



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ

ELECTRON BEAM WELDING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN SKALKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ RICHTER

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Skalka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Technologie svařování svazkem elektronů

v anglickém jazyce:

Electron beam welding technology

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současná zvyšující se světová poptávka po velkých odlitcích a výkovicích výrazně prodlužuje jejich dodací termíny. Velkorozměrové součásti mohou být konstrukčně rozděleny do menších celků, které mohou být vyrobeny z různých materiálů, jsou dostupnější a lépe opracovatelné než celé výrobky. Do konečných rozměrů jsou tyto menší části svařovány svazkem elektronů s vysokou výslednou kvalitou svaru a při zachování nízkých nákladů na výrobu.

Cíle bakalářské práce:

Provedení literární rešerše popisující technologii svařování svazkem elektronů se zaměřením na rotující součásti.

Seznam odborné literatury:

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3.

Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.

KOUKAL, J., SCHWARZ, D. a HAJDÍK, J. Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.

MESSLER, R. W. Jr.. Principles of Welding. New York, USA. 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.

PTÁČEK, L. a kolektiv. Nauka o materiálu II.2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Richter

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

SKALKA Jan: Technologie svařování svazkem elektronů.

Bakalářská práce je věnována rozboru technologie svařování elektronovým paprskem. Jedná se o nekonvenční metodu svařování, vyznačující se vysokou kvalitou svaru a úzkou tepelně ovlivněnou oblastí svařovaných dílů. Své uplatnění si tato technologie, díky svému vývoji a kvalitám, našla v mnoha průmyslových odvětvích, především v letectví a kosmonautice. Limitujícím prvkem této metody je vakuum, které je pro svařování elektronovým svazkem nutné. Avšak i v této oblasti, se vývoj nových technologií nezastavil a přinesl konkrétní řešení daných problémů. Práce je rovněž zaměřená na svařování rotačních součástí svazkem elektronů, jak v kusové tak sériové výrobě.

Klíčová slova: nekonvenční metoda, tepelně ovlivněná oblast, rotor, svar, vakuum

ABSTRACT

SKALKA Jan: Electron beam welding technology.

The bachelor thesis is devoted to analysis of electron beam welding technology. It is unconventional method of welding characterized by high quality weld and narrow heat-affected zone of welded parts. This technology, due to its development and qualities, has found its application in many industries, primarily in aviation and astronautics. The vacuum is limiting feature of this method and it is necessary for electron beam welding. However, even in this area, the development of new technologies have not stopped and generates concrete solutions to those problems. The thesis is also focused on electron beam welding of rotary parts in the piece and serial production.

Key words: unconventional method, heat-affected zone, rotor, weld, vakuum

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKALKA, Jan. *Technologie svařování svazkem elektronů*. Brno, 2014. 32 s., CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Tomáš Richter.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Technologie svařování svazkem elektronů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jan Skalka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Tomáši Richterovi a doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za jejich čas, cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	9
1 SOUČASNÉ SVAŘOVÁNÍ ROTAČNÍCH SOUČÁSTÍ.....	10
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ PAPRSKEM ELEKTRONŮ	12
2.1 Generátor EP	13
2.2 Pracovní komora.....	15
2.3 Interakce elektronů s materiálem.....	16
2.4 Svařitelnost materiálů technologií EP.....	19
2.5 Vícebodové a multiprocesní svařování	23
2.6 Svařování bez vakua	25
2.6.1 Technologie plazmového okna	26
3 SVAŘOVÁNÍ ROTAČNÍCH SOUČÁSTÍ EP.....	28
ZÁVĚR.....	32

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých zkratk a symbolů

Seznam obrázků

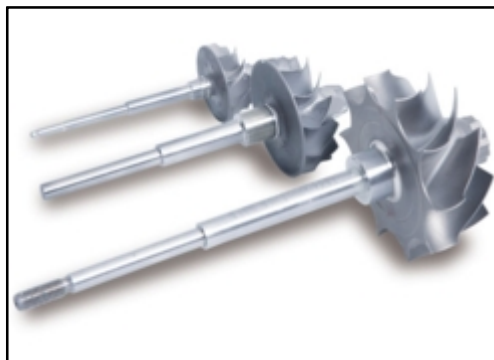
Seznam tabulek

ÚVOD [1], [4]

Technologie svařování elektronovým paprskem je nekonvenční metoda svařování, která díky svým výhodám a neustálému vývoji čím dál více boduje na poli nejrůznějších průmyslových odvětví. Dokáže redukovat stále zvyšující se celosvětovou poptávku po velkoobjemových výkovech a odlitcích stejně dobře, jako produkovat svařené součásti nejrůznějších velikostí o té nejvyšší kvalitě svaru. Snižuje cenu a zkracuje dodací lhůty výrobků, které se dají svařit v krátkém časovém intervalu z menších třeba již předem obrobených a tepelně zpracovaných geometricky jednodušších dílců.

Díky své vysoké rychlosti svařování, hloubce a kvalitě svaru, lze pomocí EP vyrobit i jinak drahé a těžko obrobitelné součásti. V sériové výrobě či zkušebních sériích je celá řada nových aplikací v leteckém, lodním, energetickém či jiných průmyslových odvětvích, které požadují vysokou kvalitou spojených součástí a v mnoha případech je metoda EP jedinou, která vysoké nároky dokáže splnit. Neopomenutelnou výhodou technologie EP je v neposlední řadě svařitelnost nejrůznějších metalurgicky rozdílných materiálů, u kterých je konvenčními metodami svařování naprosto nemožné.

Na obr. 1 je ukázka výrobků svařených ve vakuu metodou EP.



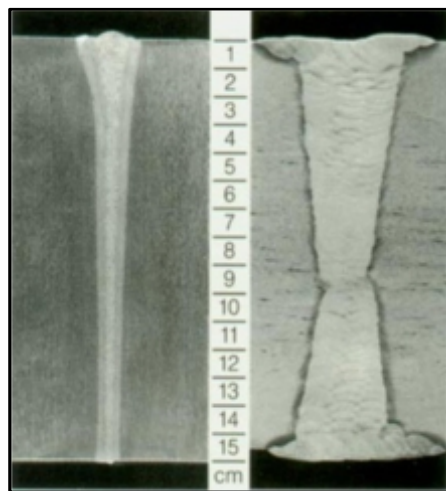
Obr. 1 Ukázka produktů svařování EP [2], [3], [44],

1 SOUČASNÉ SVAŘOVÁNÍ ROTAČNÍCH SOUČÁSTÍ [50], [51], [52], [53], [54], [55], [58], [59]

Svařované rotory a rotační součásti mají oproti jednodílným mnoho výhod a předností. Jednotlivé kované, či jinak vyrobené díly se pomocí procesu svařování spojují v jeden celistvý rotor. Menší části se dají snáze a kvalitněji vyrobit a podrobit kontrole, oproti velkým jednodílným rotačním součástem. Tato výhoda nemusí být tak zásadní u lehkých rotorů, ale přichází na scénu zejména tam, kde rotory mohou dosahovat hmotnosti řádově několika stovek tun, např. v energetickém a lodním průmyslu. Nutné je taky myslet na to, že na jednotlivé části rotoru mohou být kladeny rozdílné požadavky na mechanické vlastnosti, teplotu nebo obklopující médium. Díky procesu svařování je možnost navrhnout materiál jednotlivých částí rotoru tak, aby rotor pracoval co nejlépe. Což je podstatný benefit oproti jednodílným rotorům, které jsou zhotoveny pouze z jednoho druhu materiálu, který nikdy stoprocentně nevyhovuje všem pracovním oblastem. Příklad svařovaného rotoru můžeme vidět na obr. 2, kde se jedná o polotovar pro výrobu klikové hřídele, který tvoří 3 hřídelová zakončení z nekalitelné oceli a 2 disky z oceli kalitelné.



Obr. 2 Polotovar pro výrobu klikové hřídele [1]



Obr. 3 Porovnání svarů [55]

housenky do předem vytvořeného úkosu mezi svařovanými díly. Na obr. 3 můžeme vidět porovnání metod svařování. Vlevo se jedná o řez svarem EP. Svařování proběhlo na jeden průchod, bez přídavného materiálu a v časovém intervalu 8,3 minut. Vpravo se jedná o konvenční metodu svařování do úzkého úkosu. Bylo zde zapotřebí 157 svarových housenek, 32 kg/m přídavného materiálu a čas ke svaření 314 minut. Metody MIG a MAG není pro rotory vhodné používat, neboť neposkytují vhodnou hloubku průvaru.

Na rozdíl od kování lze svařováním vyrobit rotory s velkým vnitřním otvorem. To šetří materiál, což například u cenově nákladných materiálů (austenitické oceli, atd.) je velmi podstatné. Při výrobě parních turbín však duté rotory sehrávají ještě další důležitou roli. Užší stěna rotoru pomáhá k rychlejšímu uvedení turbíny do provozu, na rozdíl od profilu plného. Celokované rotory se musí zahřívat postupně, aby v nich vlivem rozdílných teplot nevzniklo teplotní napětí.

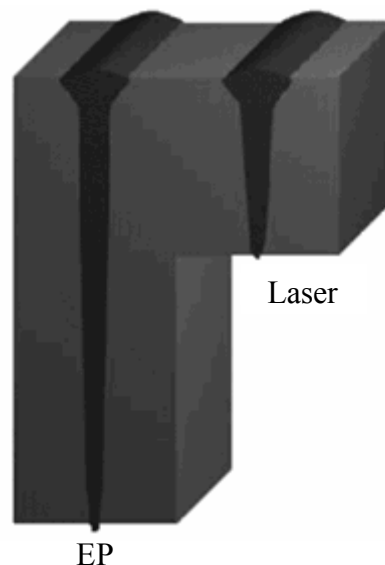
Z konvenčních metod se ke svařování rotorů používá nejčastěji metoda svařování automatem pod tavidlem s kombinací metody WIG. Metodou WIG se jakostně svaří oblast kořenové mezery úzkého úkosu a zbytek se svaří automatem pod tavidlem. Svařování do úzkého úkosu (obr. 4) spočívá ve vrstveném kladení svarové



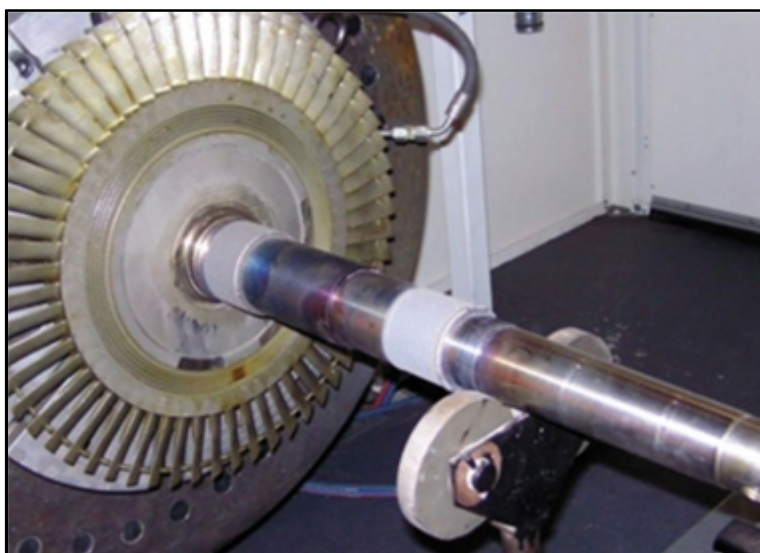
Obr. 4 Svařování do úzkého úkosu [56]

Při konvenčním svařování, především velkoobjemových dílu, se většinou musí do procesu zařadit také předehřev a popřípadě dohřev spojovaných dílců. Předehřev může být aplikován lokálně nebo v celém objemu svařovaných dílů. Provádí se za účelem zvýšení teploty v místě spojování, což chrání svařované místo a jeho okolí před nežádoucími účinky rychlého ochlazování (riziko trhlin, snížení mechanických vlastností materiálu v tepelně ovlivněné oblasti, vznik zákalné struktury a napětí během ochlazování).

Svařování laserem je další metoda používaná při svařování rotorů. Vyznačuje se vysokou produktivitou procesu, úzkou tepelně ovlivněnou oblastí a minimálními deformacemi svařované součásti. Vynikajícím materiálem pro svařování laserem jsou korozivzdorné oceli, kde se dosahuje homogenních svarů bez pórů. Naopak méně vhodné je pro laserové svařování hliník, měď a materiály obsahující prchavé příměsi, např. mosazi, galvanické oceli, magnetické slitiny a zinek. Automatizací a robotizací lasery nacházejí vysoké uplatnění při sériové výrobě, především v automobilovém průmyslu. V porovnání s EP však laser nedosahuje tak velkých penetračních hloubek (obr. 5). Používá se tedy pro svařování menších rotorů nebo jejich opravy (obr. 6).



Obr. 5 Porovnání penetračních hloubek [57]



Obr. 6 Oprava turbínového rotoru Man NR 12 [53]

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ PAPRSKEM ELEKTRONŮ [1], [5], [6], [7], [8], [9]

Svařování EP je proces tavného svařování, kde svazek elektronů urychlený vysokým napětím až na 0,75 násobek rychlosti světla, předává svou kinetickou energii v podobě tepla svařovanému materiálu (kovu). Vzhledem k tomu, že kinetická energie elektronů může být soustředěna na malé ploše svařence, hustota energie paprsku může u nejvýkonnějších zdrojů přesahovat až 10^8 W/cm^2 . Vysoká hustota energie a velmi úzký svazek elektronů, který vstupuje do materiálu má za následek okamžité tavení a odpařování materiálu v místě působení EP. Díky tomu je dosaženo úzkého svaru s minimální tepelně ovlivněnou oblastí. Na rozdíl od jiných svařovacích metod, zde není rychlost tavení omezena tepelnou vodivostí materiálu.

Další charakteristikou je hluboká penetrace svaru od 0.05 mm do 200 mm v jednom cyklu. Ve většině případu lze svařence použít ve stavu po svaření, bez dalších procesů obrábění, což je nejen z ekonomického, ale také z časového hlediska velmi výhodné. Jelikož svařování provádí stroj (obr. 7), je zde zaručena reprodukovatelnost procesu, bez ovlivnění svaru lidským činitelem.

Doposud největší problém při svařování EP činí vakuum, které je nutno vytvořit, čímž vznikají prodlevy mezi jednotlivými operacemi svařování. Čas pro vytvoření vakua se navyšuje s rostoucím objemem svařovací komory, což u největších komor činí řádově desítky minut až hodiny. I tato skutečnost napomohla velkému posuvu a vývoji na poli svařování EP bez vakua.

Mimo svařování si pro své specifické vlastnosti EP našel místo i v jiných oblastech strojírenské technologie. Nejčastější využití má při děrování, povrchovém kalení, pájení nebo pro svou přesnost v litografické technologii.

Shrnutí největších výhod a nevýhod metody svařování EP je uvedeno níže.

Výhody:

- Úzká tepelně ovlivněná oblast svaru
- Minimální deformace
- Svařování kovů s rozdílnou teplotou tavení
- Svařování bez nutnosti přídavného materiálu
- Vysoká rychlost svařování
- Ochrana svaru před nežádoucími plyny díky vakuu

Nevýhody:

- Vysoká pořizovací hodnota zařízení
- Časové prodlevy kvůli čerpání vakua a následnému zavzdušnění komory
- Vysoké nároky na čistotu svarové plochy
- Vznik RTG záření – nutná ochrana obsluhy



Obr. 7 Stroj při procesu svařování EP [17]

2.1 Generátor EP [5], [11], [12], [14]

Generátor elektronového svazku (elektronové dělo) je komplet mnoha komponent na velmi vysoké technické úrovni, které generují, fokusují a navádějí EP na místo určené ke svařování. Mezi nejdůležitější prvky elektronového děla (obr. 8) patří níže uvedené zdroje elektronů a elektronová optika:

- termoemisní zdroj elektronů
- centrovací systém
- magnetická čočka
- vychylovací systém (deflektor)
- stigmátor
- atd..

Produkci velkého množství elektronů obstarává katoda, vyrobená nejčastěji z wolframu nebo tantalu, jelikož je pro tyto prvky typická vysoká teplota tání. Wolframový pásek (obr. 9) žhavený při teplotě okolo 2500 °C emituje proud elektronů, jehož hustota lze vypočítat dle Richardsonova zákona:

$$j_s = A \cdot T^2 \cdot \exp\left(\frac{-e\phi}{kT}\right), \quad (2.0)$$

kde

j_s - hustota emisního proudu [$A \cdot cm^{-2}$]

A - konstanta emise

T - absolutní teplota katody

$e\phi$ - výstupní práce z kovu

k - Boltzmannova konstanta.

Elektrony jsou od katody odtaženy Wehneltovou clonou, jejíž záporné předpětí vůči katodě činí přibližně 100 V. Jelikož je hmotnost elektronu velmi malá $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg, lze jej urychlit elektrickým polem až na 0,75 násobek rychlosti světla. Mezi anodou (obr. 10) a katodou jsou elektrony urychlovány potenciálem, který činí 25 – 200 kV. Změnou potenciálu lze snadno regulovat intenzitu EP. Kinetická energie, kterou elektrony získají při přechodu homogenním elektrickým polem je rovna:

$$W_k = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_e^2 = e \cdot U, \quad (2.1)$$

kde

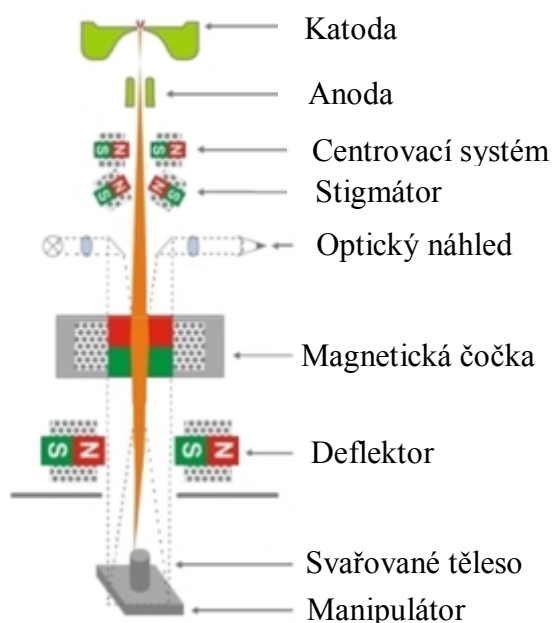
W_k - kinetická energie elektronů [eV]

m_e - hmotnost elektronu

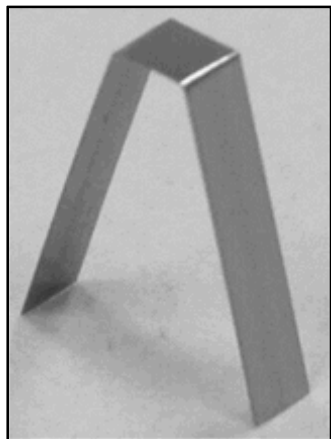
v_e - rychlost elektronu ($v_e = 600 \cdot U^{0,5}$)

e - elementární náboj elektronu

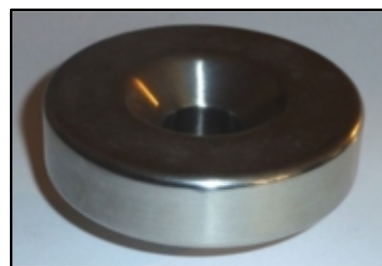
U - urychlovací napětí.



Obr. 8 Elektronové dělo [9]



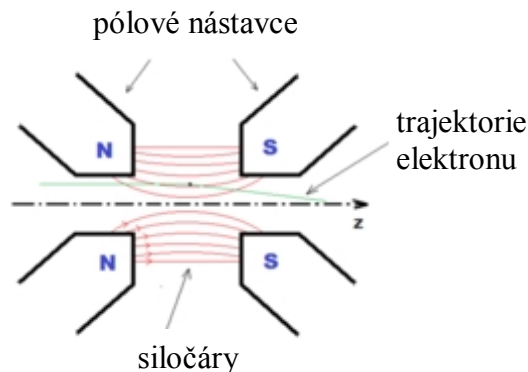
Obr. 9 Výměnný wolframový pásek [16]



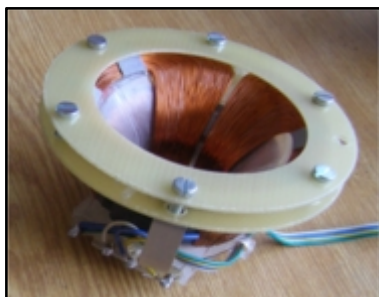
Obr. 10 Anoda [15]

Vlivem vzájemných odpuzivých sil elektronů má elektronový svazek tendenci rozbíhat se. Abychom získali úzký EP, je nutno svazek fokusovat pomocí několika prvků, které označujeme souhrnně elektronová optika. Mezi její nejdůležitější části se řadí magnetická čočka a deflektor.

Magnetická čočka (obr. 11) je zařízení, které generuje fokusační magnetické pole. To má za následek zúžení průměru elektronového svazku a zvýšení hustoty jeho energie. Přitom se však elektrony nijak nezpomalují, pouze se upraví dráha jejich letu tak, že se jejich trajektorie protínají v tzv. křížišti, což je daný bod na ose rotační symetrie. Velikou výhodou magnetických čoček oproti optickým je skutečnost, že se jejich ohnisková vzdálenost dá lehce upravovat regulací dodávaného budicího proudu.



Obr. 11 Magnetická čočka – princip [12]

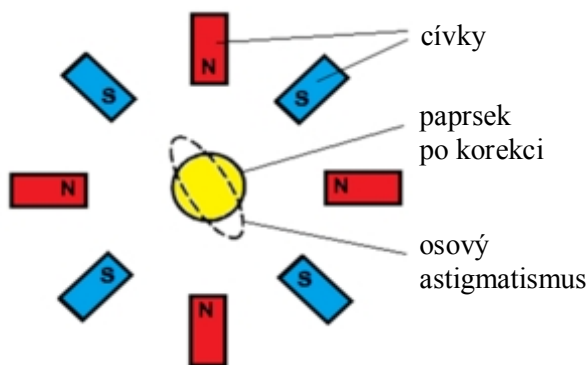


Obr. 12 Deflektor [13]

Druhým důležitým článkem elektronové optiky je deflektor (obr. 12), což je elektromagnetické vychylovací zařízení tvořené většinou dvěma cívkami, které vytvářejí dvě navzájem kolmá homogenní pole. Funkcí deflektoru je vychýlit zaostřený EP o požadovaný úhel a nasměrovat ho tím do svařované oblasti. Úhel vychýlení elektronového svazku získáme při napájení deflektoru vhodnou kombinací stejnosměrných proudů.

Dalším prvkem využívajícím homogenní magnetické pole je centrovací systém, který má za úkol korigovat odchýlené elektrony zpět do fokusační osy. Při vysokých požadavcích na kvalitu EP se využívají další prvky, které redukuji vady svazku.

Mezi nejčastější vady elektronové optiky, patří tzv. osový astigmatismus. Tento nežádoucí jev je způsoben asymetrií magnetického pole a projevuje se eliptickým profilem EP. Příčinou bývají nejčastěji nedokonalosti magnetické čočky, ale také nečistoty na elektronové optice, které když se nabijí, vytvářejí rušivé pole a vychylují tak elektrony z jejich trajektorie. Řešením tohoto problému je rozšíření sestavy o tzv. stigmátor (obr. 13). Tento prvek je tvořen soustavou cívek, které svým magnetickým polem kompenzují uvedenou vadu.



Obr. 13 Stigmátor [11]

Velikou roli u elektronového děla hrají také další komponenty, jako například vakuový systém, který uvnitř generátoru EP čerpá prostor na vysoké vakuum, aby nedocházelo ke kolizím elektronů s molekulami plynů. Chladicí systém zase odvádí odpadové teplo vzniklé při svařování. Jelikož elektronové dělo pracuje s vysokým napětím, je nutno jej pomocí generátoru vysokého napětí vygenerovat z napětí běžného v rozvodné síti. V neposlední řadě je zde řídicí a ovládací systém, který celou soustavu řídí a koriguje, aj.

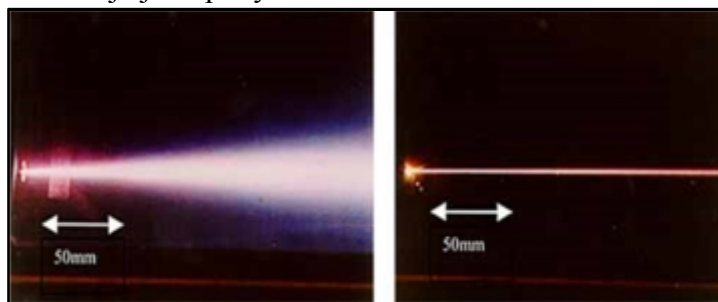
2.2 Pracovní komora [5], [9], [20]

Aby generátor EP plnil svou funkci, nestačí pouze sám o sobě, ale je potřeba dalších komponent a zařízení.

Pracovní komora je prostor, ve kterém se uskutečňuje proces svařování EP. Objem pracovních komor se pohybuje řádově od litrů u těch nejmenších až po stovky metrů krychlových u těch nejobjemnějších (obr. 14). Ve spodní části komory je zpravidla umístěn stůl, na kterém jsou různé upínače, do kterých se upne dílec pro svařování. Tento stůl slouží také jako manipulátor. Umožňuje tedy svařovaný materiál naklánět ve všech osách, rotovat a pohybovat s ním nahoru a dolů. U větších komor je také možnost, že EP není stacionární, ale je umístěn na robotickém rameni, které umožňuje jeho pohyb ve všech osách.



Obr. 14 Komora K6000-1 Firmy Pro-Beam o objemu 640 m³ [10]



Obr. 15 Vyvedení EP a) do prostředí blízkému atmosférického tlaku, b) do vakua [18]

Pro odčerpání vzduchu a vytvoření vakua se používá rotační vývěva, která je schopna vytvořit jemné vakuum (až 10^{-3} hPa) nebo difúzní vývěvu pro vysoké vakuum (až 10^{-7} hPa), která pracuje se silikonovým olejem na základě Bernoulliho jevu a strhávání molekul plynu proudem kapaliny. Pro ultravysoké vakuum (do 10^{-12} hPa) se užívá turbomolekulární vývěva (obr. 16), což je mnoho stupňová lopatková turbína, která uděluje molekulám plynu kinetickou energii a katapultuje je ven z čerpané komory.

Jelikož při procesu svařování, páry svařovaného kovů kondenzují na stěně pracovní komory, vykládá se její vnitřní strana výměnnou hliníkovou fólií. Z důvodu vzniku RTG záření při svařování EP, je nutnost opatřit průzor olovnatým sklem.



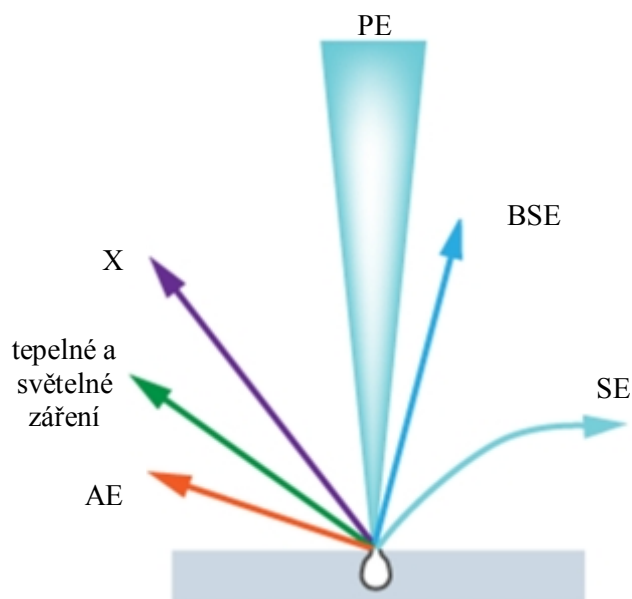
Obr. 16 Turbomolekulární vývěva [19]

2.3 Interakce elektronů s materiálem [5], [7], [12], [14], [21], [23]

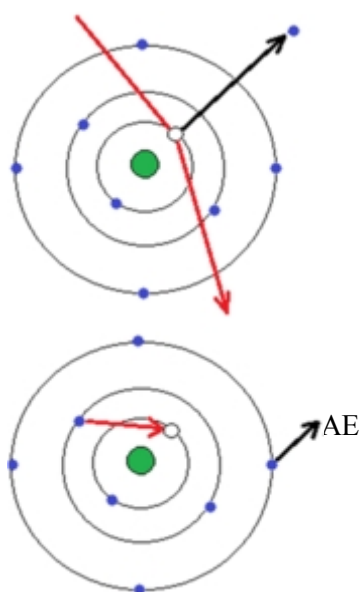
Pod pojmem „interakce“ rozumíme mechanismus vnikání elektronů do svařovaného materiálu. Pochopení toho co se stane, když EP dopadne a pronikne do kovu, je jeden z nejdůležitějších a nejobtížnějších aspektů svařování EP. Urychlené elektrony z fokusovaného EP dopadají na povrch materiálu a předávají svou kinetickou energii. Pravděpodobnost srážky elektronu z EP a jádra atomu svařovaného kovu je velmi malá a i když k ní dojde, nedochází zde prakticky k předání skoro žádné energie a jedná se tedy o srážku pružnou. Mnohem pravděpodobnější je srážka s elektrony ve vnějším obalu atomu, díky níž dochází k vibračnímu přenosu energie, která způsobuje kmitání atomové mřížky materiálu.

Elektrony svou kinetickou energii neztrácejí v okamžiku nárazu do svařovaného kovu, ale postupně se energie předává do krystalové mřížky. Dále se tato energie šíří do materiálu formou postupných srážek mřížkových fononů. Fonon je označení pro vibrační kvantum šířící se krystalovou mříží. Právě tento proces způsobuje přeměnu kinetické energie elektronů v energii tepelnou.

Ne však zcela všechny elektrony přispívají procesu svařování. Velké procento (a to až 70%) primárních elektronů (PE) tvořících EP je pružně odraženo zpět nebo emitováno (obr. 17).



Obr. 17 Interakce EP [24]



Obr. 18 Augerův jev [23]

Rozptýlené elektrony označovány zkratkou BSE (backscattered electron) pronikají sice pod povrch, ale zde předají jen určitou část své kinetické energie, než jsou zpět vráceny nad povrch materiálu. Dalším druhem v pořadí odražených elektronů jsou sekundární elektrony označeny jako SE. Jedná se o elektrony vyražené z orbitalu atomového obalu. Augerovy elektrony pod označením AE, vznikají díky principu Augerova jevu (obr. 18). Ten spočívá ve vyražení elektronu z vnitřních vrstev obalu atomu - externím volným elektronem z EP - na jehož místě vzniká prázdná slupka, která je posléze zaplněna elektronem z vnějších vrstev. Uvolněná energie může být vyzářena ve formě fotonu nebo předána jako kinetická energie danému elektronu ve vnější slupce, který díky ní atom opouští. Pravděpodobnost toho, jestli je uvolněná energie vyzářena jako rentgenové záření nebo spíš Augerovými elektrony, rozhoduje atomové číslo prvku. Již zmíněné rentgenové záření X, vzniká při uvolnění SE,

kdy v elektronovém obalu vznikne díra, jejíž energie je nižší než u části elektronů obsažených v atomovém obalu. Díky tomu dojde k přeskoku elektronu na nižší energetickou hladinu a přebytek je vyzařen v podobě rentgenového záření. Jeho intenzita roste s urychlovacím napětím svazku. U zařízení s nižšími hodnotami urychlovacího napětí (méně než 60 kV) je záření dostatečně odstíněno stěnou pracovní komory a olovnatým sklem v průzoru. U zařízení pracujících s vyššími hodnotami napětí je nutno nepodcenit tloušťku stěny a vyrobit ji dostatečně silnou nebo ji ještě podpořit olovenými kryty, které rovněž pracují jako rentgenové lapače. Tepelné a světelné záření vzniká na stejném principu jako záření rentgenové, jen s odlišnou vlnovou délkou.

Bylo zjištěno, že elektrony vnikající pod povrch materiálu, jsou schopny předat svou energii jen na velmi malou vzdálenost, řádově do desetin milimetru. Za účelem zjištění hloubky prostupu elektronů R byl sestaven model, který byl také experimentálně ověřen:

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

kde

R – hloubka vniku elektronů [μm]

U – urychlovací napětí [V]

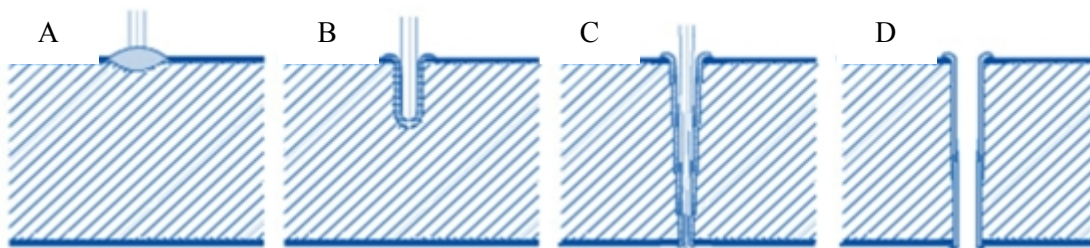
ρ – hustota materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Po dosazení hodnot do rovnice (2.2) v základních jednotkách SI, získáme pro námi vybrané materiály hloubky penetrace elektronů v řádech μm (tab. 1).

Tab. 1 Hloubka vniku elektronů do materiálu (v μm) [22]

Materiál	Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	Urychlovací napětí elektronů [kV]			
		30	60	120	150
Wolfram	19 263	1,0	3,9	15,7	24,5
Měď	8 960	2,1	8,4	33,8	52,7
Hliník	2699	7,0	28,0	112,0	175,1
Olovo	11 340	1,7	6,7	26,7	41,7
Titan	4 506	4,1	16,8	67,11	104,9
Uhlíková ocel 12 050	7870	2,4	9,6	38,4	60,0

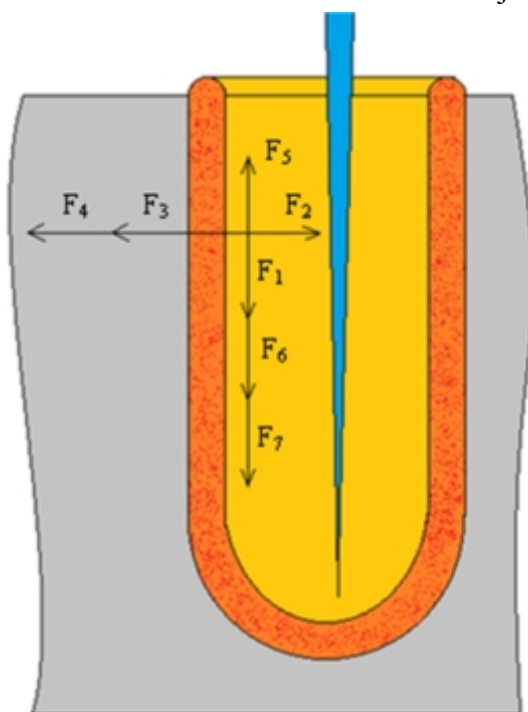
V místě dopadu EP se materiál v řádech mikrosekund taví a přechází do podoby páry, která se ihned přehřívá. Expandující pára poté vyvolává tlak, který vytlačuje roztavený materiál do stran a tím se začne v materiálu tvořit prohlubeň (obr. 19), nazývaná rovněž „keyhole“ – klíčová dírka. Ta umožňuje pronikání EP do větší hloubky pod povrchem. Pro tento jev se užívá označení „hloubkový efekt“ a právě díky němu je v dnešní době možné na nejvýkonnějších zařízeních vytvářet průvary v řádech stovek milimetrů.



Obr. 19 Vznik prohlubně A) natavení materiálu, B) a C) pronikání EP materiálem, D) vznik otvoru [12]

Teplota, při které se toto děje, závisí na svařovaném materiálu. Je patrné, že rychlost pronikání EP do hloubky může být mnohem vyšší než rychlost odvodu tepla do materiálu, což se kladně projevuje na velmi úzké tepelně ovlivněné oblasti. A právě tato výhoda upřednostňuje metodu EP ve svařování v oblastech citlivých na zvýšenou teplotu. Jemnozrnná krystalizace svarové lázně má navíc vlastnosti, které se jen minimálně liší od základního materiálu a díky malým deformacím materiálu se k sobě mohou svařovat dílce, bez potřeby dalších dokončovacích operací.

Při procesu vnikání EP do materiálu působí různé síly (obr. 20). Tlak par v kapiláře působí proti povrchovému napětí a hydrostatickému tlaku a tlačí jej ke stěně prohlubně. Roztavený materiál se pohybuje po stěnách kapiláry, popřípadě je vytlačen působícími silami ven. Paradoxně největší ohřev materiálu nenastává na povrchu svařence, nýbrž několik desítek mikrometrů pod ním. V místech největšího odparu materiálu se vytváří bublina, která praskne, jakmile tlak uvnitř bubliny překročí povrchové napětí roztaveného materiálu nad ní. Tím se materiál rozstříkne do okolí a formuje stěny prohlubně.



- F_1 – Síla proudu elektronů
- F_2 – Síla elektromagnetická od EP
- F_3 – Síla reakce na odpařování
- F_4 – Statický tlak par v kapiláře
- F_5 – Síla vzniklá z povrchového napětí
- F_6 – Síla gravitační
- F_7 – Hydrostatická síla tekutého kovu

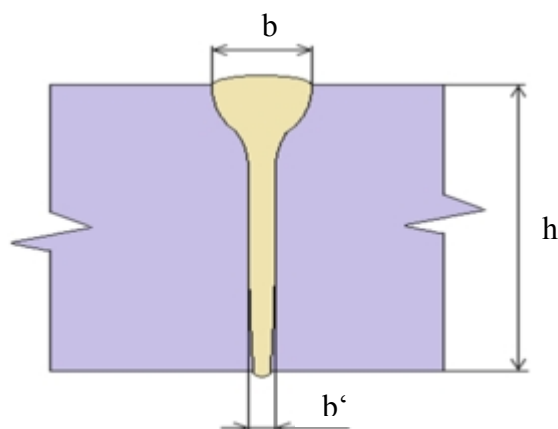
Obr. 20 Síly v kapiláře [5]

Při pohybu EP materiálem dochází k porušení termodynamické rovnováhy v otvoru a také k rozdílu sil povrchového napětí na hraně kapiláry. Natavený kov se přemísťuje za procházející EP a následně vzniká svar. Přídavný materiál se používá jen málokdy, například když se svařují dva nehomogenní materiály ke zvýšení kvality svaru. Plochy určené ke svařování musí být dokonale čisté. Například zbytky chladicí kapaliny po předchozích operacích (frézování, atd.) se musí dokonale odstranit odmaštěním, jinak by mohly výpary ze zbytkových tuků negativně ovlivnit kvalitu svarového spoje (pórovitost, bublinatost, atd.). Dalším předpokladem svařování EP je kvalitní opracování spojových ploch, které by mělo činit $R_a = 0,8 - 1,6 \mu\text{m}$ a také optimální mezera mezi svařovanými dílci cca $0,1\text{mm}$. Šířka EP se volí dle mezery mezi dílci a většinou se jedná o čtyřnásobek, aby bylo zaručeno dokonalé překrytí.

2.4 Svařitelnost materiálů technologií EP [5], [9], [27], [28]

Díky vakuu, ve kterém proces svařování probíhá, je možno svařovat dokonce chemicky vysoce aktivní kovy (např. Ti, Zr, W, atd.), které se vyznačují vysokou afinitou k atmosférickým plynům. Tyto plyny způsobují znatelné zhoršení mechanických vlastností svařovaného materiálu. EP lze spojovat materiály, které konvenčním tavným způsobem svařit nelze, neboť u nich vznikají křehké intermetalické fáze. Ty mají za následek snížení pevnostních a plastických vlastností svaru a jeho praskání. Když však použijeme ke svařování EP, je díky úzké svarové lázni tvorba těchto fází omezena. Přesným zaostřením ohniska EP lze dosáhnout námi požadované vzájemné rozpustnosti svařovaných kovů a získání svaru s vhodnými mechanickými vlastnostmi.

Ve většině případů se svařuje s vertikální orientací EP. Problém však nastává při silnostěnných operacích, kde síly hydrostatického tlaku a gravitační, jsou příliš velké. Ty mají za následek zalití dna kráteru roztaveným materiálem, a proto se silnostěnné kusy svařují ve vodorovné poloze EP. Charakteristickým znakem svařování EP je vysoký poměr štíhlosti ψ , kde h je hloubka a b šířka závaru (obr. 21).



Obr. 21 Tvar svaru [5]

$$\psi = \frac{h}{b} \quad (2.3)$$

$$\psi' = \frac{h}{b'} \quad (2.4)$$

Materiály na bázi hliníku, které se vyznačují dobrou tepelnou vodivostí a nízkou hmotností, stále více rozšiřují své spektrum aplikací v životě každého z nás. Svařování hliníku EP je velice výhodný proces, neboť vrstva oxidů na povrchu svařovaného materiálu funguje jako dobrý „lapač“ kinetické energie elektronů. Nevznikají zde tím pádem žádné větší problémy s reflexí EP a není zde tedy nutná tak vysoká vstupní energie. V mnohých aplikacích se však tato vrstva před samotnou operací leptá. Tím je hlavně zaručena vyšší

kvalita svaru s nižší pórovitostí. Hodnota hloubky svařování činí i přes 200 mm a to s vysokým poměrem štíhlosti ψ , jak můžeme vidět na obr. 22. Široce používané slitiny na bázi AlMg vykazují dobré výsledky při svařování EP. Při procesu svařování slitin na bázi AlCu, AlSi a AlMgSi je však někdy potřeba užít konkrétní opatření, pro zabránění vzniku trhlin za tepla. Toto riziko závisí na chemickém složení slitin, tepelné vodivosti a namáhání během svařování. Chemické změny v těchto materiálech v důsledku svařování jsou zanedbatelné a mechanické vlastnosti svaru jsou téměř totožné s okolním materiálem.



Obr. 22 Řez svarem hliníku [29]



Obr. 23 Řez svarem mědi [30]

Na rozdíl od většiny jiných technologií svařování, lze EP svařit tvrdou většinu měděných slitin s výjimkou mosazi a alpaky. Vysoká hustota energie EP umožňuje svařit měď, a to i bez předehřevu, do hloubky vyšší než 50 mm na jeden průchod. Pro svařování se upřednostňuje OFHC (Oxygen-free high thermal conductivity) měď nebo typy mědi neobsahující kyslík a fosfor, neboť právě

tyto prvky negativně ovlivňují proces svařování. Na obr. 23 můžeme vidět svar mědi, který je spolu s jeho okolím naleptaný kyselinou dusičnou, aby vynikla jeho struktura.

Vzhledem k vysoké hustotě energie EP a svařování ve vakuu, mohou být touto metodou svařovány nejen materiály s vysokým bodem tání, ale také velmi citlivé na prostředí obsahující byt jen malé množství zbytkových plynů. Titan a mnoho jeho slitin může být svařeno bez jakýchkoli problémů, a to i bez rizika vzniku oxidačních karbidů nebo těžko detekovatelného snížení houževnatosti svařovaného materiálu. Z tohoto důvodu jsou z hlediska bezpečnosti v leteckém průmyslu slitiny titanu svařovány EP. Dalším neopomenutelnou aplikací EP je svařování tělních implantátů (obr. 24) a chirurgických nástrojů. Díky vysoké stabilitě procesu, jsou k sobě části kvalitně přivařeny, takže implantáty mohou v těle bezproblémově sloužit desítky let. Na obr. 25 můžeme vidět řez svarem titanu o hloubce 4 mm.



Obr. 24 Tělní implantát z titanu [31]

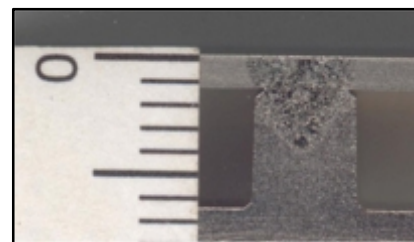
Podobná charakteristika, jako u titanu platí i pro slitiny niobu a zirkonia, které jsou silně reaktivní se zbytkovými plyny. Tyto materiály se používají především v jaderném průmyslu při stavbě jaderných reaktorů. Vzhledem k vysokým finančním nákladům na materiál, musí být zcela zaručená požadovaná kvalita svaru. Svařování EP je často jediný proces, který může tyto náročné požadavky splnit. Podobně je to s tantalem, iridiem, vanadem a jejich slitinami, které na poli technologie EP zaznamenávají vynikající výsledky. Však i v tomto případě hraje svou důležitou roli



Obr. 26 Inkonel 781- hloubka 62 mm [32]

čistota, aby nebyla snížena kvalita a mechanické vlastnosti svaru. Svařování EP wolframu, molybdenu a jejich slitin je taky běžná praxe, ale je nutné počítat s nízkou tažností svarových spojů. Je to způsobené tím, že komerčně dostupné komponenty wolframu jsou obvykle fáze slinuté s komponenty niklu. Ten se však díky vysokým svařovacím teplotám odpařuje a právě to má za následek snížení již zmiňované tažnosti svaru. V případě wolframu, je však EP jediný termální svařovací proces, kterým jdou komponenty tohoto prvku spojit.

Čistý nikl, ale i jeho slitiny se EP svařují bez problémů. Na rozdíl od svařování elektrickým obloukem, složitější slitiny s vysokou odolností proti tečení a teplotní odolností jako například Inkonel (obr. 26), mohou být



Obr. 25 Řez svarem titanu [34]

svařovaný zcela bez trhlin do velkých hloubek. Je to z důvodu malého metalurgického narušení a tepelného namáhání během procesu svařování EP. Při svařování superslitin jsou však nějaká opatření proti vzniku trhlin za tepla nutná. Tento problém se dá také řešit pomocí technologie multiprocesního svařování, kdy poslední rozostřený paprsek v řadě dohřívá materiál a tím brání vzniku těchto trhlin.

Většina ocelí a železných slitin vhodných pro svařování konvenčním tavným svařovacím procesem lze také svařovat EP. Zejména z důvodu velmi úzké tepelně ovlivněné oblasti a nepřítomnosti atmosférických plynů ve vakuu, lze mnoho ocelí, pro něž obloukové svařování je možné pouze se značným úsilím nebo u kterých dochází ke ztrátě mechanických vlastností, jako například ztráta pevnosti u jemnozrnných ocelí, svařovat EP bez větších problémů. Rovněž nejsou problémy při svařování železa vyznačujícího se nižšími hodnotami mechanických vlastností nebo obsahujícího křemík, které se běžně používá v transformátorech a elektromotorech.

Feritické oceli jsou obvykle snadno svařitelné. Svařitelnost závisí na obsahu uhlíku v důsledku tvorby martenzitu. Feritické oceli s obsahem uhlíku do 0,2% jsou obecně považované za vhodné pro svařování. S vyšším obsahem uhlíku je svařování komplikovanější a je nutné zavést předehřev. Ten lze uskutečnit buď v předehřívací peci nebo multiprocesní technologií EP.



Obr. 28 Řez
svarem
austenitické oceli
[34]

Austenitické oceli se vyznačují vynikající odolností proti korozi a mají široké spektrum využití v různých oblastech průmyslu, hlavně tam, kde jsou přístroje a jejich součásti vystavené korozním médiím (odsolovací stanice, chemický průmysl, medicína, atd.). Negativní stránkou těchto ocelí je však jejich cena, kterou ženou nahoru drahé slitinové složky jako je například nikl. Při dodržení podmínek svařování EP je proces svařování austenitických ocelí snadno říditelný a má značné výhody, na rozdíl od obloukového svařování, kde je potřeba použít ochranný plyn s daným procentem kyslíku. Ten snižuje povrchové napětí, zlepšuje odplynění svarové lázně a přechod na základní materiál. Na obr. 27 lze pozorovat řez svarem austenitické oceli o hloubce 53 mm a geometrii 40:1.

Duplexní oceli ve své struktuře obsahují stejné podíly feritu a austenitu. Tyto materiály jsou zajímavou alternativou k austenitickým, neboť mají podobnou odolnost vůči korozi, avšak jejich cena je podstatně nižší. Hlavním problémem svařování duplexních ocelí EP je degradace mechanických vlastností a odolnosti proti korozi. K tomu dochází hlavně z důvodů odplynění dusíku z tavné lázně. V současné době však existuje již mnoho technologií a výplňových materiálů, díky nimž lze EP tyto oceli svařovat a při tom je po operaci plně zaručena jejich odolnost vůči korozi. Výraznou měrou posunula svařování duplexních ocelí také multiprocesní technologie, která umožňuje pomalejší ochlazování a formování austeniticko – feritické struktury svaru. U typů ocelí, které mohou být precipitačně vytvrzované, způsobuje svařování EP mírné snížení pevnosti v tahu, které je potřeba obnovit užitím procesem stárnutí. Na obr. 28 můžeme vidět uplatnění EP na poli energetického průmyslu, kde se konkrétně jedná o svařenou palivovou trysku plynové turbíny z korozivzdorné oceli.

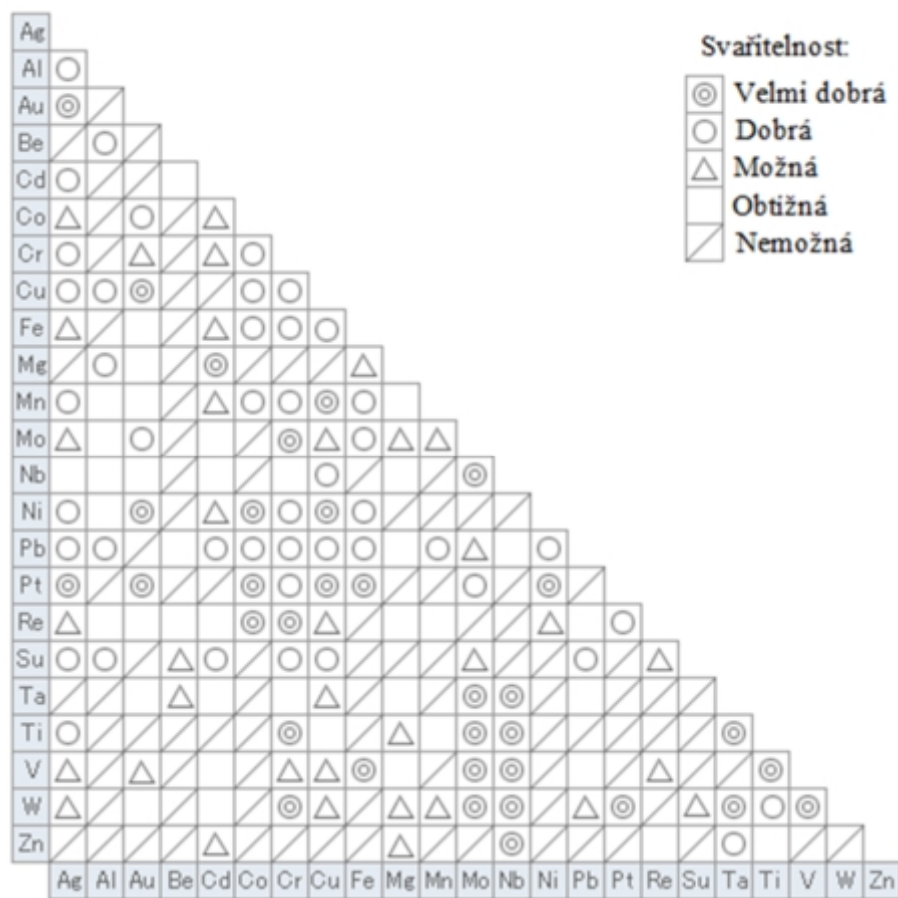


Obr. 27 Palivová tryska plynové
turbíny [33]

V mnoha aplikacích se vysokolegovaná ocel používá pro svařování součástí převodovek automobilů nebo turbín letadel. NiCrMo oceli, stejně jako vysoce legované žárovevné oceli lze svařovat bez předehřevu i se značnou tloušťkou. Opět však platí, že dobré parametry čistoty oceli jsou nutností, pokud požadujeme dobré pevnostní vlastnosti svaru.

Litina je z metalurgických důvodů obvykle považována za materiál nevhodný pro svařování. EP se však dá svařovat tvárná globulární litina, ale svařování jiných se nedoporučuje. Z hlediska ekonomické produkce a dobrých tlumících vlastností je litina v určitých oblastech průmyslu stále velmi populární materiál. Například v těžkém strojírenství při výrobě šnekových ozubených kol převodovek. V současné době jsou tyto součásti vyráběny sešroubováním či lisováním, což způsobuje nevýhody ve váze a únosnosti. V posledních letech však výzkum a vlastní použití součástí v reálných podmínkách přinesly velké pokroky v technologii svařování EP právě této kombinace. Je třeba mít však na paměti, že svar může obsahovat větší procento pórů. Tomu se předchází vhodným předehřevem a popřípadě přídavným materiálem. Maximální doporučená hloubka svařování činí 20 mm a pro větší hloubky se doporučuje svařování z obou stran.

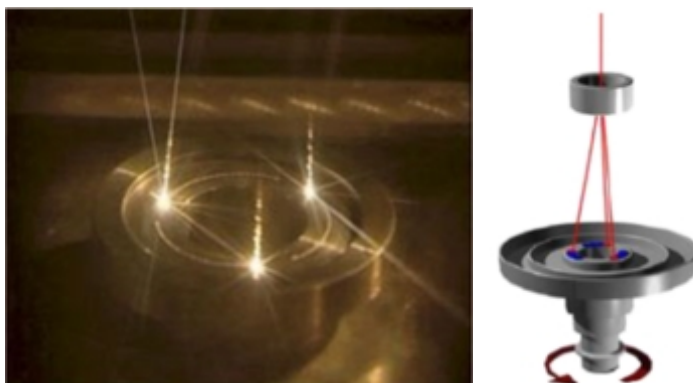
Jedna z největších výhod svařování EP, je spojování rozdílných materiálů, které se liší teplotou tavení a tepelnou vodivostí. Vzhledem k metalurgické neslučitelnosti a tvorbě nežádoucích intermetalických fází, nejsou všechny kombinace kovů vhodné pro svařování. Svařitelnost rozdílných kovů závisí na mnoha faktorech, jako například geometrii součástí, elektrických a magnetických vlastnostech jednotlivých kovů, atd. Na obr. 29 lze vidět možnosti svažitelnosti jednotlivých kovů mezi sebou.



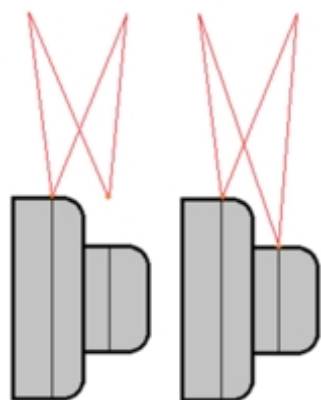
Obr. 29 Vzájemná svažitelnost rozdílných kovů [35]

2.5 Vícebodové a multiprocesní svařování [9],[12],[25],[26]

Se stále větším rozvojem elektroniky, dochází také k rozvoji nových technologií svařování EP jako například vícebodové svařování (anglicky „multipool welding“). Technologie vícebodového svařování umožňuje svařovat více spojů najednou. Elektronová optika umožňuje velmi rychlou změnu směru EP bez momentu setrvačnosti. EP je vychylován mezi několik bodů ve velmi krátkém časovém intervalu a rychle se vrací do klíčové dírky, aby nedošlo k jejímu kolapsu. Minimální frekvence přeskoků mezi svařovanými místy potřebnými k procesu je dána vlastnostmi materiálu svařence, počtem současně svařovaných míst a rychlostí svařování. Vychylovací rychlost elektronového svazku může dosahovat hodnot až do $2,2 \cdot 10^6$ °/s.



Obr. 30 Vícebodové svařování [9]



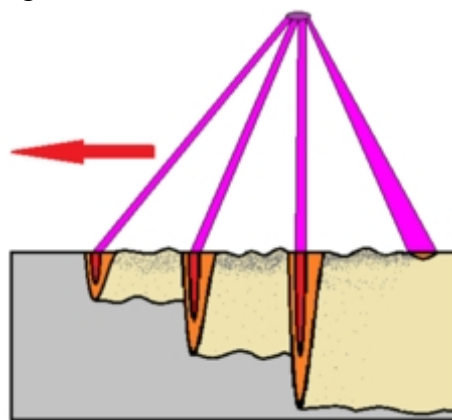
Obr. 31 Svařování bez dynamické čočky (vlevo), s ní (vpravo) [9]

Typickým příkladem využití této technologie je axiální svařování. Zde počet symetricky umístěných operačních míst vytváří kruhový svar otáčením svařence, jak můžeme vidět na obr. 30. Současné svařování na několika místech, má za následek minimalizaci tepelných deformací a rovnoměrné rozložení napětí v celé svařované součásti. Jestliže jako v případě na obr. 30 EP operuje na třech místech současně, činí časová úspora 2/3 oproti konvenčnímu jednobodovému svařování.

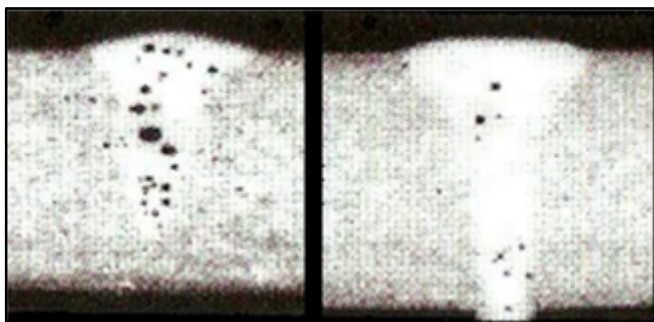
Možností jak rozšířit a vylepšit metodu vícebodového svařování je rozšíření elektronové optiky a další rychlou dynamickou čočku, která umožňuje změny zaostření při rychlosti srovnatelné s rychlým deflektorem. Tyto změny zaostření mohou být synchronizovány s vychylováním paprsku a díky tomu lze spojovat EP součásti, kde je zapotřebí svařovat v různých výškách. Typický příklad využití této technologie můžeme vidět na obr. 31

při radiálním svařování, kde EP operuje zároveň ve dvou polohách a díky synchronizaci deflektoru a čočky, jsou obě místa svařovány v optimální poloze ohniska EP.

Podobný princip se uplatňuje taky při multiprocesním svařování, s tím rozdílem, že svařování probíhá ve stejné výšce. Na rozdíl od předchozí metody neprobíhá paralelně, ale za sebou. Koncový paprsek je rozostřen tak, aby byl měkčí a vyhlazoval svarovou housenku, po předchozím svazku (kosmetický svar). Při svařování hliníku (obr. 32) litého pod tlakem nemá technologie multiprocesního svařování za cíl pracovat efektivněji nebo ušetřit čas, ale řeší daný materiálový problém.



Obr. 32 Multiprocesní svařování hliníku [9]

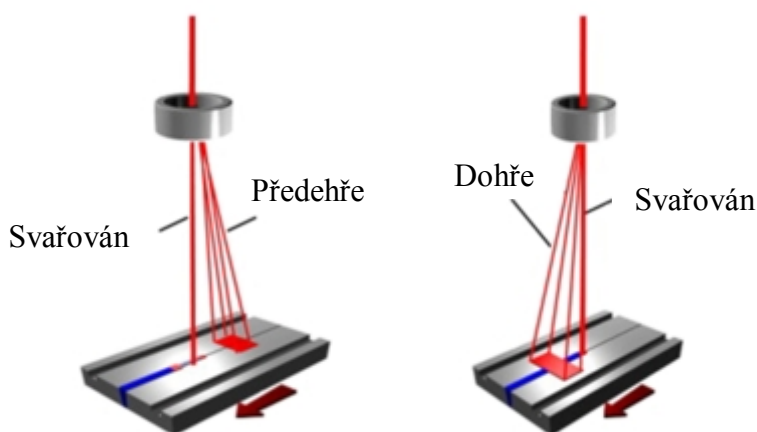


Obr. 33 Svařování jedním EP (vlevo), třemi EP (vpravo) [9]

Vzhledem k povaze výrobního procesu (odlévání), mají hliníkové odlitky relativně vysoký obsah vměstků, které se postupně během svařovacího procesu odplyňují, což vede ke zvýšení poréznosti svaru. Tento problém řeší několik (většinou tři) za sebou jdoucích svazků o různé intenzitě síly, vzdálených od sebe několik milimetrů. Tato vzdálenost mezi paprsky, umožňuje vměstkům

relativně dlouhou dobu stoupat k povrchu taveniny. Při konvenčním svařování jedním paprskem činí poréznost u hliníku až 5,05% svaru. Když však zvolíme metodu třech za sebou jdoucích paprsků, poréznost klesne až na 0,76%. Rozdíl mezi jednotlivými metodami, můžeme vidět na obr. 33.

Podobná konfigurace paprsku se používá pro lokální předehřev vysokouhlíkových ocelí. Tyto materiály mají tendenci tvořit trhliny ve svarech a v tepelně ovlivněné oblasti. Je běžné, že v průmyslu se svařované dílce předehřívají na danou teplotu v peci, což je však časově, energeticky a hlavně finančně náročné. Navíc pro díly, které již byly zakaleny, je předehřev nepřijatelný. Díky multiprocesní technologii, se však předehřev týká pouze svařované oblasti a tím pádem i kalené součásti neztrácí svou tvrdost. Předehřívací paprsek vnáší do svařovaného materiálu energii v podobě malé tavné lázně a to nejen na povrchu, ale také s určitým prostupem do hloubky. Forma předehřevu se liší podle materiálu a jeho vlastností. Na stejném principu funguje taky dohřev. Jedná se o zónu ve formě rozostřeného EP, která je umístěná za svarovou lázní. Jejím úkolem je předávat energii ve formě tepla, nikoli však materiál tavit. Tímto ohřevem míst za tavnou lázní vzniká tlak, který kompenzuje tahové napětí z míst, kde tavná lázeň chladne. Touto technologií se předchází vzniku trhlin. Obě metody jsou znázorněny na obr. 34.

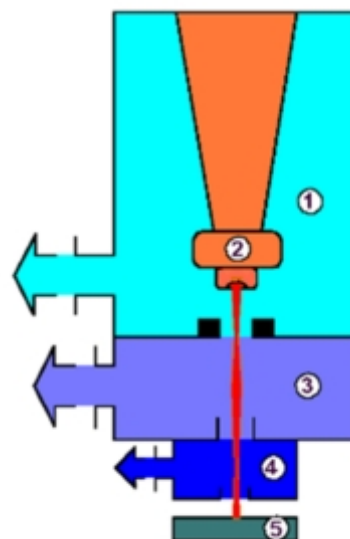


Obr. 34 Předehřev (vlevo) a dohřev (vpravo) materiálu [26]

2.6 Svařování bez vakua [18], [36], [37]

Také v tomto procesu svařování EP bez vakua (NVEBW), je svazek generován ve vysokém vakuu, ale na rozdíl od konvenční metody svařování EP je nakonec přes úzké trysky oddělující jednotlivé tlakové stupně vyveden ven, do atmosférického tlaku. Volné ovzduší sice paprsek rozostřuje a rozšiřuje, ale i tak je jeho energie dost velká na to, aby v doporučené vzdálenosti od trysky, vytvořil efekt klíčové dírky. Na obr. 35 můžeme vidět zjednodušené schéma metody NVEBW, kde

- 1) Vysoké vakuum (10^{-4} mbar)
- 2) Generátor EP
- 3) 2. tlakový stupeň (10^{-2} mbar)
- 4) 1. tlakový stupeň (1 mbar)
- 5) Svařenec v atmosférickém tlaku ve vzdálenosti mezi 10 – 25 mm od trysky EP.



Obr. 35 Schéma – svařování bez vakua [36]

Metoda NVEBW je velice výhodná pro svařování tenkých plechů, ale výjimkou není také svařování nejrozličnějších materiálů do hloubky až řádově desítek milimetrů. Asi největší oblibu získala tato metoda v automobilovém průmyslu, a to hlavně díky vysoké rychlosti svařování a možnosti kombinace různých typů materiálů, především oceli a hliníku užívaných pro lehké konstrukce (obr. 36). Vzhledem k možnosti řízení vstupní energie, mohou být vytvořeny odolné a trvanlivé spoje, kdy si například ocel zachovává svou pevnost a hliník je do ní fúzován. Obecně velmi vysoká rychlost svařování, závisí na materiálu, tloušťce a hloubce svařování. Např. hliníkové slitiny se běžně svařují rychlostí 14 m/min při hloubce 3mm a 60 m/min při hloubce 1 mm. Šířka svaru se pohybuje minimálně od 1 mm až po 4 mm při větších tloušťkách materiálu.

Největší výhody metody NVEBW:

- Není potřeba pracovní vakuová komora
- Časová úspora na vyčerpání a posléze zavzdušnění komory
- Úspora energie potřebné na vytvoření a udržení vakua v komoře
- Charakteristiky svařování podobné těm ve vakuu – vysoká kvalita svaru, nízké deformace, atd.

Nevýhody metody NVEBW:

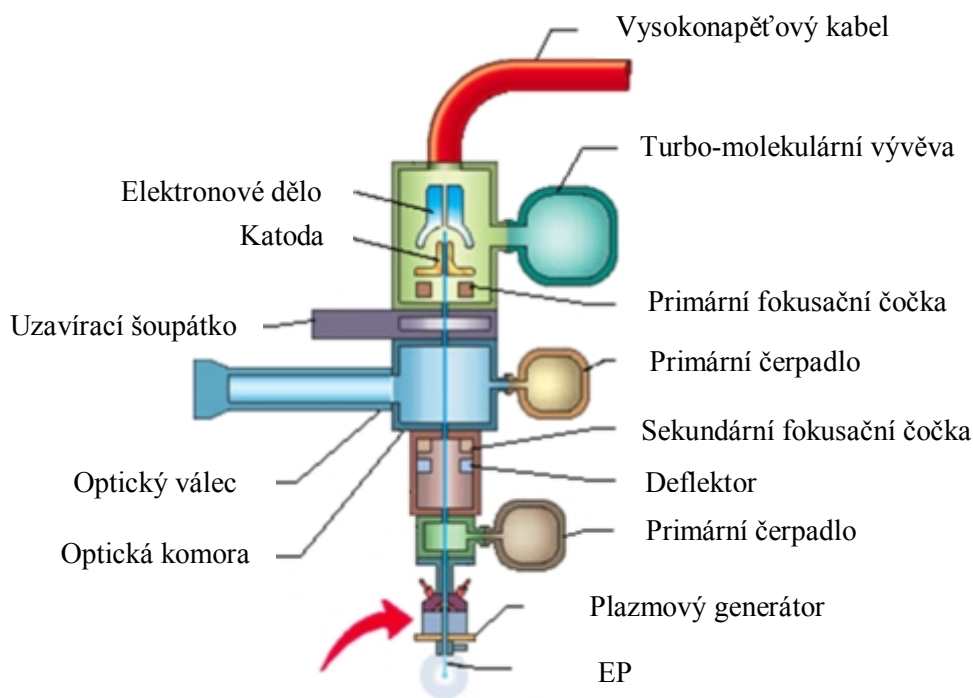
- Nutná ochrana okolí, před vznikajícím rentgenovým zářením při procesu svařování
- Nelze svařovat chemicky vysoce aktivní kovy (Ti, Zr, W, atd.)



Obr. 36 Lehká hliníková konstrukce kabiny automobilu [36]

2.6.1 Technologie plazmového okna [38], [39], [40]

Tato poměrně nová metoda byla vyvinuta Brookhaven National Laboratory v USA. Byla primárně vyvinuta pro potřeby leteckého, kosmického a automobilového průmyslu. Princip této metody spočívá v separaci vakua a atmosféry pomocí plazmového okna. To může oddělovat vakuum a atmosférický tlak nebo místa s vysokým a nízkým vakuem. Stabilizovaný plazmový oblouk je nakonfigurován tak, aby fungoval jako nepevné plazmové okno, kterým je veden EP. Schéma zařízení můžeme vidět na obr. 37.



Obr. 37 Schéma svařování EP s plazmovým oknem [40]

Svazky nabitých částic jako jsou ionty, elektrony nebo intenzivní rentgenové paprsky mají široké spektrum využití v mnoha aplikacích. Tyto paprsky musí být generovány ve vysokém vakuu, nicméně ve většině aplikací je potřeba je použít při atmosférickém tlaku, protože vakuum zvyšuje ceny a limituje velikosti výrobků. V konvenčních vakuových systémech, které si našly uplatnění v různých průmyslových odvětvích, dělí vakuum od atmosféry pevné stěny pracovní komory a ochranná okna. V plazmovém okně tuto funkci plní ionizovaný plyn. Správnou funkci plazmového okna umožňují tři efekty:

1. **Plynový efekt:** Tlak p je funkcí hustoty ρ , teploty T a plynové konstanty r . Je popsán rovnicí $p = \rho \cdot r \cdot T$. V plazmovém okně je $T = 12\,000 - 15\,000\text{ °K}$ ve srovnání s pokojovou teplotou asi 300 °K . Z toho plyne, že plazmové okno má přibližně $1/40 - 1/50$ atmosférické hustoty, což má za následek i méně elektronových kolizí.
2. **Viskozitní efekt:** Viskozita plynů se s rostoucí teplotou zvyšuje. V důsledku toho je plynový tok skrz horký plazmový kanál podstatně snížen oproti pokojové teplotě.

- 3. Sací efekt:** Atomy plynů a molekuly jsou ionizovány plazmovými elektrony a zachyceny polem na hranici plazmového okna. Experimentálně tento efekt přispěl ke koeficientu 228,6 redukci tlaku přes diferenciální čerpání.



Obr. 39 Generátor plazmového okna [41]

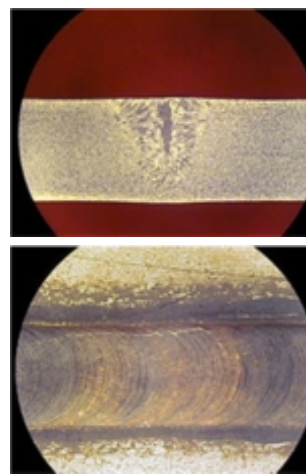
Plazma je v této souvislosti horký ionizovaný plyn. Vytvoření plazmy v kruhovém okně o průměru asi 5 mm je poměrně jednoduché a obstarává jej plazmový generátor (obr. 38). Inertní plyn plní lemovanou keramickou dutinu, která obsahuje katodu a anodu, mezi nimiž je potenciál o hodnotě několika stovek voltů. Plyn se ionizuje a vzniká plazma, která je vyvedena směrem ke svařovanému materiálu. Neopomenutelnou výhodou plazmového okna u svařování EP je, že zde plazma působí jako silná čočka. Proudění v tomto plazmovém okně vytvářejí azimutální magnetické pole, které odklání díky Lorentzovým silám částice

směrem dovnitř.

V současné době se konvenční elektronové svařovací přístroje skládají z elektronového děla, uzavřeného ve vakuové komoře. Naproti tomu, v této nové technologii, je plazmové okno namontováno na elektronovém generátoru a udržuje malou vakuovou oblast potřebnou pro šíření EP. Celá sestava není delší než 3 metry a v průměru má 20 – 26 cm. Existuje také možnost celou sestavu namontovat na robotické rameno. Metoda plazmového okna (obr. 40) je nejen energeticky účinná, ale hlavně dokáže svařovat rozměrově velké konstrukce, např. letadel a lodí. Oproti konvenčnímu svařování je zde také mnohonásobně nižší výrobní cena, díky úspoře nákladů na odčerpávání vakua a procesů s tím souvisejících, které mohou tvořit až 80%. A to nebyl ještě zmíněn čas potřebný k vytvoření vakua, který u velkoobjemových komor činí až desítky minut. Kvalita svaru však zůstává zachována a je srovnatelná s procesem svařování bez vakua. Na obr. 39 můžeme vidět jeden z prvních pokusů svařování s plazmovým oknem. Hloubka svaru činí 2,3 mm a šířka 3 mm. Jedná se o materiál 316 S.S..



Obr. 40 Plazmové okno [42]



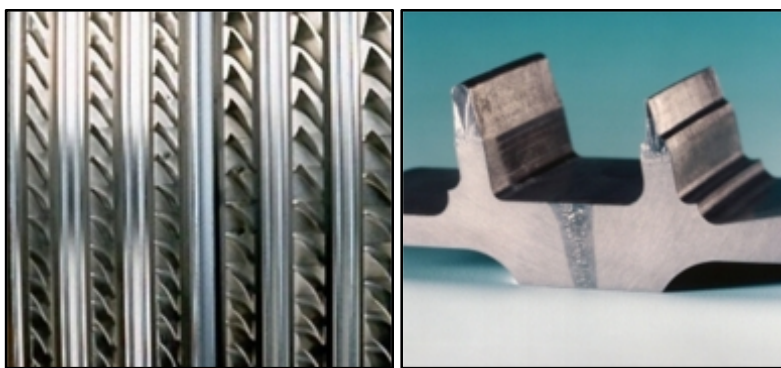
Obr. 38 Řez a vrchní pohled na svar 316 S.S. [43]

Nežádoucím vedlejším produktem, stejně jako u všech procesů používajících EP je i zde emise rentgenového záření. Tuto nevýhodu je potřeba odstranit ochranným štítem, který toto záření dokonale pohltí.

3 SVAŘOVÁNÍ ROTAČNÍCH SOUČÁSTÍ EP [2], [45], [46], [47], [48], [49]

Mnohá průmyslová odvětví využívají technologii svařování EP k výrobě nejrůznějších rotujících součástí a ne jen to. Čím dál větší využití nachází EP při opravách těchto součástí, neboť se jedná často o jedinou technologii, která opravu dílců a jejich opětovné zařazení do provozu umožňuje. A že se nejedná o zanedbatelné finanční částky, dokazuje velký zájem o EP nejen leteckých a energetických společností. V této kapitole jsou uvedeny konkrétní rotační součásti různých odvětví, jež byly svařeny technologií EP.

Letectví a kosmonautika byly vůbec první odvětví, které projevíli zájem o technologii EP. Bylo to zejména kvůli nutnosti kvalitních a bezpečných svarů nejrůznějších materiálů, které konvenční metody zaručit nemohly. Dnes je letecký průmysl silně závislý na technologii svařování EP, která byla v průběhu minulých desetiletí vyvíjena a zdokonalována. Komponenty, svařené touto technologií, se používají v leteckých a raketových motorech, senzorech, převodovkách, pohonech a rámech.



Obr. 41 Kompresor (vlevo) a řez svaru (vpravo) [45]

Vysoce namáhané rotační součásti kompresorů tryskových motorů se často vyrábějí z titanových slitin. Jak je známo, ty jsou chemicky vysoce aktivní a proto je zde na místě svařování EP ve vakuu. Obrobené kompresorové disky jsou k sobě svařeny elektronovým svazkem do vícestupňového rotoru či bubnu. Paralelní svary předvídají minimální jednosměrné smrštění, které umožňuje spojování jednotlivých disků bez dalšího obrábění. Na obr. 41 vidíme tyto jednotlivé disky spojené radiálním obvodovým svarem a řez tímto svarem o hloubce 25 mm. Jako materiál byl použit titan s korozi-vzdornou ocelí.

Kuželová ozubená kola, jsou důležité komponenty užívané především v hnacích systémech helikoptér a leteckých motorů. Z důvodu vysokých otáček a extrémního zatížení těchto součástí, je vyžadováno co nejvyšší kvalita svarů prakticky bez vad. Na obr. 42 můžeme vidět součást svařenou z hřídele a kuželového ozubeného kola. Oba komponenty jsou vyrobené z vysoko-pevnostní oceli a spojeny svarem o hloubce 13 mm.



Obr. 42 Součást hnacího systému helikoptéry [45]

Lopatky dmychadel proudových motorů jsou náročné a drahé součásti na výrobu a servis. Jedná se o součásti, jejichž geometrie přispívá významnou měrou k celkové účinnosti motoru. Často se stává, že jsou poškozeny v důsledku vniknutí cizího předmětu do dmyhadla. Efektivní alternativa nových drahých lopatek, je oprava těch poškozených a opotřeбенých. Typická oprava (obr. 43) spočívá v odstranění poškozené přední hrany a přivařením takzvané „náplasti“ EP na poškozené místo. Jelikož se proces svařování provádí ve vakuu, lopatky vyrobené z titanové slitiny neoxidují a zachovávají si své materiálové vlastnosti.



Obr. 43 Oprava lopatky dmyhadla proudového motoru [2]

V posledním kroku je náplast obrobena a vytvarována do původního tvaru lopatky.

Automobilový průmysl na sebe nenechal dlouho čekat a začal používat EP pro spojování svých součástí, především v zahraničí tato technologii našla své široké uplatnění a využití. Dnes se hlavně používá k hromadnému svařování ozubených kol, spojek, hřídelí, turbodmychadel a dalších automobilových komponent.



Obr. 44 Turbodmychadlo [45]

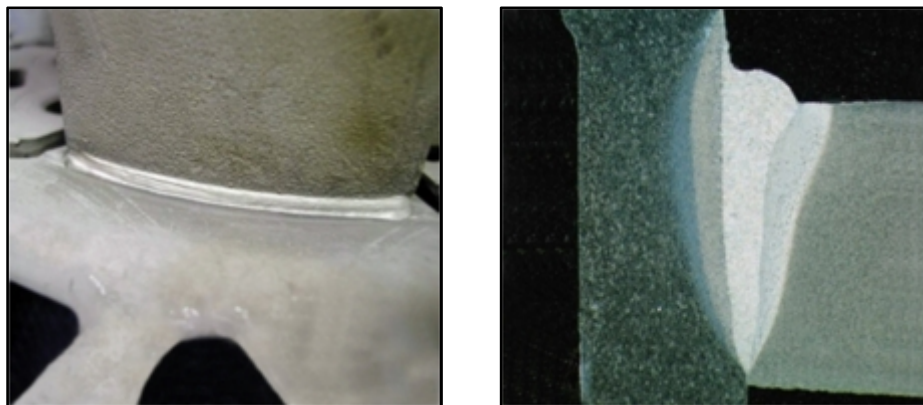
Většina velmi výkonných plynových a dieselových motorů je v dnešní době přepřilňovaná. Sestavy lehkých svařovaných hřídelí a oběžných kol rotují při extrémně vysokých rychlostech. Aby se zabránilo selhání svaru při práci turbodmyhadla, je nutné svařovat dílce bez vad. Na obr. 44 vidíme turbodmychadlo svařené z hřídele vyrobené z uhlíkové oceli a oběžného kola z inkonelu radiálním obvodovým svarem o hloubce 2 mm. Tyto sestavy jsou sériově spojovány ve velmi malých svařovacích cyklech o velmi vysoké produktivitě a kvalitě.

K uspokojení nepřetržitých požadavků na zlepšení nákladové efektivnosti a kontrol ochrany životního prostředí v moderní výrobě, musí výroba komponent pohonu stále přinášet nová řešení. Jedním z nich je svařování dutých součástí (obr. 45). Tato technologie dokáže snížit hmotnost konvenčních plných součástí až o 30% při plném zachování jejich funkčnosti. Znatelná úspora materiálu a z toho vyplývající i koncová cena výrobku dělá tuto technologii stále využívanější.



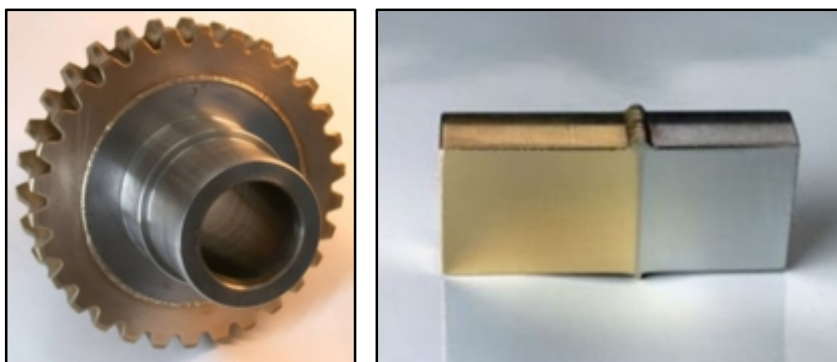
Obr. 45 Dutá součást [48]

Lehké a úspornější vozidla vyžadují malé vzory planetových nosičů vyrobených z pevných materiálů. V aplikacích s vysokým točícím momentem, zejména u dieselových motorů, dochází ke zvýšení napětí na začátku a na konci každého segmentového svaru v rámci planetového nosiče. Technologie svařování EP minimalizuje toto napětí v těchto místech produkcí svarů bez vyplňovací hmoty a bez trhlin. Na obr. 46 můžeme vidět svar a jeho řez sestavy planetového nosiče. Jedná se zde o spojení karbonové a nízkouhlíkové oceli o hloubce svaru 25 mm.



Obr. 46 Svar (vlevo) a jeho řez (vpravo) sestavy planetového nosiče [45]

Šneková kola jsou hojně rozšířené pohonné jednotky v mnoha průmyslových odvětvích. Bývají často přišroubována nebo nalisována na hřídelích. Šroubové spoje však znamenají vyšší náklady na materiál a zpracování. Výhody, které přináší svařování EP jsou hlavně nízká spotřeba materiálu, nižší náklady na obrábění a krátká výrobní lhůta. Minimální deformace obou svařovaných materiálů (ocel - bronz) teplem a hloubka svaru až do 50 mm patří mezi další přednosti svařování těchto součástí EP. Na obr. 47 můžeme vidět svařené šnekové kolo a typický svar bronzu a oceli.



Obr. 47 Šnekové kolo (vlevo) a svar ocel – bronz o hloubce 22 mm (vpravo) [48]

Dalším příkladem využití technologie EP je oprava převodovek sportovních automobilů značky Porsche. Konkrétně se jedná o výměnu tzv. „psího kroužku“ (obr. 48). Mnoho lidí se domnívá, že při poškození tohoto kroužku je nutné vyměnit celý převodový stupeň, ale není tomu tak. Poškozený kroužek může být obroben a nahrazen novým, který je poté svařený EP. Tato efektivní metoda opět převodovku plně navrácí do provozu. Opravy se provádí u automobilů Porsche typů RSR, Cupcar, GT2, GT3, 996, 997, Twin Turbo, atd..



Obr. 48 „Psí kroužek“ [49]



Obr. 49 Svařenec čelního ozubeného kola [3]

Tento příklad svařence čelního ozubeného kola ukazuje, jak mohou být redukovány dodací lhůty kováren a sléváren, při použití procesu svařování EP. Svařenou sestavu, kterou můžeme vidět na obr. 49, tvoří jeden prstenec, límec, čtyři pouzdra, horní a spodní deska. Jednotlivé komponenty jsou vyrobeny z různých materiálů a svařeny svary v rozmezí 1 až 8 mm. V některých případech je možné vyrobít zuby na límci nebo provádět tepelné zpracování již před procesem svařování, čímž se dá dosáhnout ještě větších úspor.

ZÁVĚR

Metoda svařování svazkem elektronů si našla své uplatnění jak v kusové tak sériové výrobě v mnoha průmyslových odvětvích. Je to díky vývoji, kterým během posledních desetiletí prošla a který ji posunul na současnou úroveň, kdy vyniká mezi konvenčními metodami svou vysokou kvalitou svaru a úzkou tepelně ovlivněnou oblastí.

Samotné svařovací zařízení je složeno z mnoha konstrukčně složitých součástí. Elektronové dělo, které se skládá z několika komponent (katoda, anoda, elektronová optika, atd.) generuje EP, který je poté naveden na místo určené pro svařování na součásti. Pracovní komora, která je v dnešní době součástí většiny elektronových svařovacích přístrojů, slouží nejen jako ochrana před RTG zářením, ale hlavně odděluje vakuum (v ní) od atmosférického tlaku okolí.

Vakuum, ve kterém probíhá naprostá většina operací EP, má svou výhodu ve svařování i chemicky vysoce aktivních kovů, ale z ekonomického hlediska je celkem nákladné jej vytvořit a udržet (především u velkoobjemových komor). K tomu, se užívají nejrozličnější vývěvy, které však svým elektrickým příkonem a servisem (výměna oleje, atd.) zvedají cenu výrobku. Řešením tohoto problému by se mohlo stát tzv. „plazmové okno“, které díky využití několika fyzikálních jevů dokáže vést EP na danou vzdálenost mimo vakuum.

Možnost vícebodového či multiprocesního svařování a jejich výhody, jen posilují pozici EP mezi konvenčními metodami svařování. Neposlední výhodou technologie EP je vzájemné svařování různých metalurgicky rozdílných materiálů, které je často možné svařit pouze touto metodou.

Rotory jsou součásti náročné na kvalitu svaru, neboť často pracují při vysokých napětích a otáčkách. To vyžaduje vysokou kvalitu svaru, která ručí za bezpečnou funkci spojené součásti. Z metody dříve specializované na svařování součástí letadel a kosmických prostředků, se v současné době stává, pro čím dál větší oblibu EP, metoda používaná v sériové výrobě mnoha dalších průmyslových odvětví (automobily, energetika, medicína, atd.).

Seznam použitých zdrojů [60]

1. Svařování a dělení: Nové možnosti efektivního využití technologie svařování elektronovým paprskem v sériové výrobě rozměrných součástí. VRÁBLÍK, Filip a Adam VOLKER. *Konstrukce: odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. 2010 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/nove-moznosti-efektivniho-vyuziti-technologie-svarovani-elektronovym-paprskem-v-seriove-vyrobe-rozmernych-soucasti/>
2. Job-shop: Industries. *Steigerwald-eb* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.steigerwald-eb.de/en/job-shop/industries.html>
3. Mechanicalengineering: Spurgear. *Pro-beam* [online]. 2013 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.pro-beam.com/en/referenz/mechanicalengineering/spurgear.htm>
4. Produkty: Svařování el. svazkem. [online]. 2010 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/co-je-svarovani-elektronovym-svazkem>
5. KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-857-7181-0.
6. *ASM handbook*. 6th print. Materials Park: ASM International, 2003, xvi, 1299 s. ISBN 08-717-0382-3.
7. MESSLER, R. W. Jr.. *Principles of Welding*. New York, USA. 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.
8. Nekonenční metody obrábění: Obrábění paprskem elektronů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvenčni-metody-obrabeni-2.html>
9. VOLKER, Adam, Uwe CLAUB, Dietrich DOBENECK, KRÜSSEL a LÖWER. *Electron beam welding: The fundamentals of a fascinating technology*. Germany: pro-beam AG & Co. KGaA, 2011.
10. Pro-beam: Company. [online]. 2013 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.pro-beam.com/en/company.htm>
11. SCHULTZ, Von H. *Elektronenstrahlschweißen*. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1989. ISBN 38-715-5111-2.
12. DUPÁK, Libor. *Mikroobrábění nekovových materiálů elektronovým svazkem*. Brno, 2012. Disertační práce. VUT Brno. Vedoucí práce Bohumila Lencová.
13. Deflection & correction coils. *Wikipedia: The free encyclopedia* [online]. 2011 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Deflection_%26_correction_coils.jpg
14. MATLÁK, Jiří. *Povrchové zpracování vybraných ocelí pomocí elektronového svazku*. Brno, 2013. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Miloslav Kouřil.

15. Electron Beam Gun Assembly. *Ebay* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://www.ebay.com/itm/Electron-Beam-Gun-Assembly-Anode-CLS-32-Leybold-Hamilton-Camlock-EBW-0758568-/111053850096?pt=LH_DefaultDomain_0&hash=item19db5345f0
16. Energy Beam Sciences. *EBSciences* [online]. 2009 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.ebsstore.com/product.aspx?pid=374>
17. Electron beam welding. *GKN aerospace* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.gkn.com/aerospace/products-and-capabilities/capabilities/metallics/electron-beam-welding/Pages/default.aspx>
18. Enhancements to power beam welding processes for land transport. SHI, Gongqi, Paul HILTON, BOOTH a PUNSHON. *TWI* [online]. Osaka Japan, 2004 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/enhancements-to-power-beam-welding-processes-for-land-transport-may-2004/>
19. Cut through turbomolecular pump. *Wikimedia Commons: the free media repository* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cut_through_turbomolecular_pump.jpg
20. Vývěva. *Wikipedie* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDv%C4%9Bva>
21. Podivné vlastnosti excitonů. KULHÁNEK, Petr. *Aldebaran* [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2011_33_kva.php
22. VOHLÍDAL, Jiří. *Chemické a analytické tabulky*. 1. vyd. Praha: Grada, 1999, 647 s. ISBN 80-716-9855-5.
23. Augerův jev. *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Auger%C5%AFv_jev
24. Interactions. *MyScope* [online]. 2013 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.ammrf.org.au/myscope/sem/background/concepts/interactions.php>
25. Referenz: Automotive industry. *Pro-beam* [online]. 2013 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.pro-beam.com/en/referenz/automotiveindustry/multibeamtechnologyforweldinggearselectronbeamweldedgears.htm>
26. Temperature field modeling and microstructure analysis of EBW with multi-beam for near α titanium alloy. *ScienceDirect* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X13003606#>
27. IŽDINSKÁ, Zita a František KOLENIČ. The influence of postheat treatment on ferrite redistribution in duplex steels electron beam welds. *MI scientific journal* [online]. 2009 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://fstroj.uniza.sk/journal-mi/PDF/2009/01-01.pdf>
28. PILOUS, Václav. *Materiály a jejich chování při svařování*. Plzeň: ŠKODA WELDING s.r.o., 2009.
29. Electron Beam Welding - Process, Applications and Equipment. SCHUBERT, Guenther. *PTR* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://www.ptreb.com/Electron_Beam_Welding_Technical_Papers/Electron_Beam_Welding_Process_Applications_and_Equipment/

30. Electron beam welding of copper displayed in the background. *Tampere university of technology* [online]. 2013 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.tut.fi/en/about-tut/departments/materials-science/current-topics/electron-beam-welding-of-copper-displayed-in-the-background-p045102c2>
31. Orthopedic Implant Weld. *PTR: Medical* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://www.ptreb.com/Industries/Medical/Orthopedic_Implant_Welding/
32. Electron Beam Welding SERVICES. *EBTEC* [online]. 2010 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://www.ebteccorp.com/content.php?p=eb_welding
33. Gas Turbine Fuel Nozzle Assembly Weld. *PTR: Power Generation* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://www.ptreb.com/Industries/Power_Generation/Gas_Turbine_Fuel_Nozzle_Assembly_Welding/
34. Materials. *Steigerwald-eb* [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.steigerwald-eb.de/en/job-shop/example-materials.html>
35. Electron beam: Weldability of dissimilar metals. *TOSEI electrobeam* [online]. 2005 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://www.tosei.co.jp/english/technology/beam_weld.html#pagetop
36. Application areas: Non vacuum welding. *Steigerwald-eb* [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.steigerwald-eb.de/en/application-areas/welding-at-atmosphere.html>
37. What is non-vacuum electron beam welding?. *TWI* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-non-vacuum-electron-beam-welding/>
38. Plasma Window Technology for Propagating Particle Beams and Radiation from Vacuum to Atmosphere. *Tech Briefs* [online]. 2007 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.techbriefs.com/component/content/article/1834>
39. Acceleron Electron Beam, LLC, Wins Grant from the U.S. Department of Energy to Commercialize New Welding Technique Developed at Brookhaven Lab. *Brookhaven national laboratory* [online]. 2001 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <https://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/2001/bnlpr121101b.htm>
40. KREN, Lawrence. New "window" of opportunity for e-beam welding. *Machine desing* [online]. 2004 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/fasteners/new-window-opportunity-e-beam-welding>
41. Plasma Arc Window. *ACCELERONinc* [online]. 2003 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.acceleroninc.com/news/V3N1/>
42. ZHU, K. Plasma window experiment and simulation. In: *Peking University* [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/talks/tuodb202_talk.pdf
43. Plasma arc window slide show. *ACCELERONinc* [online]. 2004 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.acceleroninc.com/plasmawindow/slideshow/plasma-arc-7.htm>

44. Electron Beam Welding. *Westermans International* [online]. 2013 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.westermans.com/electronbeamwelding.aspx>
45. Aerospace Welding. *PTR: Aerospace* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.ptreb.com/Industries/Aerospace/>
46. Ultrasonic inspection of pores in electron beam welds - evaluation of detectability. *NDT* [online]. 1998 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/0498/feist/feist.htm>
47. FAN BLADES. *TTL-solutions* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.ttl-solutions.com/fanblades.html>
48. Contractmanufacturing. *Pro-beam* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.pro-beam.com/en/leistungen1/contractmanufacturing/welding.htm?phpMyAdmin=1SGacS2OH-v1HH4ostfEiM4ijNb>
49. DOG RING REPLACEMENT. *Gbox* [online]. 2007 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.gboxweb.com/dogring.html>
50. SHIGE, Takashi, Shuji ITOU, Ryotaro MAGOSHI, Takashi ICHIMURA a Yoshiyuki KONDOU. Development of Large-Capacity, Highly Efficient Welded Rotor for Steam Turbines. *Mitsubishi Heavy Industries: Technical Review* [online]. 2001 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e381/e381006.pdf>
51. MINÁŘ, Luděk. *Analýza svařování rotoru turbíny*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
52. SCHWARZ, Drahomír. Plazmové, elektronové a laserové svařování. *Český svářečský ústav s.r.o., Ostrava: technologie svařování* [online]. 2010 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2010-1%20Plazma-laser-elektronov%C3%A9.pdf>
53. A welding procedure for turbocharger rotors. *MAN Diesel & Turbo SE* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.mandieselturbo-hamburg.com/1007194/News/A-Welding-Procedure-for-Turbocharger-Rotors.html>
54. ZATLOUKAL, Petr. Laserové svařování. *Welding* [online]. 2007 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/svarovani.htm>
55. EB welding and hardening. *PHM* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://i77.de/phm-burg/index.php?kat=ebweldingandhardening®ion=EN>
56. Hot wire narrow gap welding in the production of power stations. [online]. 2009 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://ookaboo.com/o/pictures/picture/21058540/Hot_wire_narrow_gap_welding_in_the_produ
57. Laser Beam Welding. *Joining technologies* [online]. 2012 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.joiningtech.com/industry-references/welding-types/laser-beam-welding>
58. Preheat. *GoWelding* [online]. 2012 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.gowelding.com/weld/preheat/preheat.htm>

59. Preheating of Materials. *BOC World of Welding* [online]. 2007 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.bocworldofwelding.com.au/media/pdf/file/library/WOWLibrary-Preheating%20of%20materials-Consumables.pdf>
60. Citace. [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Hodnota/Jednotka	Popis
A	$\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$	Konstanta emise
b	mm	Šířka závaru
e	$-1,602\cdot 10^{-19}\text{ C}$	Elementární náboj elektronu
$e\phi$	eV	Výstupní práce z kovu
h	mm	Hloubka závaru
j_s	$\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Hustota emisního proudu
k	$1,38\cdot 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$	Boltzmannova konstanta
m_e	$9,109\cdot 10^{-31}\text{ kg}$	Hmotnost elektronu
p	Pa	Tlak
R	μm	Hloubka vniku elektronů
R_a	μm	Drsnost povrchu
r	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Plynová konstanta
T	K	Teplota
U	V	Urychlovací napětí
v_e	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Rychlost elektronů
W_k	eV	Kinetická energie elektronů
X	-	Rentgenové záření
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Hustota
ψ	-	Poměr štíhlosti

Zkratka	Popis
AE	Augerovy elektrony
BSE	Rozptýlené elektrony
EP	Elektronový paprsek
MAG	Metall-Active-Gas
MIG	Metall-Inert-Gas
NVEBW	Svařování elektronovým paprskem bez vakua

OFHC	Oxygen-free high thermal conductivity
PE	Primární elektrony
RTG	Rentgenové záření
SE	Sekundární elektrony
S.S.	Stainless steel
WIG	Wolfram-Inert-Gas

Seznam obrázků

Obr. 1 Ukázka produktů svařování EP [2], [3], [44],	9
Obr. 2 Polotovary pro výrobu klikové hřídele [1]	10
Obr. 3 Porovnání svarů [55]	10
Obr. 4 Svařování do úzkého úkosu [56]	10
Obr. 5 Porovnání penetračních hloubek [57]	11
Obr. 6 Oprava turbínového rotoru Man NR 12 [53]	11
Obr. 7 Stroj při procesu svařování EP [17]	12
Obr. 8 Elektronové dělo [9]	13
Obr. 9 Výměnný wolframový pásek [16]	13
Obr. 10 Anoda [15]	13
Obr. 11 Magnetická čočka – princip [12]	14
Obr. 12 Deflektor [13]	14
Obr. 13 Stigmátor [11]	14
Obr. 14 Komora K6000-1 Firmy Pro-Beam o objemu 640 m ³ [10]	15
Obr. 15 Vyvedení EP a) do prostředí blízkého atmosférického tlaku, b) do vakua [18]	15
Obr. 16 Turbomolekulární vývěva [19]	15
Obr. 17 Interakce EP [24]	16
Obr. 18 Augerův jev [23]	16
Obr. 19 Vznik prohlubně A) natavení materiálu, B) a C) pronikání EP materiálem, D) vznik otvoru [12]	17
Obr. 20 Síly v kapiláře [5]	18
Obr. 21 Tvar svaru [5]	19
Obr. 22 Řez svarem hliníku [29]	19
Obr. 23 Řez svarem mědi [30]	20
Obr. 24 Tělní implantát z titanu [31]	20
Obr. 25 Řez svarem titanu [34]	20
Obr. 26 Inkonel 781- hloubka 62 mm [32]	20
Obr. 27 Palivová tryska plynové turbíny [33]	21
Obr. 28 Řez svarem austenitické oceli [34]	21
Obr. 29 Vzájemná svařitelnost rozdílných kovů [35]	22
Obr. 30 Vícebodové svařování [9]	23
Obr. 31 Svařování bez dynamické čočky (vlevo), s ní (vpravo) [9]	23
Obr. 32 Multiprocesní svařování hliníku [9]	23
Obr. 33 Svařování jedním EP (vlevo), třemi EP (vpravo) [9]	24
Obr. 34 Předehřev (vlevo) a dohřev (vpravo) materiálu [26]	24
Obr. 35 Schéma – svařování bez vakua [36]	25
Obr. 36 Lehká hliníková konstrukce kabiny automobilu [36]	25
Obr. 37 Schéma svařování EP s plazmovým oknem [40]	26
Obr. 38 Řez a vrchní pohled na svar 316 S.S. [43]	27
Obr. 39 Generátor plazmového okna [41]	27
Obr. 40 Plazmové okno [42]	27
Obr. 41 Kompresor (vlevo) a řez svaru (vpravo) [45]	28
Obr. 42 Součást hnacího systému helikoptéry [45]	28
Obr. 43 Oprava lopatky dmychadla proudového motoru [2]	29
Obr. 44 Turbodmychadlo [45]	29

Obr. 45 Dutá součást [48]	29
Obr. 46 Svar (vlevo) a jeho řez (vpravo) sestavy planetového nosiče [45]	30
Obr. 47 Šnekové kolo (vlevo) a svar ocel – bronz o hloubce 22 mm (vpravo) [48]	30
Obr. 48 „Psí kroužek“ [49]	31
Obr. 49 Svařenec čelního ozubeného kola [3]	31

Seznam tabulek

Tab. 1 Hloubka vniku elektronů do materiálu (v μm) [22]	17
---	----