm}^3$) a vysokou pevnost ($R_{p0,2} > 1200 \text{ Nmm}^{-2}$). Tento materiál byl již svařován v tloušťkách až 260 mm. Již vlastní přípravě pro svařování musí být věnována zvýšená pozornost, aby se vyloučily jakékoliv vady ve svárech. Titan patří mezi kovy, které reagují při poměrně nízkých teplotách okolo 250 °C s plyny, jako jsou kyslík, dusík a vodík. Tyto způsobují ztrátu jeho tvárnosti. Svařování v ochranné atmosféře vyžaduje zvláštní opatření a prakticky se nepoužívá. Prostředí s tlakem $< 7 \cdot 10^{-4}$ mbaru (vysoké vakuum) při svařování elektronovým svazkem má lepší ochranný účinek než v atmosféře a svařování pak nečiní žádné potíže. Slitiny titanu jsou pro svařování elektronovým svazkem vhodné. Malá tepelná vodivost titanu způsobuje růst až moc velkých zrn ve sváru i tepelně ovlivněné oblasti, proto je vhodné volit vysokou svařovací rychlost. I malá rozpustnost plynů, zvláště pak vodíku, zvyšuje sklon k pórovitosti. Mezi způsoby, jak snížit pórovitost patří: rozšíření sváru a rozostření a kmitání svazku, důkladné očištění styčných ploch (nejlépe mořením). Titanové díly se navíc před svařováním žihají k odstranění vnitřního pnutí.

3.4.6 Nikl a jeho slitiny

Nikl i jeho slitiny s jinými kovy jsou dobře svařitelné, včetně slitiny známé jako „Monel“ s obsahem 35% Cu. U slitin niklu pomáhá zabránit

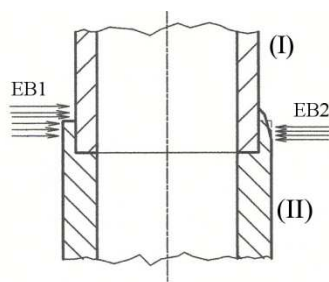
vzniku prasklin za tepla snížení rychlosti svařování. Pro svařování elektronovým svazkem jsou též vhodné též žáru-, korozi- a opotřebením-vzdorné slitiny s *kobaltem*. *Stellity* jsou zvláštní skupina kobaltových slitin, jejichž tvrdost závisí na obsahu karbidů. Svařitelnosti je u tvrdosti 45 HRC.

3.4.7 Svařování odlišných materiálů

V technické praxi je mnohdy nezbytné svařování součástek z nestejného materiálu. Materiály s podobnými metalurgickými vlastnostmi jsou poměrně lehce svařitelné. V opačném případě ovšem nastává problém s jejich svařitelností.

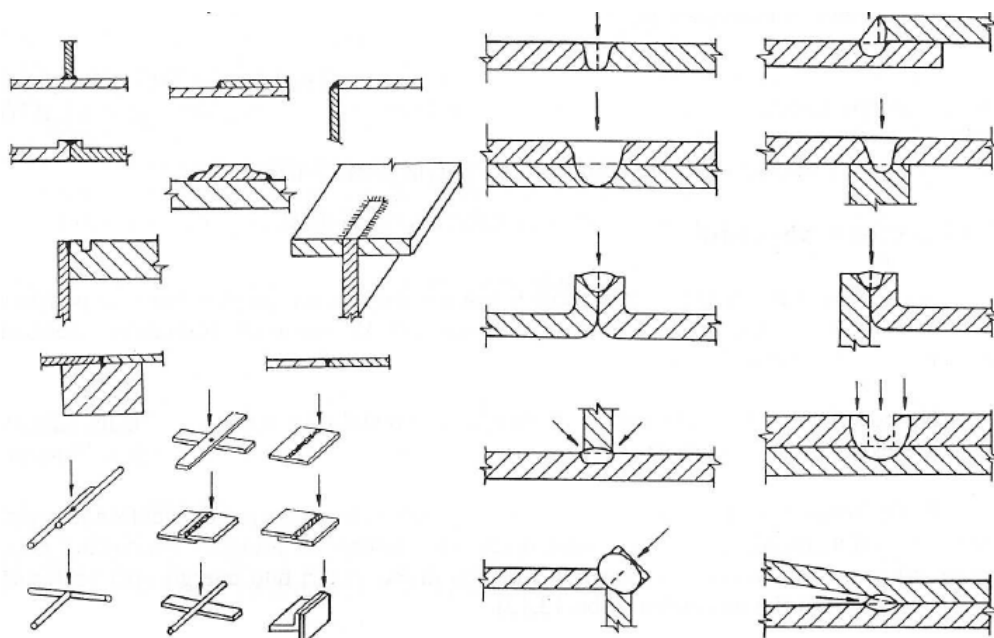
Prvním problémem je nestejná teplota tavení, resp. varu obou materiálů. Toto lze vcelku obstojně řešit tím, že se umístí místo dopadu elektronů jen na součástku s vyšší tavicí teplotou. Ovšem nalézt toto místo, naladit optimální výkon, zaostřit svazek a nastavit rychlost svařování není lehké rovněž ne reprodukovatelné. Druhým a závažnějším problémem při některých kombinacích materiálů je závislost vlastností slitiny spojovaných materiálů na poměru jejich složek a opakovatelnost tohoto poměru. Při svařování vznikají *intermetalické fáze* (intermetalická fáze je homogenní substance sestávající ze dvou nebo více kovů, většinou těžko opracovatelné a křehké). Řešení je ve způsobu tavení materiálu, kdy elektronovým svazkem neroztavíme oba materiály v oblasti jejich styku, ale jen v nejbližším okolí v součástce zhotovené z materiálu s nižší tavicí teplotou. Druhá součást setrvává v pevné fázi. V tomto případě se výhodou jeví možnost lokalizace ohřevu a přesná kontrola přiváděného výkonu. Další výhodou je prostředí s vysokým vakuem, kde jsou spoje dokonale těsné a s vyhovujícími mechanickými vlastnostmi. Konstruktor musí pamatovat na to, že v místě spojení musí být pro svazek elektronů přístupná součást s nižší tavicí teplotou.

Příklad je na obr. 3.24, kdy je spoj vytvořen roztavením jen jednoho materiálu s nižší tavicí teplotou. Při svařování se postupuje tak, že se nejdříve více rozostřeným svazkem předehejí obě součásti v místě spoje na teplotu nižší, ale blízkou nižší teplotě tavení. A následně se svazek lépe zaostří na součást s nižší teplotou tání a výkon se nastaví optimálně tak, aby se okraj v místě spoje roztavil.



Obr. 3.24 Spoj dvou rozdílných materiálů [7]

Na dalším obr. 3.25 jsou schematicky naznačeny různé typy svarů pro svařování svazkem elektronů a laserem.



Obr. 3.25 Typy svarů pro svařování svazkem elektronů a laserem [2]

3.4.8 Výhody, nevýhody a využití svařování svazkem elektronů [2]

Výhody

- je možné svařovat velké množství různých materiálů a jejich kombinace
- svary mají dobrý vzhled, tvar
- svařuje se na jeden průnik paprsku
- je možné svařovat různé tloušťky materiálů až 200 mm
- při svařování dochází jen k minimální deformaci základního materiálu

- minimální tepelné ovlivnění kolem svaru
- možnost svařování v nepřístupných místech jinými metodami nedosažitelnými
- rafinační účinky vakua
- možnost přenosu energie na vzdálenost větší než 500 mm
- perfektní ochrana přes účinky okolní atmosféry

Nevýhody

- vysoké nároky na čistotu svarových ploch a jejich přesné opracování
- požadavek přesného vedení svazku ve spáře
- vysoké investiční náklady
- nutnost vakua a dlouhý čas na jeho čerpání (podle velikosti objemu pracovní komory)
- požadavek vnitřní čistoty materiálů
- na vlastní proces sváření se využije jen malé procento celkového času
- zvýšené nároky na hygienu a bezpečnost (přítomnost vysokého napětí a rtg. záření)

Využití k praxi

- v oblasti přístrojové techniky (svařování tenkých plechů v řádech desetin mm)
- v oblasti jaderného průmyslu (kontrolní a měřicí sondy...)
- v energetickém průmyslu (rotory a statory parních turbín...)
- v leteckém průmyslu (hnací hřídele tryskového motoru, lopatky kompresoru...)
- ve vakuové technice



Obr. 3.26 Trubkvice svařená elektronovým svazkem [10]



Obr. 3.27 Membránový vlnovec svařený z 400 membrán o tloušťkách 0,05 mm [10]



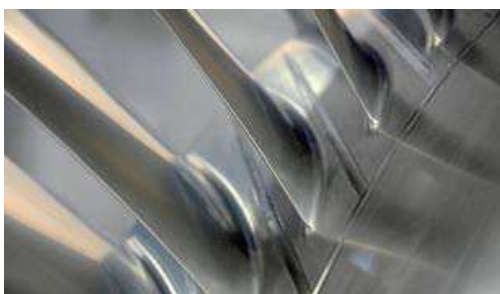
Obr. 3.28 Detail membránového vlnovce [10]



Obr. 3.29 Mechanická průchodka do vakua [10]



Obr. 3.30 Oprava vnitřní trysky motoru [11]



Obr. 3.31 Ukázka svarů na lopatkách turbíny [11]



Obr. 3.32 Ukázka svaru u materiálu bronz x ocel (hloubka 20 mm)
[11]

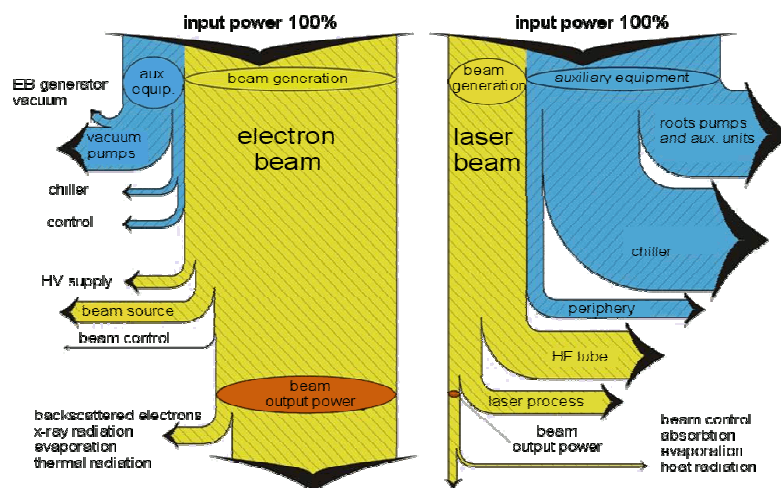
4 SROVNÁNÍ SVAZKU ELEKTRONŮ A LASERU [4], [11]

4.1 Fyzikální podstata, parametry a chování obou druhů paprsků

- elektrony mají svou určitou klidovou hmotnost a elektrický náboj, naproti tomu fotony jsou kvanta elektromagnetické energie, bez hmotnosti
- k přenosu energie do materiálu u elektron. svazku dochází nepřímo prostřednictvím nárazů elektronů do orbitálních elektronů v atomech

materiálu, naproti tomu foton jako kvantum energie přímo zvyšuje frekvenci vibrační mřížky a tím se zvyšuje teplota materiálu. Z toho vyplývá, že laserový svazek nemůže předávat svoji energii libovolnému materiálu, ale materiálu, jehož krystalová mřížka nebo obal atomů odpovídá frekvenci laseru (např. u rubínového laseru je to asi $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz. Látky, které v tomto pásmu nerezonují, nejdou laserem obrábět, jako např. sklo

- průnik svazku do materiálu je u elektronů větší než u fotonů (asi 1000x) a zasahuje i objemově větší část materiálu
- z hlediska optiky jsou oba typy rovnocenné (ohyby na hranách, zúžení, fokusace paprsků...)
- elektronový svazek je dobře ovladatelný (parametry: urychlovací napětí, proud svazku, perioda pulsu se dají snadno a spojitě nastavit), u laseru je fotonový zdroj těžce ovladatelný (parametry: energie pulsu a perioda se dají těžko ovlivnit, nepřímo přes budící výbojku nastavením dobou a velikostí budícího napětí)
- hustota plošného výkonu je u laserového svazku větší o jeden řád
- zaostření je shodné u obou typů (i když teoreticky je lepší u elektron. svazku)
- využití energie je u elektronového svazku vyšší než u laserového, viz. obr. 4.1



obr. 4.1 Srovnání využití energií u elektron. svazku a laseru [11]

4.2 Srovnání obou metod při obrábění [4]

- elektronovým svazkem se dají zhotovit otvory o průměru 0,01 až 0,1 mm až do hloubky od 0,2 do 2 mm a poměru (hloubka : průměr) od 20 do 30:1. Laserovým svazkem se vytvářejí „díry“ o průměru 0,2 až 0,5 mm při hloubce od 2 do 5 mm a poměru 10 až 15:1.
- tyto hodnoty se ale dají v případě laseru různými zvláštními úpravami významně zvýšit, rozměr otvorů 0,01 mm a poměru až 50:1

- obrobiteľnosť materiálu závisí v prípade elektronového svazku predovšetkým na merné energii tání, naproti tomu u laseru na odpařovací energii
- čím větší je tepelná vodivost u použití laseru, tím obtížnější je obrábění (např. obrábění mědi, stříbra a zlata laserem je stejně obtížné jako obrábění wolframu)
- čím větší je hustota materiálu při použití svazku elektronů, tím horší je obrábění (svazkem elektronů s energií nad 70 keV se obtížně obrábějí materiály s hustotou menší než 5 kg/dm³), pro obrábění lehkých kovů je lepší použití laseru
- tepelné ovlivnění materiálu je u obou metod zhruba stejné
- přesnost při obrábění laserem je zejména u otvorů lepší než u svazku elektronů, rovněž tak opakovatelnost
- u svazku elektronů jsou otvory „oválné“ a méně přesné než u laseru
- celkově je manipulace s obrobky u elektronového obrábění snažší (a to i za podmínky nutnosti vytvoření vakua a následného vychylování paprsku, které je také lepší)
- obrábění elektronovým svazkem a laserem jsou jediné metody, které se hodí pro mikroobrábění
- laser má jednodušší elektronické vybavení
- celkově je zařízení na užití elektronového svazku nákladnější, vyžaduje složitější seřizování a obsluhu, ale o to přesnější
- údržba u laseru je tedy jednodušší (jednodušší elektronika a delší životnost budící výbojky)

5 APLIKACE VYUŽÍVAJÍCÍ SVAZKU ELEKTRONŮ [3], [10], [12]

„Hlavním cílem ohřevu materiálu při svařování je jeho roztavení v místě styku dvou součástí, které se smísí a po ztuhnutí vytvoří pevné spojení obou částí. Probíhají tu však i jiné fáze procesu. Během pronikání elektronového svazku do hloubky jistá část materiálu přejde do plynného skupenství, zatím co jiná část se sice ani neroztaví, ale může v ní dojít k metalurgickým změnám. Ohřev elektronovým svazkem také můžeme řídit tak, že se žádná část ani neroztaví (a tím samozřejmě ani nevypaří). Tato skutečnost umožňuje uplatnit řadu nových procesů nejen u kovů, ale plastických nebo keramických materiálů. Při nich elektronový svazek slouží jako neúnavný nástroj ke změně vlastností nebo obrábění (odstraňování) materiálu.“ [3]

5.1 Děrování [3], [10], [12] (angl. drilling)

5.1.1 Historie

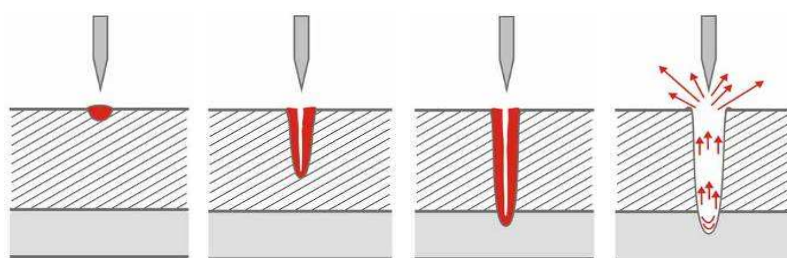
„Prvním známým použitím elektronového svazku k obrábění bylo vytváření clonek s miniaturními otvory pro použití v elektronových mikroskopech a to přímo svazkem v mikroskopu samém (práce von Ardenne okolo roku 1938). V roce 1942 von Borris obdržel patent na

elektronově-optický vrtací přístroj. V roce 1949 německý fyzik Karl-Heinz Steigerwald, který se zabýval mimo jiné výrobou safírových ložisek do hodinek, zahájil se svými spolupracovníky výzkum tepelného působení svazku. Ten v roce 1952 vyústil v konstrukci prvních průmyslově použitelných vrtacích zařízení. Ze všech uvedených technologií vyžaduje obrábění nejvyšší výkonovou hustotu svazku. Aby došlo k odpaření materiálu, je třeba dosáhnout hodnot v řádu 0,1 až 1 MW/mm². Moderní zařízení, pracující většinou s urychlovacím napětím 150 kV, dosahují úctyhodné produktivity až 3000 „vyvrtaných“ otvorů za sekundu. Nejmenší dosahované průměry otvorů se pohybují okolo 25 μm a poměr hloubky k průměru otvoru je až 25:1. Touto metodou lze vrtat i díry, které nejsou kolmé k povrchu součástky“ [10]. U hlubokých děr, s poměrem délky k průměru díry až 100:1, musí být průměr paprsku 2x až 4x menší, než je požadovaný průměr vrtané díry. Tolerance vyvrtané díry je 5 až 20 % jejího průměru. Příklad viz. obr. 5.2.

5.1.2 Princip metody

V místě dopadu svazku elektronů se mění jejich kinetická energie na tepelnou. Základní materiál se taví a potom odpařuje ven. Na spodní straně musí být přidán další materiál, který zabezpečí odvod roztaveného kovu z kapiláry. Jak uvedeno v kap. 3.2.5 paprsek vniká do materiálu do určité hloubky. Tam se pohyb elektronů zastaví. Vzniklá tepelná energie, která se koncentruje pod povrchem materiálu, způsobuje erupční odpařování materiálu. Po plné penetraci paprsku na spodní materiál, se tento odpařuje a vzniklým vysokým tlakem velkou rychlostí vyhání drobné částičky základního materiálu, viz. obr. 5.1.

Obr. 5.1 Princip metody obrábění elektronovým paprskem [11]



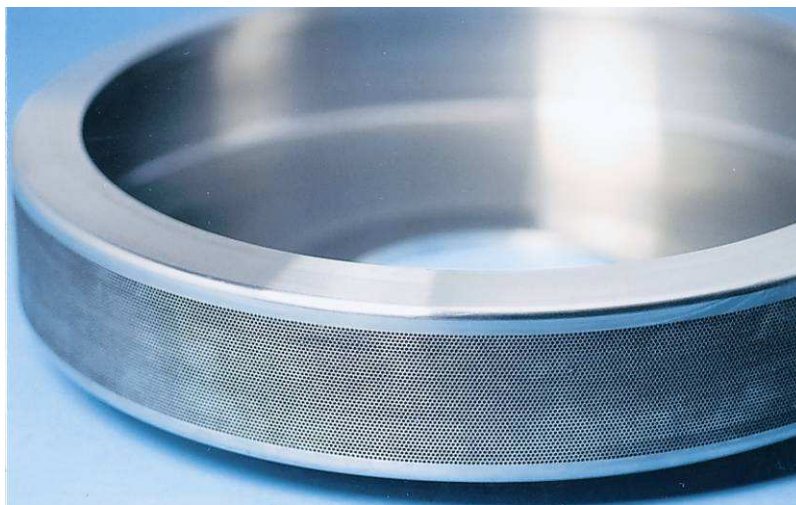
a) vnik elektronů do materiálu, b) kapilára se prohlubuje, c) úplné proniknutí paprsku přes celou šíři materiálu, d) paprsek narazí do spodního materiálu, ten způsobí svým odpařováním explozi a vysokým tlakem vyhání roztavený kov z kapiláry

5.1.3 Pracovní režimy:

- pulzní – používá se nejčastěji při aplikacích vrtání elektronovým paprskem (drilling), doba pulzu je od 2 μs do 0,01 s, při frekvenci pulzů 500 až 10 000 Hz
- kontinuální (nepřetržitý) – odpařování materiálu probíhá plynule

5.1.4 Obrobitelnost materiálů

Hlavně závisí na jejich fyzikálních vlastnostech a nezávisí na mechanických vlastnostech. Elektronovým svazkem se obrábí především materiály jinými metodami těžko obrobitelnými, např. žárovečné oceli, austenitické oceli používané při stavbě jaderných reaktorů, slitiny zinku s niobem, hliníkové a titanové slitiny, slitiny křemíku, tantalu, wolframu a speciální slitiny používaných v letectví a kosmonautice, drahokamy. Elektronovým svazkem se špatně obrábí mosaz, bronz, zinek, hořčík a slinované kovy.



Obr. 5.2 Odstředivý válec na výrobu skelných vláken [11]

5.2 Tepelné zpracování povrchové vrstvy [3], [5], [9], [11] (angl. surface treatment)

„Schopnost intenzivního elektronového svazku vysokou rychlostí zahřát malý objem materiálu spolu s rychlým vychylováním svazku a velmi dobrou regulovatelností a reprodukovatelností celého procesu přináší nové možnosti v tepelném zpracování kovů. Počítačem řízené vychylování umožňuje dosáhnout téměř libovolného rozložení tepelného příkonu v ploše a tak ovlivnit přesně definovanou oblast součástky. Kontrolou procesních parametrů lze zajistit požadovaný teplotní profil.“ [11]

Tepelným zpracováním ocelí [9], tzn. ohřevem materiálu na požadovanou teplotu a přesně definovaným způsobem ochlazování, resp. řízeného ochlazování dosahujeme změnu struktury a s tím spjatou změnu

mechanických vlastností materiálů. Mezi základní způsoby tepelného zpracování patří:

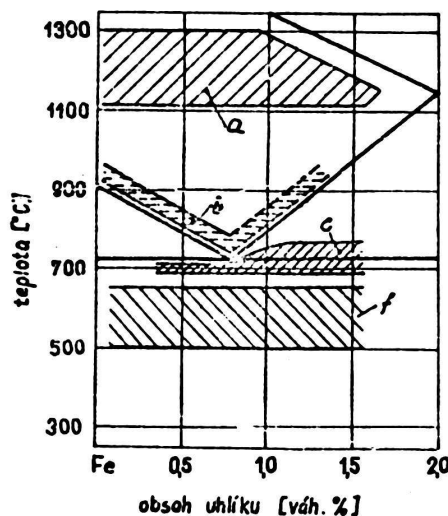
1) Žihání je tepelná operace, kdy dochází k ohřevu materiálu na předepsanou teplotu, která se po určitou dobu udržuje a potom je plynule a pozvolně snižována. Žihání se dále dělí na níže uvedené metody, znázornění teplot při žihání je na obr. 5.3.

Žihání na měkko – metoda při níž má materiál nejnižší tvrdost a naopak vysokou tažnost. Ocel se zahřeje na 680°C až 720°C a následně se pomalu ochlazuje. Při této metodě dochází ke změně lamelární struktury cementitu z perlitu na kulovité částice uložené v základní feritické hmotě. Výsledný materiál má měkkou a tvárnou strukturu (viz obr. 17 oblast c).

Žihání k odstranění pnutí – touto metodou se odstraňuje nebezpečí dodatečných deformací u ocelí. Stejným způsobem jako předchozí metoda v rozmezí teplot 500°C až 650°C. Tímto způsobem je odstraněno z materiálu vnitřní pnutí, které vzniklo při předchozím tepelném zpracování (viz obr. 17 oblast f).

Žihání normalizační – tato metoda se provádí 30°C až 50°C nad čarou teplot rovnovážného diagramu GOSE a při ní se ocel **austenitizuje**. Ochlazuje se volně na vzduchu. Tímto způsobem se docílí zjemnění zrna austenitu a vytvoření jemné rovnoměrné struktury, tvořené směsí feritu a perlitu, které mají dobré mechanické vlastnosti. Použití je výhradně u ocelí podeutektoidních (viz obr. 17 oblast b).

Žihání homogenizační (difuzní) – provádí se u ocelových litých nástrojů při teplotě ohřevu na 1000°C až 1200°C (v některých případech až k blízkosti solidu), po dobu cca 4 hodin. Ochlazování se provádí přímo v tepelném zařízení, např. peci. Tento způsob snižuje odmíšení při vysokých teplotách, kdy je dostatečná rychlost difuze nejen uhlíku, ale i atomů ostatních přísadových prvků. Po homogenizačním žihání se provádí vždy normalizační žihání za účelem zjemnění zrna. (viz obr. 17 oblast a).



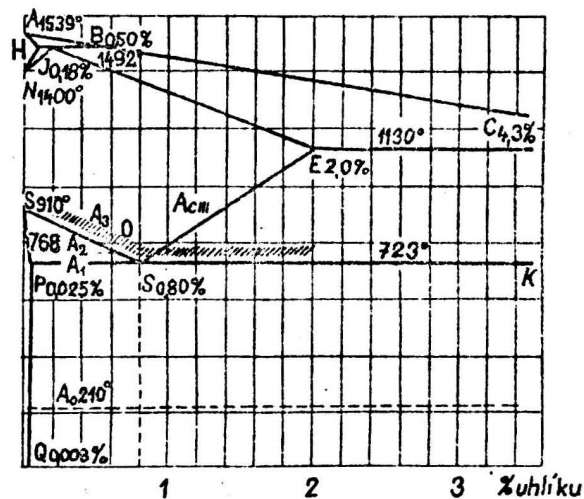
Obr. 5.3 Rovnovázný diagram s oblastmi teplot pro žihání [9]

2) Kalení, je metoda tepelného zpracování, kdy je ocel ohřáta na austenitizační teplotu a potom je dostatečně rychle ochlazena (nadkritickou rychlostí). Tímto způsobem získá materiál dostatečnou tvrdost, dobrou řezivost u nástrojů, odolnost proti opotřebení. Kalicí teplota je rozdílná podle druhu oceli. Nástrojové oceli uhlíkové a nízkolegované se kalí při teplotách 720°C až 850°C, slitinové oceli s vyšší m obsahem legur se kalí při teplotách 820°C až 1000°C, ledeburitické oceli s obsahem chrómu při teplotách 1100°C. Nejvyšší kalicí teplota je pro rychlořezné oceli, které se kalí v rozmezí teplot 1180°C až 1320°C. Průběh kalicích teplot v rovnovážném diagramu pro oceli uhlíkové je znázorněn na obr. 5.4.

Běžné kalení – do prostředí o pokojové teplotě, chlazení probíhá nadkritickou rychlostí, ochlazování povrchu a jádra je ale rozdílné, a proto dochází k pnutí, deformaci a nebezpečí roztržení nástroje.

Termální kalení, po ohřátí na austenitizační teplotu proběhne ochlazení nadkritickou rychlostí, potom je prodleva na vyrovnání teploty. Vlastní operace probíhá v solné lázni, pak se nástroj vyndá a dochlazení se provede na volném vzduchu. K přeměně austenitu pak dochází v celém průřezu, sníží se tím vnitřní pnutí a tím i deformace.

Izotermické kalení – materiál se zahřeje na austenitizační teplotu a nechá se v kalicí lázni tak dlouho, než proběhne zcela přeměna austenitu. Takto zakalený materiál se dále nepopouští, protože struktura je bainitická. Při nižších teplotách kalicí lázně se dosahuje vyšší tvrdosti (v rozsahu středních tvrdostí dosahuje menšího pnutí, menších deformací a vyšší houževnatosti).



Obr. 5.4 Rovnovážený diagram s oblastmi kalicích teplot [9]

3) Při kalení vzniká velmi tvrdá a křehká martenzitická struktura, která je nechtěná a je příčinou vzniku trhlinek. Ohřevem zakalené oceli uvedenou strukturou na teplotu nižší než A_{C1} (723°C) a následným ochlazením lze zvýšit houževnatost za současného snížení tvrdosti. Mluvíme o **popouštění**.

V případě, kdy je popouštěcí teplota nižší jak 350°C, hovoříme o popouštění na nízké teploty – **napouštění** a v případě teplot v rozmezí

mezi 350°C až 700°C, hovoříme o popouštění na vysoké teploty – **zušlechťování**.

Některé z metod a i mnohé další, u kterých je jako zdroj tepelné energie využit svazek elektronů, jsou uvedeny níže.

5.2.1 Žihání [11] (angl. annealing)

Žihání můžeme zařadit do skupiny tepelného zpracování v tuhé fázi, tedy tehdy v případech, kdy nedochází k roztavení základního materiálu. Tato metoda se uplatňuje hlavně při lokální povrchové rekrytalizaci. Je vhodná pro všechny kovové materiály, teplota se udržuje mírně pod bodem tavení materiálu, rychlé tuhnutí roztaveného kovu vede k extrémně jemnozrnné hraniční vrstvě, hloubka přetavené vrstvy je od 0,1 do 5 (10) mm.

5.2.2 Kalení [11] (angl. hardening)

Rovněž patří do skupiny tepelného zpracování v tuhé fázi. Je zde využito známé vlastnosti kovů a to, že po velmi krátkou dobu trvajícím ohřevu tenké povrchové vrstvy dochází k rychlému odvodu tepla z horké zóny do hloubky materiálu a tím k zakalení povrchové vrstvy materiálu. Zde je pokles teploty až 10^4 K/s. Lze provádět u ocelí $> 0.18\% \text{ C}$, lze přesně definovat a zaměřit místa kalení, resp. vytvrzení, nedochází k zbytečnému tepelnému ovlivnění okolního materiálu, hloubka vytvrzené vrstvy se pohybuje od 0,1 do 1,7 mm.

5.2.3 Přetavení [3], [8], [11] (angl. remelting)

Tato operace patří do skupiny tepelného zpracování v tekuté fázi, protože při ní dojde k roztavení materiálu. Přetavení povrchové vrstvy má význam při zhutňování litiny či hliníkových licích slitin. Jedná se o obdobu žihání, ovšem v tekuté fázi, kdy teplota vrchní vrstvy je těsně nad tavicí teplotou základního materiálu a svazek elektronů neproniká do hloubky. Následné rychlé ochlazování má ale jiný účinek než při vytvrzování. Vytvoří se jemná mikrostruktura z přesyceného tuhého roztoku, který sníží segregaci a transformuje křehké intermetalické fáze na tvárné.

Pro přetavování touto metodou se hodí pouze materiály, u kterých je vnitřní struktura ovlivňována změnami rychlosti tuhnutí, např. u vzorku žáruvzdorné oceli X 20 CrMoV 12 1 zvýšení tvrdosti z 230 na 550 HV_{0,3} současně se zvýšením únavové pevnosti z 380 na 550 N/mm² při teplotě 20°C, a z 250 na 390 N/mm² při teplotě 500°C. Nebo přetavování s přidavkem zvláštních složek, např. u hliníkových slitin, např. AlSi 12 se dosáhlo podstatně jemnějšího zrna a zvýšení tvrdosti. Této vlastnosti se docílí tak že pokryjeme povrch slitiny nelegovanou ocelí nebo vysoce legovanou chrom-niklovou ocelí, a to jako fólie nebo vrstvy nanesené elektrochemicky.

Bezpodmínečná je co nejvyšší rychlost ochlazování po přetavení, proto je nejvhodnější bodové přetavení. Někdy se může podařit i lineární anebo i plošné.

5.2.4 Navařování [5], [11] (angl. deposition)

„Obecně je navařování významnou technologií renovací opotřebených součástí, při kterém se získávají původní rozměry a tvar součásti se stejnými, ale častěji lepšími vlastnostmi povrchu a tím výrazně vyššími užitnými vlastnostmi.

Efektivita renovací navařováním se pohybuje do cca 70% ceny nového náhradního dílu nebo nástroje. Závisí na řadě faktorů: ceny a dostupnosti nové součásti, pracnosti výroby, dostupnosti potřebných zařízení, rozsahu poškození, nutnosti dokončovacích operací a cenou přídavných materiálů.

Hlavní podmínkou úspěšnosti renovace je správná analýza druhu opotřebenosti, vlivu prostředí, pracovních podmínek a na základě tohoto rozboru návrh odpovídající technologie navařování a výběr příslušného přídavného materiálu.“ [5].

Mezi hlavní problémy při navařování patří tepelné ovlivnění, které musíme minimalizovat. Při běžných metodách vzniká v materiálu značně rozsáhlá tepelně ovlivněná oblast šířky 1 - 4 mm. Oblast použití je při renovacích značně poškozených nástrojů např. zápustek pro zápustové kování nebo vylomených hran velkých střížných nástrojů. Zde je k dispozici mnoho přídavných materiálů.

Tepelně ovlivněná oblast má potom odlišné strukturní složení, velikost zrn a také tvrdost. Výsledkem je změna napjatosti v okolí návaru, která může být společně s tvrdými a křehkými fázemi příčinou vzniku trhlin. Proto je po každém navaření nutné další tepelné zpracování. Tepelné zpracování je nutné i pro dosažení odpovídajících mechanických vlastností návaru. Navíc dochází při lokálním tepelném zatížení přesných forem (např. na plasty), kokil na tlakové lití nebo tvářecích nástrojů k prostorovým deformacím a změnám rozměrů. Na tyto nástroje existuje metoda navařování s minimálním tepelným ovlivněním a omezením výše popsaných negativních jevů, tzv. **mikronavařování**.

Při operaci navařování, resp. plátování dojde k celoplošnému svaření, resp. natavení přidané vrstvy materiálu. Disperzním přetavením se dosáhne rozptýlení drobných částic v tavenině. Tímto způsobem se zvyšuje otěruvzdornost houževnatého materiálu obohacením o tvrdá zrna.

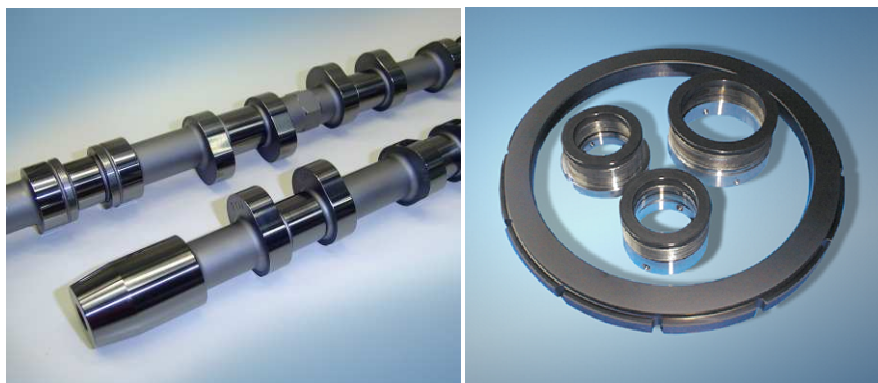
U laserového, resp. elektronového svazku je podle rozložení energie na ploše a rychlosti pohybu svazku možné tavit prášek do návaru s difúzním spojením se substrátem, nebo částečně natavit i základní materiál s metalurgickým spojením. Běžně užívaná hodnota hustoty energie svazku je mezi 10^5 až 10^6 W.cm⁻² a navařovat lze rovinné plochy a rotační vnější i vnitřní plochy v tloušťkách 50 až 1000 μm. Mezi

nejpoužívanější přídavné materiály patří materiály na bázi železných a kobaltových slitin s tvrdostí cca 60 HRC, niklových slitin s tvrdostí 64 HRC, karbidů wolframu a molybdenu s tvrdostí 1600 HV, karbidu niobu o tvrdosti 2000 HV a materiálu s nejvyšší tvrdostí 3200 HV karbidu titanu.

5.2.5 Povlakování [5], [11] (angl. coating)

Patří mezi povrchové úpravy materiálů a jeho účelem je protikorozní ochrana, někdy také dekorativní funkce, změna mechanických vlastností povrchu materiálu (tvrdost, změna velikosti třecí síly, změna tepelné a elektrické vodivosti povrchu, zvýšení otěruvzdornosti, atd.) Mezi povrchové úpravy patří: kovové povlaky, anorganické, tenké vrstvy PVD, CVD, organické nátěry a plastické hmoty.

Např. povlakování diadur®/DLC (fa pro-beam) zvyšuje otěruvzdornost nástrojů. Diadur®/DLC (angl. Diamond like Carbon) se chová jako diamant, má vysokou mikrotvrdost, otěruvzdornost, extrémně nízký koeficient kluzného tření, odolnost proti korozi. V případě povlakování hliníkových materiálů se také eliminuje problém svařování za studena. Povlaky jsou na povrchu nástrojů vytvářeny depozicí amorfního uhlíku z plynné fáze, jejich tloušťka je od 1-4 μm a mohou být nanášeny jak na kovové tak keramické materiály. Požadovaná teplota procesu je nižší než 150 $^{\circ}\text{C}$, a proto nedochází k ovlivnění vlastností základního materiálu (tvrdosti a deformace), viz. obr. 5.5.



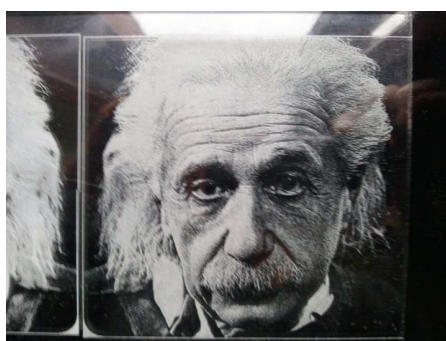
Obr. 5.5 Ukázky povlakování vačkových hřídelí a hlav [11]

5.3 Texturování a gravírování [10], [13], [14] (angl. texturing and gravure)

Gravírování je „přenesení grafiky“ (textu, obrázku) pomocí elektronového svazku na kovový povrch.

Číslicové řízení polohy místa dopadu svazku elektronů se rovněž uplatňuje při tvorbě obecných textur na povrchu materiálu. Vlastní nastavení parametrů procesu a vlastnosti základního materiálu určují, zda a v jaké míře dojde k přetavení nebo dokonce k odpaření materiálu. Takto lze například vytvářet značky či nápisy na povrchu součástek, dále je

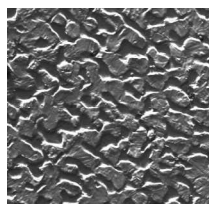
možné například „vyražení“ sériového čísla svaru s logem firmy a podobně. Rovněž lze vytvářet na kovové podklady i fotografie, viz. obr. 5.4.



Obr. 5.4 Ukázky přenesení snímku na podložku [13]

Zatím nejnovější využití svazku elektronů je v 3D tiskárnách, kde princip je obdobný jako u výše uvedené metody gravírování. Tato technologie s využitím elektronového svazku není pro svou náročnost příliš rozšířená. Pro tvorbu objektu se používá zpravidla titanový prach. Nespornou výhodou této technologie je výjimečná přesnost a vynikající technické vlastnosti vytištěných objektů. Ceny strojů však dosahují závratných hodnot, neboť celý proces, jak uvedeno výše v předchozích kapitolách, je třeba provádět bez přítomnosti vzduchu.

Další využití je **texturování** povrchu pracovních válců při lisování plechů na karoserie motorových vozidel. Princip této metody spočívá v natavování povrchu pracovního válce elektronovým paprskem. Protože se vlastní proces provádí ve vakuu, má okraj každého „mikrokráteru“ čistý kovový charakter bez přítomnosti oxidů. Je možné zabezpečit pravidelnou geometrii uspořádání kráterů na povrchu válce i na velké vzdálenosti, na rozdíl od laseru. Na obr. 5.5 je ukázka pozinkovaného plechu, vylisovaného válcem s texturou metodou EBT (elektron beam texturing). Jeho drsnost je v rozmezí od R_a 0,4 do 5 μm .



Obr. 5.5 Povrch pozink. plechu, zvětšeno 500x [14]

ZÁVĚR:

Po provedení podrobné rešerše dostupných zdrojů jsem v mé bakalářské práci zanalyzoval využití svazku elektronů v průmyslové praxi.

Historie této metody svařování, resp. zisku vysokovýkonného paprsku sahá do začátku minulého století. Na objevu a následném vývoji se podíleli také tehdejší přední vědci a držitelé Nobelových cen (Röntgen, Millikan, Thomson). U nás se v bývalém Československu elektronové svařování začalo rozvíjet v 60. letech minulého století a to jako první Výzkumný ústav zvaračský v Bratislavě a v roce 1965 také Ústav přístrojové techniky ČSAV v Brně.

I když má tato metoda svařování svoje nezastupitelné místo zejména při svařování vysokoreaktivních kovů (např. zirkon) , v jaderném, leteckém, automobilovém průmyslu, nedomnívám se že by se počet pracovišť, kde bude toto zařízení pracovat, výrazně zvýšil a že by docházelo k dalšímu vývoji. Razantní vývoj v dnešní době zaznamenává „konkurenční“ metoda svařování laserem a to hlavně pro svoje pořizovací náklady, které jsou řádově nižší než u elektronové svářečky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DVOŘÁK, Milan et al. *Technologie II*. 2vyd. Brno : CERM, 7/2004. 237 s. ISBN 80-214-2683-7.
- [2] KUBÍČEK, Jaroslav, *Sylabus přednášek Technologie II, část Svařování*. 1vyd. Brno, 5/2006. 115 s.
- [3] SCHULTZ, Helmut, *Electron Beam Welding*. 1vyd. Cambridge : Abington Publishing, 1/1994.240 s. ISBN 978-1855730502.
- [4] VISSER, Andreas., *Werkstoffabtrag durch Elektronen- und Photonenstrahlen*. 104vyd. Bern: Technische Rundschau, 3/1972.126 s.
- [5] KUBÍČEK, Jaroslav, *Renovace a povrchové úpravy, v. 1.3*. 1vyd. Brno, 12/2006. 52 s.
- [6] TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava : ALFA, 1989. Zváranie elektrónovým lúčom, s. 188. ISBN 80-05-00097-9.
- [7] ZOBAČ, Ladislav. *Praktická příručka pro uživatele elektronové svářečky*. Brno, 2007. 29 s.
- [8] ZOBAČ, Ladislav; ZOBAČ, Martin. *Elektronové svářečky, jejich historie a současnost v ČR*. Brno , 2007. 19 s.
- [9] ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Vyd. 1. Brno : CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.
- [10] *Ebt.isibrno.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-08-20]. Svařování elektronovým svazkem. Dostupné z WWW: <<http://ebt.isibrno.cz/svarovani-elektronovym-svazkem>>.
- [11] *Pro-beam.com* [online]. 2008 [cit. 2011-08-20]. Services - pro-beam. Dostupné z WWW: <<http://www.pro-beam.com/en/leistungen1.htm>>.
- [12] *Mmspektrum.com* [online]. 2008 [cit. 2011-08-20]. Nekonvenční metody obrábění. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2>>.
- [13] *Cs.wikipedia.org* [online]. 22.4.2009 [cit. 2011-08-20]. Svařování. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování>>.
- [14] *Ksp.tul.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-10-03]. Morfologie povrchu plechů používaných pro karosářské výlisky. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/Morfologie.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Veličina	Jednotka/hodnota
m_e	hmotnost elektronu	$9,1 \cdot 10^{-32}$ kg
q	elektrický náboj	$-1,602 \cdot 10^{-19}$ C
v	rychlost	$m \cdot s^{-1}$
J_e	proudová hustota emisního proudu	$A \cdot cm^{-2}$
A_j	konstanta emise závisící na povrchu	$A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$
T	absolutní teplota	K
e	Eulerovo číslo	2,71828
k	Boltzmannova konstanta	$1,38 \cdot 10^{-23}$ J·K ⁻¹
F	síla (elektrická)	N
E	intenzita elektrického pole	$N \cdot C^{-1}$ (V·m ⁻¹)
A	práce	J
U	elektrické napětí (rozdíl potenciálů)	V
W_k	kinetická energie	J
B_e	magnetická indukce	H
α	úhel	°
d	vzdálenost (hloubka vniku svazku)	m (mm)
ρ	hustota látky	$kg \cdot m^{-3}$
λ	vlnová délka	m (nm)
f	frekvence	Hz (PHz)
t	čas	hod (μs)
p	tlak (atmosférický)	Pa (mbar)
V	objem	m ³
P	výkon	W (kW)
x, y, z	souřadnice os	-
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	Pa (MPa)

