

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

POROVNÁNÍ NAVAŘOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ A PLAZMOU

COMPARISON OF CLADDING BY THE ELECTRON BEAM AND PLASMA PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN RUDYK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV KUBÍČEK

BRNO 2014

Zadání

Licenční smlouva

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá metodami navařování plazmou a svazkem elektronů. V teoretické části rozdělené na několik kapitol se zaměřuje na popis těchto metod navařování. V praktické části je popsán konkrétní experiment navařování svazkem elektronů (EBC) a navařování plazmou (PC). Na závěr byly vyhodnoceny výsledky, porovnány obě zmíněné metody a bylo popsáno možné využití pro průmyslovou praxi.

Klíčová slova:

Navařování, navařování plazmou, navařování svazkem elektronů, přídavný materiál, základní materiál

Abstract

This diploma thesis deals with plasma cladding and electron beam cladding. The theoretical part is divided into several chapters which is focused on description of these methods of cladding process. In the practical part the particular experiment of electron beam cladding (EBC) and plasma cladding (PC) is described. In the conclusion overall results were assessed, both methods were compared each other and possible exploitation in industry was described.

Key words:

Cladding, plasma cladding, electron beam cladding, additional material, basic material

Bibliografická citace

RUDYK, Martin. *Porovnání navařování svazkem elektronů a plazmou*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 2008. 72 s., Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma ***Porovnání navařování svazkem elektronů a plazmou*** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Martin Rudyk

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za vedení této diplomové práce a pomoc při experimentech. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Bc. Janu Kouřilovi za pomoc při experimentu EBC, cenné praktické rady a připomínky, panu RNDr. Liboru Mrňovi, PhD. za oponenturu a pomoc při vypracování práce. V neposlední řadě bych poděkoval své rodině, zvláště mé přítelkyni Bc. Lence Svobodové za trpělivost po celou dobu mého studia na FSI VUT Brno.

OBSAH

Zadání	
Licenční smlouva	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Prohlášení	
Poděkování	
Obsah	8
Úvod	10
1 Navařování	11
1.1 Výhody a nevýhody navařování	13
2 Způsoby navařování	14
2.1 Navařování technologií speciálního tavného svařování	14
2.1.1 Navařování laserem	15
3 Navařování plazmou	17
3.1 Fyzikální princip vzniku plazmy	17
3.2 Zařízení pro svařování plazmou	18
3.3 Svařitelnost materiálů	20
3.4 Další využití plazmy v technologiích	21
3.4.1 Mikroplazmové svařování	21
3.4.2 Řezání plazmou	22
3.5 Svařovací parametry a jejich vliv na svařování	22
3.6 Navařování plazmou	23
4 Navařování svazkem elektronů	24
4.1 Vytvoření a interakce svazku elektronů	24
4.1.1 Volné elektrony	24
4.1.2 Pohyb elektronů, urychlení elektrickým polem	24
4.1.3 Vliv magnetického pole, význam	26
4.1.4 Přeměna kinetické energie elektronů na tepelnou	28
4.1.5 Chování svazku elektronů při interakci s kovem	28
4.2 Základní části elektronových svářeček	30
4.2.1 Elektronová tryska	32
4.2.2 Pracovní komora	32
4.3 Svařitelnost materiálů	33
4.3.1 Legované materiály a oceli	33
4.3.2 Kovy s vysokou teplotou tavení (W, Mo, Ta, Zr)	34
4.3.3 Hliník	34
4.3.4 Měď a její slitiny	34
4.3.5 Titan a jeho slitiny	34
4.3.6 Nikl a jeho slitiny	35
4.3.7 Svařování odlišných materiálů	35
4.4 Výhody, nevýhody a využití svařování svazkem elektronů	36
4.5 Navařování svazkem elektronů	37
4.5.1 Experiment č. 1 - Efekt nastavení parametrů na vlastnosti vrstev	37
4.5.2 Experiment č. 2 - Navařování vrstev WC-Co za pomoci EBC	40
5 Přídavné materiály pro navařování	42
5.1 Rozdělení podle tvaru	42
5.2 Rozdělení podle chemického složení	43

6	Typy vad svarů, návarů	43
6.1	Vady svarů	44
7	Experimentální část	45
7.1	Navařování elektronovým svazkem	45
7.1.1	Popis navařovací aparatury	45
7.1.2	Popis experimentu	49
7.1.3	Výkonové a technologické hodnoty návarů	50
7.1.4	Obrazová dokumentace	53
7.2	Navařování plazmou	55
7.2.1	Popis navařovací aparatury	55
7.2.2	Výkonové a technologické hodnoty návarů	57
7.2.3	Obrazová dokumentace	58
8	Technicko ekonomické hodnocení	61
8.1	Výpočty spotřeby času a materiálu	61
9	Závěr	66
	Seznam použitých zdrojů	69
	Seznam použitých zkratk a symbolů	71

ÚVOD

V technické praxi jsou strojní součásti a díly namáhány a jsou vystaveny nejrůznějším okolním vlivům. Následkem toho u nich dochází k opotřebení či poškození. Proto se tyto strojní součásti nebo díly buď vyřazují z provozu nebo se opravují či renovují. Jedním s nejvýznamnějších způsobů oprav a renovací je bezesporu navařování a svařování. Dále se touto technologií mohou vytvářet nové povrchy ze zcela odlišnými vlastnostmi, než má základní materiál. Tím se zvyšuje u strojních součástí a dílů např. jejich odolnost proti opotřebení a tedy i jejich životnost. Následující kapitoly budou věnovány navařování a to navařování plazmou ve srovnání s navařováním svazkem elektronů. Navařování svazkem elektronů je poměrně nová metoda s ne zcela masivním využitím pro svou finanční náročnost.

1 NAVAŘOVÁNÍ [1] [2] [4]

"Svařování je definováno jako nerozebíratelné spojování dvou částí kovů pomocí tepla při teplotě tavení obou materiálů nebo tlaku vyvolávající deformaci kontaktních ploch." [1]

V technické praxi se kromě vytváření nerozebíratelných spojů tavným způsobem svařování vyskytuje i druhý způsob využití této vysokoteplotní metody a to je **navářování**.

Navářování lze tedy definovat jako **nánosové svařování**, kdy je metalurgickým procesem za vysokých teplot nataven základní materiál a zároveň je taven a do tavné lázně aplikován **návarový (přídavný) materiál**. Výsledkem je homogenní kovová nebo slitinová vrstva.

Opravy a renovace poškozených strojních součástí jsou důležitými technologickými operacemi. Rozeznáváme tyto základní hlediska obnovy opotřebeného povrchu:

- tvarové (oprava odlomených částí, doplnění povrchového opotřebení),
- funkční (odolnost proti opotřebení, třecí vlastnosti, odolnost proti vysokým teplotám),
- provozní schopnosti-bezpečnosti (spolehlivost součástí při dlouhodobém zatížení).

Statisticky se uvádí 80-90% vyřazených strojních součástí z důvodu poškození povrchových vrstev.



Obr. 1.1 Navařování vzorků kolejnic u fy KMT International [4]

Navářování se používá jednak k prostému doplnění chybějícího rozměru opotřebeného dílu, viz. obr. 1.1 nebo k vytvoření vrstvy se zcela odlišnými vlastnostmi od základního materiálu. Přitom se tedy obnoví původní rozměry součásti a povrch součásti získá výrazně vyšší užitné vlastnosti.

Efektivita renovací navařováním je asi do 70% ceny nové strojní součásti nebo náhradního dílu. Je závislá na více faktorech, např. ceně a dostupnosti

nového dílu, pracnosti výroby, rozsahu poškození a opotřebení dílu, nutnosti a pracnosti dokončovacích operací, ceně a dostupnosti přídatného materiálu, atd. Dalším důležitým úkolem pro technologa je správná analýza druhu opotřebení, poškození strojní součásti nebo dílu. Dále ovlivnění prostředím a pracovními podmínkami. Všechny tyto okolnosti a jejich důkladné zanalyzování jsou nezbytné pro návrh odpovídající technologie navařování a výběr správného přídatného materiálu.

Jak je uvedeno v úvodu práce, navařování je metoda svařování, kdy hlavním cílem je vytvoření homogenního povrchu stejného nebo různého materiálu na základním materiálu za působení tepelné energie, která je přiváděna do oblasti svaru resp. návaru.

Zdrojem tepelné energie může být:

- plamen směsi plynu a kyslíku,
- elektrický oblouk,
- plazma,
- laser,
- exotermická reakce,
- elektronový svazek (využíván v současné době minimálně).

Při navařování je hlavním úkolem kromě vytvoření povrchu odpovídajících vlastností co nejvíce snížit (omezit) hloubku závaru, tzn. co nejvíce snížit podíl základního materiálu v návarovém kovu, což rovněž příznivě ovlivňuje (omezuje) množství tepla, které je dodáváno do materiálu. Výsledkem jsou menší deformace a vnitřní pnutí. Dlouhodobým zkoumáním a sbíráním informací od svářecích technologů a svářečů byly stanoveny optimální postupy pro snížení hloubky závaru.

Navařování je využíváno jako:

- čistá obnova opotřebení nástroje nebo dílu, kdy je návarový kov stejného chemického složení (návarová vrstva by měla být ve vyšší kvalitě než základní materiál),
- vytvoření vrstvy s jinými, žádanými vlastnostmi než základní materiál, např.:
 - zlepšení korozivzdornosti,
 - ochrana proti tepelnému namáhání,
 - snížení abrazivního opotřebení,
 - snížení adhezivního opotřebení,
 - eroze, kavitace,
 - kombinace výše uvedených vlastností.

1.1 Výhody a nevýhody navařování

V současné době existují další způsoby úpravy povrchu nebo vytváření povrchu nového, jako je:

- tepelné zpracování povrchové vrstvy (žíhání, kalení, popouštění),
- metoda PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování),
- metoda CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování),
- galvanické pokovování,
- žárové nástřiky.



Obr. 1.2 Moderní PVD povlakovací stroj výrobce Teer Coatings Ltd. [16]

Ve srovnání s těmito výše uvedenými metodami má navařování tyto **výhody**:

- navařená vrstva je homogenní a kompaktní,
- navařovaný materiál je spojen se základním materiálem kovovou (pevnou) vazbou,
- pevnost odpovídající minimálně pevnosti základního materiálu,
- pomocí vhodných částic, které jsou obsaženy v přídatném materiálu, lze docílit povrchu požadovaných vlastností,
- lze zhotovit libovolné tloušťky návaru,
- vlastní operaci navařování lze mechanizovat a automatizovat,
- navařovat lze i jako ruční operace.

Nevýhody ve srovnání s ostatními metodami:

- vysoce tepelně ovlivněný základní materiál,

- změna struktury základního materiálu na rozhraní základní materiál-návar ,
- při navařování na ušlechtilé materiály(oceli) je nutné základní materiál předežhřát na poměrně vysokou teplotu,
- část základního materiálu se obvykle nacházejí v návaru,
- nelze navařit tenké vrstvy cca 0,1 mm,
- dochází k vnitřnímu pnutí a následné deformaci,
- celkově je proces energeticky náročnější,
- specifická technologie vyžaduje vyšší nároky na obsluhu a náročnější vybavení,
- po operaci navařování musí následovat operace broušení resp. třískové obrábění povrchu pro dosažení požadované drsnosti a rozměru.

2 ZPŮSOBY NAVAŘOVÁNÍ

Především je nutno uvést, že při navařování je nutno vzít v úvahu **následující hlediska:**

- a) tavicí teploty základního i přídavného materiálu,
- b) specifická hmotnost základního i navařovacího materiálu.

ad a)

Ve většině případů při teplotě tavení základního materiálu vyšší a teplotě tavení navařovaného materiálu stejné nebo nižší než základního materiálu probíhá navařování bez problémů. Ovšem na druhé straně velmi nízká teplota navařovaného materiálu může znamenat komplikace nebo nemožnost navařování (např. hliník a jeho slitiny nelze navařovat na ocel vůbec)

ad b)

Při navařování přídavného materiálu na základní materiál o nižší specifické hmotnosti nastane situace, že částice základního materiálu při jeho natavení vystoupí do návaru a vytvoří se tzv. ostrůvky (např. ostrůvky oceli v návaru bronzu).

2.1 Navařování technologií speciálního tavného svařování [6]

Kromě klasických metod navařování jako je navařování plamenem, elektrickým obloukem, metodou WIG, MIG, MAG, apod. existují i další metody navařování nebo svařování tzv. **technologie speciálního tavného svařování.**

"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." [6]

Tab. 2.1 Srovnání metod svařování dle jejich plošné hustoty výkonu [6]

Zdroj energie	nejvyšší hustota výkonu [W/cm ²]
slunce a lupa	$1 \cdot 10^{-2}$
plazma	$1 \cdot 10^6$
elektrický oblouk	$1 \cdot 10^4$
elektronový svazek	$1 \cdot 10^9$
laserový svazek	$1 \cdot 10^{12}$

2.1.1 Navařování laserem [6] [3]

"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 $10^{13} \text{ W.cm}^{-2}$.

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 tuhnoucí svarový kov před oxidací) Používají se tyto ochranné plyny (Ar, Ar + CO₂, N₂, He) a tato metoda svařování nepotřebuje ke své činnosti vakuum." [6]

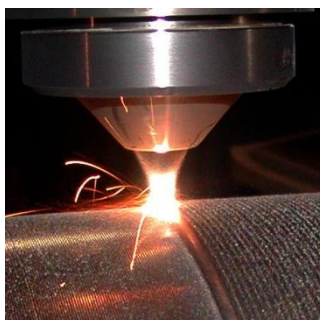
Navarování laserem [3]

Princip navařování touto metodou speciálního tavného svařování spočívá v navaření nebo natavení přídavného materiálu na povrch základního materiálu buďto žárovým nástřikem, pojivem nebo galvanicky. Mezi nejběžnější způsoby patří natavení přídavného materiálu ve formě prášku na povrch základního materiálu inertním plynem. Existují dva způsoby návaru:

- natavení prášku do návaru s difúzním spojením se základním materiálem,
- nebo částečné natavení i základního materiálu s metalurgickým spojením.

To vše v přímé souvislosti s rozložením energie na ploše a rychlosti pohybu svazku. Pro navařování se jeví jako ideální hustota energie 105 až 106 W.cm^{-2} . Navařovat lze rovinné plochy, ale rovněž tak rotační vnější i vnitřní plochy v tloušťkách 50 až 1000 mm.

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



Obr. 2.1 Ukázka navařování čepů laserem [17]

Zbývající dvě technologie speciálního tavného svařování: **plazmou a svazkem elektronů** budou popsány podrobněji.

3 NAVAŘOVÁNÍ PLAZMOU [1] [2] [3] [7]

Angl. používaný název pro svařování plazmou je **PAW** (Plasma Arc Welding). Využití plazmy jako zdroje tepla o vysoké energetické hustotě až 10^6 W.cm^{-2} je celosvětově využíváno pro svařování a navařování (zejména práškovou technologií). Při navařování nebo svařování plazmou lze nezávisle na sobě regulovat množství tepla a přídatného materiálu. Tím lze docílit optimálních podmínek a tím vrstvy návaru nebo svar vysoké kvality bez minimálního natavení základního materiálu. Co to vůbec plazma je?

3.1 Fyzikální princip vzniku plazmy [7] [3]

Fyzikální pojem **plazma** je někdy označován jako čtvrtý stav hmoty. Tento speciální stav plynu objevil, popsal a poprvé v roce 1923 nazval plazmou americký fyzik a chemik **Irving Langmuir**. V tomto stavu existují vedle neutrálních atomů a molekul také pozitivně a negativně nabitě částice, nazývané ionty a elektrony. Ostatní plyny, když se jejich teplota zvýší, se řídí klasickými fyzikálními a termodynamickými zákony. Plazma, jak objevil Langmuir, se však těmito zákony neřídí, proto 4.stav hmoty, který je odlišný od chování plynů, kapalin a tuhých látek.

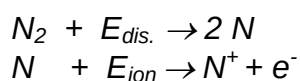
Předpokladem vzniku plazmy je nutná ionizace plynu, ať už za působení mechanického nebo teploty. Následně dochází k vyražení nebo uvolnění elektronů z vnějších valenčních orbitalů atomů. Uvolněné elektrony, tzv. valenční mají záporný náboj a vedou v plazmě elektrický proud. Ionizované jádro atomu – iont se zbývajících elektrony má kladný náboj. Navenek je ovšem plazma elektricky neutrální.

Jak je uvedeno výše, k ionizaci plynů je potřeba značná energie. V průmyslové praxi se běžně využívá jako zdroj tepla elektrický oblouk (popsán v kap.1.2.2).

Princip svařování plazmou je tedy založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem.

U dvouatomových plynů (dusík, vodík a kyslík) musí nejprve proběhnout disociace plynu, při které dochází k rozložení molekul plynu na atomy. Stupeň ionizace je závislý na teplotě a úplná ionizace se dosahuje při teplotách kolem 100 000 K. Při svařování jsou ale teploty podstatně nižší, plazma je jen částečně ionizována. Chladnější část plynu, která není plně ionizována stabilizuje plazmový paprsek v ose hořáku tak, aby se plazma nedotýkala stěn trysky a tím ji chrání před poškozením.

Příklad: disociace a ionizace dusíku: [1]



Kde E_{dis} je potřebná energie na disociaci a E_{ion} je ionizační energie

Vlastní princip je podobný s metodou WIG, ovšem při plazmovém svařování je keramická hubice nahrazena kovovou tryskou, která je chlazená vodou nebo plynem. Tedy vytvoříme-li v prostoru mezi wolframovou elektrodou (katodou) a chlazenou tryskou (anodou) elektrický oblouk, okolo kterého necháme proudit zvolený dvouatomový plyn (argon, dusík, kyslík nebo také rotující vodní vír), vytvoří se plazmový oblouk. Ten je charakteristický vysokou energetickou hustotou a teplotou (až 25 000 °C). V praxi se používají dva způsoby elektrického zapojení hořáku. Hoří-li plazmový oblouk jen mezi wolframovou katodou a chlazenou anodou, jde o hořák s nepřeneseným obloukem. Tento způsob je používán k žárových nástřiků nebo povrchovému kalení. Přenese-li se kladný pól z trysky na vodivý základní materiál, jde o přenesený plazmový oblouk. Použití tohoto zapojení je především u svařování, navařování a řezání.

Tab. 3.1 Porovnání plazmových plynů a teploty plazmy [1]

Použité plynné prostředí a průměrné teploty plazmy	
Plazmový plyn	Teplota vzniklé plazmy
dusíková plazma	9 000 K
vodíková plazma	10 000 K
argonová plazma	16 000 K
heliová plazma	20 000 K
plazma stabil. vodou	35 000 K

Rozdělení plynů pro svařování plazmou

- a) plazmový: Ar, Ar + H₂, Ar + He, průtok 0,5 až 9 l.min⁻¹,
- b) fokusační: zúžení plazmového paprsku, průtok 3 až 18 l.min⁻¹,
- c) ochranný: ochrana svarové lázně proti oxidaci, průtok 2 až 20 l.min⁻¹,
průtok 20 až 30 l. min⁻¹ u aktivních materiálů Ti, Zr.

3.2 Zařízení pro svařování plazmou [7] [3]

Hořák pro plazmové svařování má zúženou výstupní trysku, a tím dochází ke kontrakci plazmového paprsku. Také fokusační plyn, který proudí do plazmového paprsku, přispívá ke kontrakci. Jako fokusační plyny se používají směsi argonu s vodíkem nebo dusíkem. Dvouatomové plyny mají vysokou spotřebou energie na disociaci a velkou tepelnou kapacitu. Proto odebírají teplo z vnějších vrstev plazmy. Rovněž vodík s vysokou tepelnou vodivostí přispívá k vnějšímu ochlazení plazmy. Plazma se tímto zužuje, a protože musí přenést výkon odpovídající nastaveným hodnotám, dochází k nárůstu její teploty, stupni ionizace a rovněž tak ke zvýšení elektrické vodivosti.

Naopak k ochlazení plazmy při kontaktu se svařovaným materiálem vede k opačnému pochodu tzv. rekombinaci. Při ní se slučují elektrony s ionty na atomy. Při rekombinaci se disociací a ionizací akumulované teplo uvolňuje a přenáší do materiálu. Účinnost přenosu tepla je asi 70 – 80 % .

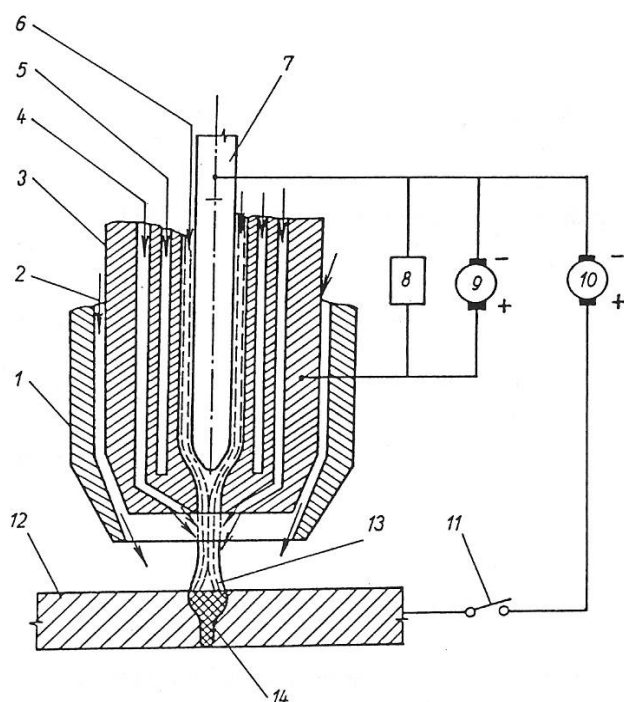
V případě, že je plyn zahříván elektrickým obloukem, mnohonásobně se zvyšuje jeho objem a tím výstupní rychlost plazmy roste. Dynamická účinnost dopadající plazmy násobena její vysokou teplotou umožňuje proniknutí paprsku od větších hloubek než u jiných "klasických" metod svařování. Základním předpokladem je dosažení rovnováhy mezi tímto dynamickým účinkem a povrchovým napětím taveniny. Jinak by mohlo docházet k vyfouknutí taveniny ze spáry. Výstupní rychlost plazmy při svařování a navařování je cca 200 až 500 m.s⁻¹.



Obr. 3.1 Plazmový navařovací automat PPC 250 GMR [8]

Plazmový navařovací automat PPC 250 GMR je určen na navařování tvarových součástí (přední, konečné a ústní sklářské formy a pod.) rotačních součástí z čela nebo na obvod (sedla, klíny a kuželky armatur, středící kroužky, dýnka a závěrové hlavy sklářských forem apod.), nerotačních součástí z čela, metodou PTA s práškem.

- polohovací systém hořáku, řízený ve 4 osách
- polohovadlo navařované součásti řízené ve 2 osách
- programování metodou "předved' a proved'"
- programování v dialogu
- navařování práškem



Obr. 3.2 Schéma plazmového svařovacího hořáku [7]

- 1) hubice pro přívod ochranného plynu
- 2) ochranný plyn
- 3) tryska hořáku
- 4) fokusační plyn
- 5) vodní chlazení
- 6) plazmový plyn
- 7) wolframová elektroda
- 8) vysokofrekvenční a vysokonapěťový ionizátor
- 9) zdroj pomocného oblouku tzv. nezávislé zapojení
- 10) zdroj hlavního elektrického oblouku tzv. závislé zapojení
- 11) spínač
- 12) základní svařovaný materiál
- 13) plazmový paprsek
- 14) provedený svar

3.3 Svařitelnost materiálů [7] [8]

Svařitelnost materiálů i parametry svařování jsou podobná jako u metody WIG. s tím rozdílem, že u plazmového svařování se dosahuje vysokých svařovacích rychlostí, výhodnějšího poměru šířky k hloubce svaru (1:1,5 až 1 : 2,5) a spolehlivého provaření kořene.

Lze svařit a navařit celou škálu ocelí, mědi, hliníku, titanu, niklu, molybdenu a jejich slitiny. Svařovací parametry vysokolegovaných ocelí pro tloušťky 2 až 10 mm jsou v mezích: elektrické napětí 28 až 40 V a proud 110

až 300 A. Stejně svařovací parametry jsou i pro svařování niklu a jeho slitin a pro svařování titanu jsou přibližně o 15 až 20 % nižší. Svařovací rychlosti jsou ve srovnání s metodou WIG podstatně vyšší 20-85 cm.min⁻¹

Hliník lze svařovat střídavým proudem a materiály náchylné na přehřátí se svařují s použitím impulsního proudu.

Výhody plazmového svařování

- metoda vhodná pro mechanizaci a automatizaci,
- svarové plochy se nemusí upravovat,
- svařování bez podložení kořene,
- tvar svaru a celkový průvar v dobré kvalitě,
- svar čistý a bez pórů a bublin,
- dobré mechanické vlastnosti svarového spoje,
- svařovat lze střídavým i impulsním proudem,
- vysoká rychlost svařování, resp. navařování,
- ve srovnání s metodou WIG menší tepelně ovlivněná oblast,
- tím menší deformace základního materiálu,
- svařování na jeden průchod,
- svařovat lze i větší tloušťky materiálu (svařování klíčovou dírkou, bude popsáno dále).

3.4 Další využití plazmy v technologiích [7]

Základní rozdělení dalších možných technologií, které využívají plazmu je přímo závislé na svařovacím proudu.

- mikroplazmové svařování ($I = 0,1\text{--}20\text{ A}$),
- středoplazmové ($I = 20\text{--}100\text{ A}$),
- svařování "klíčovou dírkou" ($I > 100\text{ A}$),
- řezání plazmou.

3.4.1 Mikroplazmové svařování

Stabilitu hoření plazmového oblouku lze udržet i při nízkých proudech. Je využívána při tzv. mikroplazmovém svařování. Svařovací proud je v mezích od 0,1 do 20 A. Mikroplazmovým svařováním lze svařovat kovové folie tl. 0,01 mm i plech tl. 2 mm. Na druhé straně je ovšem zapotřebí věnovat velkou pozornost přípravě svarových ploch a mezery. Její tloušťka je asi 10 až 20 % tloušťky folie. Rovněž je nutností použití upínacích přípravků pro odvod tepla a stabilní zapořování svařence, resp. fólie. Mikroplazmové svařování se uplatňuje v kosmickém průmyslu, letectví, dále pak v elektronice, přístrojové technice, chemickém a potravinářském průmyslu.

Svařování "klíčovou dírkou"

Při průchodu plazmového paprsku o vysoké teplotě a dynamické síle dochází k vytvoření otvoru na přední straně svařence. Tento se nazývá klíčová díрка. Když se svařovací hořák a tedy i oblouk posunuje dále po materiálu, dochází vlivem povrchového napětí k opětovnému stažení materiálu svařence. Za klíčovou dírkou dojde k opětovnému spojení kovového materiálu. Tímto efektivním způsobem je možné svařovat tupé svary až do hloubky cca 8 mm a to bez úpravy svarového úkosu a na jeden průchod paprsku. U tohoto způsobu svařování není zapotřebí žádný přídavný materiál. Je zde zřejmý vysoký ekonomický přínos, a další obecné výhody svařování plazmou.

3.4.2 Řezání plazmou

Podstatou této metody řezání je využití vysoké teploty a výstupní rychlosti proudu plazmy. Dynamický účinek vystupující plazmy se zvýší, když zvýšíme průtok a tlak plazmového plynu. Přitom je roztavený materiál vyfouknut z řezné spáry. Jak je patrné, rychlost proudu vystupující plazmy je vyšší než u svařování a pohybuje se od 1500 do 2300 m.s⁻¹. Vysoká teplota plazmového paprsku umožňuje řezat všechny kovové vodivé materiály, i když je často nelze řezat kyslíkem. Nezávislým zapojením, viz. výše lze řezat i elektricky nevodivé materiály.

Maximální tloušťka materiálu na řezání je asi 250mm. Rychlost řezání je závislá na výkonu zdroje, tloušťce a druhu řezaného materiálu a jeho fyzikálních vlastnostech. Elektrické zdroje pro řezání plazmou mají vysoké napětí naprázdno cca 250 až 350 V. Při vlastním řezání se hodnota pohybuje od 110 do 150 V. Zapalování řezacího oblouku probíhá ve dvou fázích. Na začátku řezání je pomocí vysokofrekvenčního ionizátoru zapálen tzv. pilotní oblouk, který hoří mezi elektrodou a kovovou hubicí po dobu 6 až 10 vteřin. Tímto obloukem dojde k ionizaci okolního prostoru mezi elektrodou a řezaným materiálem. Jsou vytvořeny podmínky pro zapálení hlavního hořáku, který je zapálen ve druhé fázi. Rychlost řezání tenkých plechů je od 9 do 12 m.min⁻¹.

3.5 Svařovací parametry a jejich vliv na svařování [8]

Pro efektivní a ekonomicky výhodné svařování resp. navařování je nezbytná dokonalá znalost svařovacích parametrů a jejich správné nastavení pro daný svařovaný, resp. navařovaný materiál. Mezi základní parametry patří:

- **svařovací proud** - ovlivnění svarů vlivem výstupního tlaku plazmy a teploty. Při zesílení proudu dochází k tomu, že výsledný svar je širší a to jak v horní části na povrchu, tak v dolní u kořene svaru. V případě, že svařovací proud je v poměru ke svařovací rychlosti a k tloušťce materiálu příliš silný, dochází k penetraci (proniknutí do hloubky) svarové lázně. Paradoxně má podobný vliv i příliš slabý svařovací proud. Podobný vliv má na svařování i tlak a průtok plazmového plynu, viz. níže.
- **rychlost proudu plazmového plynu** - v přímé souvislosti k tloušťce svařence a rychlosti svařování se musí zvýšit i rychlost toku plazmového plynu. Mimo jiné souvisí tato rychlost i s hloubkou penetrace a s

pohybovou (kinetickou) energií vlastního oblouku. Velikost rychlosti je asi od 2,5 do 3,5 l.min⁻¹.

- **rychlost svařování** - příliš nízká rychlost vede k velké penetraci. Dá se eliminovat snížením svařovacího proudu nebo použitím aktivního plazmového plynu s dobrou tepelnou vodivostí. Rozsah svařovacích rychlostí je od 20 do 30 cm.min⁻¹.

Zbývá dodat, že toto nejsou jediné parametry, které vedou ke kvalitnímu svaru. Kromě toho ovlivňuje výsledný efekt svařování, resp. navařování i vlastní složení plazmy, ochranných plynů, napětí v plazmovém oblouku, rychlost posuvu svařovacího drátu, konstrukce svařovací hubice. Dále také příprava svarových ploch (pokud je třeba), čistota svařenců, vlastní nastavení, seřízení svařovací aparatury.

Navíc je důležité sladit všechny uvedené základní parametry k dosažení požadovaného kvalitního svaru. To ovšem vyžaduje někdy i dlouholetou praxi svařovacího technologa a svářeče.

3.6 Navařování plazmou [3] [7]

Jak je uvedeno v předchozích kapitolách, rychlost ohřevu plazmou je velmi vysoká a specifické vnesené teplo do základního materiálu je nízké. Z toho vyplývá i jedna z výhod plazmového svařování, tedy malá tepelně ovlivněná oblast (také možností impulsního průběhu proudu s regulací frekvence od 0 do 1000Hz), poměrně malé deformace. Při navařování plazmou nedochází nebo jen velmi málo k natavení základního materiálu a z toho důvodu nedochází nebo jen ve velmi malé míře k promísení návaru se základním materiálem. Vrstva promísení nad 10% je maximálně do hloubky 0,5 mm od rozhraní základní materiál – návar. Od tloušťky návaru 1mm lze již hodnotit požadované vlastnosti návaru, které výrobce přídatného materiálu uvádí v chemickém složení.

Výhody navařování plazmou:

- návar je bez pórů, bublin a ředin s metalurgickým spojením se základním materiálem,
- velice úzká přechodová vrstva mezi návarem a základním materiálem (asi 1-2 mm),
- návar je hladký a v perfektní kvalitě, tzn. nejsou nutné velké přídavky na konečné opracování max. 0,5mm,
- minimální propal legujících prvků,
- při použití práškových přídatných materiálů je skvělá využitelnost (nad 90%),
- velký výběr druhů přídatných materiálů (dráty, tyčinky, trubičky a prášky),
- možnost automatizace, robotizace,
- snížení navařovací doby, úspora času a ekonomické zvýhodnění.

Snad jedinou nevýhodou se jeví vysoké pořizovací náklady přídatných materiálů ve formě prášku.

Slitiny kovů kobaltu, niklu a vysokolegovaných ocelí s tvrdostí od 250 HB do 70 HRC (FeCrNbVSiMnBC) a tepelnou odolností vybraných superslitin (CoCrNiMoC) do 900°C jsou dnes nepoužívanější přídavné materiály pro navařování plazmou. Ať už ve formě prášků, tyčinek nebo drátů. V dalších kapitolách se jimi budu zabývat podrobněji.

Také mikroplazma se využívá pro navařování plošných návarů např. poškozených vtokových kanálů, zkorodovaných stěn forem nebo funkčních ploch. V těchto případech je nejvýhodnější a někdy nejjednodušší použít stejné složení přídavného materiálu jako je složení základního materiálu renovovaných nebo opravovaných dílců.

4 NAVAŘOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ [6] [7] [9] [10] [12] [13] [14]

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

4.1 Vytvoření a interakce svazku elektronů [7] [9] [10] [12]

4.1.1 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 nejvýkonnějších 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.

4.1.2 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 [9].

$$J_e = A_j \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-e \cdot \varphi_0}{k \cdot T}} \quad [A \cdot cm^{-2}] \quad (4.1)$$

kde: J_e je proudová hustota emisního proudu
 A_j je konstanta emise závisající na povrchu (pro většinu kovů má hodnotu $40 \sim 70 A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$)
 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 ($1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$)

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.

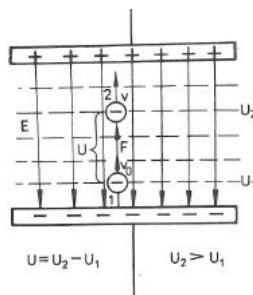
Volné elektrony se tak mohou pohybovat a pokud jsou vloženy do elektrického nebo magnetického pole, tak ji může být uděleno velké zrychlení. Pro elektrickou sílu působící na elektron v homogenním elektrickém poli s intenzitou E , vytvořeného mezi dvěma rovnoběžnými dostatečně vzdálenými deskami platí vztah [9]

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{E} \quad [N] \quad (4.2)$$

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 $\vec{E}$. Práce, vykonaná, resp. spotřebovaná elektrickým polem na přemístění náboje z jednoho místa na druhé je dána vztahem [9]

$$A = e \cdot U = e \cdot (U_2 - U_1) \quad [J] \quad (4.3)$$

kde: U je rozdíl potenciálů mezi body 1 a 2 (viz. obr. 4.1)



Obr. 4.1 Vliv homogenního el. pole na elementární náboj [9]

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

$$W_k = \frac{m_e \cdot (v^2 - v_0^2)}{2} \quad [J] \quad (4.4)$$

kde: m_e je hmotnost elektronu $[kg]$

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

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

$$A = W_k \quad (4.5)$$

$$e \cdot U = \frac{m_e \cdot (v^2 - v_0^2)}{2} \quad (4.6)$$

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

$$e \cdot U = \frac{m_e \cdot v^2}{2} \quad (4.7)$$

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]

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m_e} \cdot U} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (4.8)$$

dosazením jednotlivých veličin pro hmotnost m_e a náboj e elektronu získáváme přibližný vztah pro velikost rychlosti elektronu [9]

$$v = 600 \cdot \sqrt{U} \quad [km \cdot s^{-1}] \quad (4.9)$$

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.

4.1.3 Vliv magnetického pole, význam

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

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}_e \cdot \mathbf{v} \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}] \quad (4.10)$$

kde $\mathbf{B}_e$ je magnetická indukce $[\text{T}]$

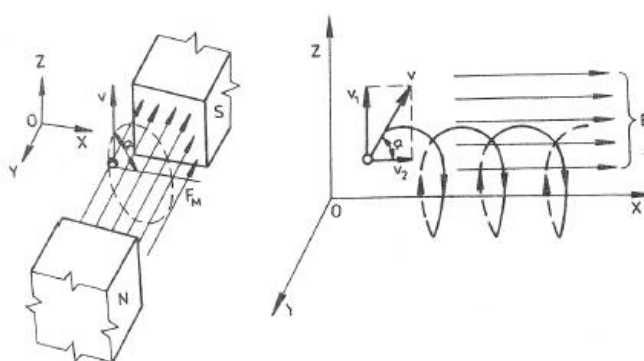
α je úhel mezi směrem vektoru rychlosti a směrem magnet. siločar $[\circ]$

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 [9]

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}_e \cdot \mathbf{v} \quad [\text{N}] \quad (4.11)$$

Směr působící síly je určen pravidlem levé ruky. Je vždy kolmá na směr okamžité rychlosti elektronu $\mathbf{v}$ a na směr siločar magnetického pole. Z 2. Newtonova zákona vyplývá, že tato síla uděluje elektronu o hmotnosti m_e zrychlení o velikosti $\mathbf{B}_e \cdot \frac{\mathbf{v}}{m_e}$. 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 $\mathbf{v}_1$ a $\mathbf{v}_2$. Vektor rychlosti $\mathbf{v}_1$ směřuje ve směru kolmém na magnetické siločáry a vektor $\mathbf{v}_2$ vodorovně s magnetickými siločarami. V důsledku působení obou složek má výsledná dráha elektronu tvar spirály. Viz. obr. 4.2.



Obr. 4.2 Vliv magnetického pole na volný pohybující se elektron [9]

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

4.1.4 Přeměna kinetické energie elektronů na tepelnou

Elektrony jsou, jak uvedeno výše, 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 plyných 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).

4.1.5 Chování svazku elektronů při interakci s kovem

Elektrony po dopadu na pevnou látku pronikají pod její povrch do poměrně malé hloubky d dané výrazem [10]

$$d = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot U^2 \quad [mm] \quad (4.12)$$

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

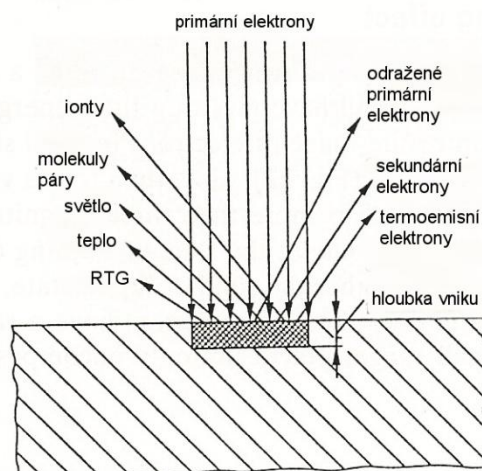
Tato hloubka je v řádech od tisícín do desetin milimetru. Příklady vnikání svazku do různých materiálů v závislosti na použitém urychlovacím napětí jsou uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Příklady vnikání svazku elektronů do různých materiálů v mm [10]

	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

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. 4.3.



Obr. 4.3 Průběh procesu při vnikání svazku elektronů do materiálu [10]

Sekundární elektrony se dělí na:

- pružné odražené (u těchto se energie rovná dopadajícím elektronům),
- odražené v důsledku nepružných srážek,
- elektrony u kterých energie nepřevyšuje 50 eV.

Jak je patrné z obr. 4.3 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,

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.

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. 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.

4.2 Základní části elektronových svářeček

Celková svařovací aparatura pro svařování, resp. navařování elektronovým svazkem je poměrně složitá, složitější než aparatura pro svařování plazmou nebo laserem a skládá se z více jednotlivých částí, které jsou na sobě mnohdy nezávislé. Jejich konstrukce, parametry a vybavení jsou jedinečné a jsou vyráběné "na míru".

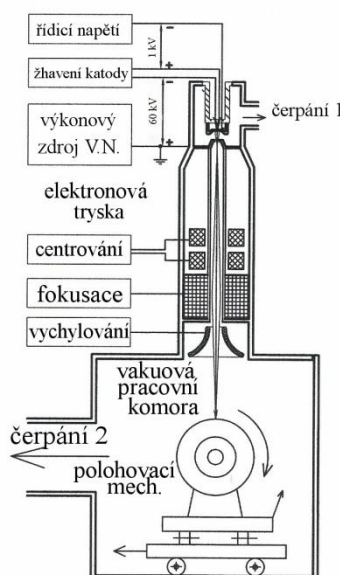
Bylo vytvořeno nesčetné množství typů různých svářeček, rozměrově malých a relativně jednoduchých, nebo větších rozměrů, velmi složitých a logicky i nákladných zařízení. Je přirozené, že se tato metoda pro svoji mimořádnost používá v nejrůznějších oborech techniky. Těchto svářeček není ve světě mnoho, 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

mechanizmů jsou nemalé. Vlastní svařování probíhá k pracovní komoře. Základní schéma malé a jednoduché elektronové svářečky je na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Schéma jednoduché elektronové svářečky [11]

Elektronové svářečky mohou být rozděleny do tří skupin:

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

4.2.1 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. výše.

Elektronová tryska se skládá z těchto základních prvků:

- katoda (zdroje elektronů),
- elektrická urychlovací čočka,
- magnetická fokuzující čočka.

4.2.2 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 m^3 , viz. foto na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Pracovní komora o objemu 32 m³ [12]

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). Ostatní části svařovací aparatury jsou obdobné jako u konvečních souprav.

Čerpání vzduchu z komory a el. trysky je prováděno **turbomolekulárními vývěvami**.

4.3 Svařitelnost materiálů

4.3.1 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 zvláště 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 uvažováním 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).

4.3.2 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.

4.3.3 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

4.3.4 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.

4.3.5 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 svaru 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 žíhají k odstranění vnitřního pnutí.

4.3.6 Nikl a jeho slitiny

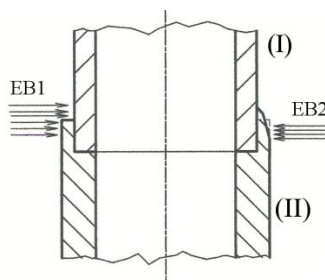
Nikl i jeho slitiny s jinými kovy jsou dobře svařitelné, včetně slitiny známé jako „Monel“ s obsahem 35% Cu. U slitin niklu pomáhá zabránit vzniku prasklin za tepla snížení rychlosti svařování. Pro svařování elektronovým svazkem jsou též vhodné též žáru-, korozi- a opotřebení-vzdorné slitiny s kobaltem. Stelity jsou zvláštní skupina kobaltových slitin, jejichž tvrdost závisí na obsahu karbidů. Svařitelnosti je u tvrdosti 45 HRC.

4.3.7 Svařování odlišných materiálů

V technické praxi je mnohdy nezbytné svařování součástek z nestejněho 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. 4.6, kdy je spoj vytvořen roztavením jen jednoho materiálu s nižší tavicí teplotou. Při svařování se postupuje tak, že se nejdříve více rozostřeným svazkem předeheje 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. 4.6 Spoj dvou rozdílných materiálů [10]

4.4 Výhody, nevýhody a využití svařování svazkem elektronů

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 jiným 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. 4.6 Ukázka hlubokého svaru 80mm oceli 13 373 el. svazkem

4.5 Navařování svazkem elektronů [13] [14]

Jak bylo uvedeno v úvodu, tato metoda navařování není zatím příliš rozšířena. A to hlavně z důvodů ekonomických. Pořízení svařovací aparatury je velmi nákladná záležitost v řádech 10 mil Kč. Nicméně důkladnou rešerší bylo v elektronické univerzitní knihovně ósacké univerzity nalezeno několik významných experimentů navařování svazkem elektronů.

4.5.1 Experiment č. 1 - Efekt nastavení parametrů na vlastnosti vrstev při navařování svazkem elektronů s přídavným materiálem ve formě prášku

Název experimentu:

Efekt nastavení parametrů na vlastnosti vrstev při navařování svazkem elektronů s přídavným materiálem ve formě prášku

Experiment provedli:

prof. Nobuyuk ABE, prof. Masahiro TSUKAMOTO, prof. Shoji MIYAKE, prof. Fumiaki KURIYAMA, prof. Junji MORIMOTO a prof. Michio TOMIE

Jak už název napovídá, v experimentu byla zkoumána souvislost mezi nastavením svařovacích, resp. navařovacích parametrů (proud el. svazku, rychlost navařování, množství a rychlost přídavného materiálu-prášku) a vlastnostmi vzniklého návaru.

Použitá svařovací aparatura:

- elektronové dělo o výkonu 30 kW a urychlovací napětí 40 kV,

- dvě fokusační magnetické čočky,
- plnič přídavného materiálu - prášku schopný pracovat ve vakuu,
- polohovací zařízení.

Jako základní materiál - substrát byla zvolena měkká ocel SS400, označení ČSN 11 443, W.Nr. značka 1.0044, EU značka S275JR o tloušťce 3 mm.

Fyzikální a mechanické vlastnosti [15]:

Jedná se o neušlechtilou konstrukční ocel, nelegovanou, vhodnou ke svařování a navařování. Používá se na součásti konstrukcí a strojů menších tloušťek, namáhané staticky a mírně dynamicky.

Fyzikální vlastnosti:

- modul pružnosti v tlaku a tahu $E = 210000 \text{ MPa}$,
- modul pružnosti ve smyku $G = 81000 \text{ MPa}$,
- hustota $\rho = 7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Do tl. materiálu 40mm má tyto mechanické vlastnosti:

- mez kluzu 400 MPa,
- mez pevnosti 520 MPa.

Jako přídavný materiál - prášek byl použit mixovaný prášek $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Ni-Cr}$ (75% Cr_3C_2 a 25% Ni-Cr) Povlaky na bázi $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ se používají především pro zvýšení tvrdosti a otěruvzdornosti za zvýšených teplot, kdy vykazují velmi vysokou strukturní stabilitu a odolnost proti oxidaci. Směs byla složena z matrice Ni-Cr, která zajišťuje povlaku dostatečnou korozní odolnost a druhá část směsi Cr_3C_2 jeho otěruvzdornost.

Prášek byl stabilně dodáván ze zásobníku na povrch substrátu o rychlosti plnění 0,4 g/sec. Substrát se pohybuje rychlostí 5 mm/sec. Svazek elektronů osciloval v amplitudě 20 mm a o rychlosti 1000 mm/sec až 2000 mm/sec. Hustota vstupující energie byla $1,125 \text{ J/sec}\cdot\text{mm}^2$ a byla konstantní. Byly použity celkem tři kombinace hodnot proudu a rychlosti navařování a to:

Tab. 4.2 Hodnoty navařovacích parametrů při konstantní hodnotě hustoty vstupující energie

pořadí exp.	proud svazku	rychlost navařování
	[mA]	[mm/sec]
1.	35	1244
2.	45	1600
3.	55	1956

Po operaci byl vzorek zkoumán optickým mikroskopem, byla provedena Vickersova zkouška tvrdosti, test eroze (kuličky z měkké oceli 300 μm a tlak proudícího vzduchu 500 kPa). Bylo zjištěno následující:

1. Při hodnotách proudu 35 mA a navařovací rychlosti 1244 mm/sec vykazoval návar značné nedostatky. Byl porézní a byly v něm neroztavené částice. Změřená tvrdost návarové vrstvy podle Vickerse byla 900 HV. Hmotnostní úbytek vrstvy při testu eroze byl vysoký $1,7 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ a byl zapříčiněn porézností návaru.
2. Při hodnotách proudu 45 mA a navařovací rychlosti 1600 mm/sec byla dosažena optimální kvalita návaru. Ten byl bez pórů a neroztavených částic. Jeho tloušťka byla $180\mu\text{m}$. **Tvrdost podle Vickerse byla nejvyšší v experimentu 967 HV. Hmotnostní úbytek vrstvy při testu eroze byl nejmenší v testu $0,5 \mu\text{g}/\text{mm}^2$.**
3. Při hodnotách proudu 55 mA a navařovací rychlosti 1956 mm/sec se objevil uprostřed návaru nepravidelný vrchol a v návaru byly zjištěny části substrátu, které se zde rozpustily a promíchaly s návarovým materiálem. Tvrdost podle Vickerse byla nejnižší v testu 400 HV. Prudký pokles tvrdosti byl způsobem rozložením a promícháním tvrdých částic Cr_3C_2 s roztavenými částicemi substrátu. Hmotnostní úbytek vrstvy při testu eroze byl dosti vysoký $1,5 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ a byl zapříčiněn nízkou tvrdostí vrstvy návaru.

Tab. 4.3 Výsledné hodnoty testu při různých hodnotách proudu a rychlosti navařování

pořadí exp.	proud svazku	rychlost navařování	tvrdost	eroze (hm. úbytek)
	[mA]	[mm/sec]	[HV]	$[\mu\text{g}/\text{mm}^2]$
1.	35	1244	900	1,7
2.	45	1600	967	0,5
3.	55	1956	400	1,5

Další část experimentu byla zaměřena na vyzkoušení účinku změny hustoty vstupující energie na výsledné kvalitě návaru. Hodnota navařovacího proudu zůstala konstantní 35 mA. Rychlost navařování byla 1600 mm/sec, 1244 mm/sec, 1164 mm/sec. Hodnoty vstupující hustoty energie byly $1,000 \text{ J}/\text{sec}.\text{mm}^2$, $1,125 \text{ J}/\text{sec}.\text{mm}^2$ a $1,250 \text{ J}/\text{sec}.\text{mm}^2$.

Tab. 4.4 Hodnoty navařovacích parametrů při konstantním proudu 35 mA

pořadí exp.	proud svazku	rychlost navařování	hustota energie
	[mA]	[mm/sec]	$[\text{J}/\text{sec}.\text{mm}^2]$
1.	35	1600	1,000
2.	35	1244	1,125
3.	35	1164	1,250

Jako i v první části experimentu byly testované vzorky podrobeny zkoumání a bylo zjištěno, že u všech tří hodnot hustoty energie a odpovídajícím rychlostem navařování se objevovaly zbytky neroztavených částic návarového prášku. Jejich množství s přibývajícím hustotu vstupující energie klesalo. Ovšem při nejvyšší hodnotě hustoty energie $1,250 \text{ J/sec.mm}^2$ a 1164 mm/sec se navíc objevily i částice substrátu jako v první části experimentu.

Závěr:

V tomto experimentu, který provedly vědci z ósacké univerzity, viz výše, bylo zjištěno, že oba faktory elektronového navařování navařovací proud a rychlost navařování jsou významnými činiteli pro budoucí kvalitu návarové vrstvy. S nízkou hodnotou navařovacího proudu a rychlosti navařování byly v na povrchu návaru zjištěny neroztavené částice.

Naopak s přibývajícím hodnotou navařovacího proudu a rychlosti navařování se uprostřed návarové vrstvy utvořil nepravidelný vrchol a byly zde zjištěny i částice základního materiálu-substrátu. To způsobilo snížení tvrdosti a odolnosti proti erozi.

4.5.2 Experiment č. 2 - Navařování vrstev WC-Co za pomoci svazku elektronů

Název experimentu: Navařování vrstev WC-Co za pomoci svazku elektronů

Experiment provedli:

prof. Nobuyuk ABE a prof. Junji MORIMOTO

V tomto experimentu byl zkoumán vliv nastavení navařovacích podmínek a poměru navařovacího materiálu - prášku WC-12%Co a Ni samotavicí slitina na vlastnosti vzniklého návaru.

Použitá svařovací aparatura (stejná jako v prvním případě):

- elektronové dělo o výkonu 30 kW a urychlovací napětí 40 kV,
- dvě fokusační magnetické čočky,
- plnič přídavného materiálu - prášku schopný pracovat ve vakuu,
- polohovací zařízení.

Jako základní materiál - substrát byla zvolena (stejně jako v prvním případě) měkká ocel SS400, označení ČSN 11 443, W.Nr. značka 1.0044, EU značka S275JR o tloušťce 3 mm.

Jako přídavný materiál - prášek byl použit mixovaný prášek WC-12%Co/Ni. Povlaky na bázi WC-Co se používají především pro zvýšení tvrdosti a otěruvzdornosti za zvýšených teplot, kdy vykazují velmi vysokou strukturní stabilitu a odolnost proti oxidaci. Směs je složena z pojiva Co, které zajišťuje povlaku dostatečnou houževnatost a Ni-samotavicí slitina jeho korozivzdornost a druhá část směsi WC jeho otěruvzdornost. Běžnými metodami je nanášení WC-Co obtížné kvůli jeho snadné oxidaci při zvýšených teplotách a rozkládá se

na W_2C nebo W . V podmínkách elektronového navařování je to vyloučeno (probíhá ve vakuové komoře).

Prášek WC-Co byl stabilně dodáván ze zásobníku na povrch substrátu o rychlosti plnění 0,5 g/sec, 0,7 g/sec a 1,0 g/sec. a rychlost plnění prášku Ni byla konstantní 0,4 g/sec, tak aby byl poměr WC-Co k Ni 20%, 40% a 60%. Substrát se pohyboval rychlostí 5 mm/sec. Svazek elektronů osciloval v amplitudě 20 mm a o rychlosti 1000 mm/sec až 2000 mm/sec. Hustota vstupující energie je $1,125 \text{ J/sec.mm}^2$ a byla konstantní. Byly použity celkem tři kombinace hodnot proudu, rychlosti navařování a směsného poměru:

Tab. 4.5 Hodnoty navařovacích parametrů

pořadí exp.	proud svazku	rychlost navařování	WC-Co poměr
	[mA]	[mm/sec]	[%]
1.	30	1000	20
2.	35	1600	40
3.	45	2000	60

Po operaci byl vzorek zkoumán optickým mikroskopem, byla provedena Vickersova zkouška tvrdosti, test eroze (kuličky z měkké oceli 300 μm a tlak proudícího vzduchu 300 kPa), test korozivzdornosti ponorem do roztoku kyseliny sírové H_2SO_4 po dobu 10 hod. a teplotě 313 K. Bylo zjištěno následující:

1. Při hodnotách proudu 30 mA, navařovací rychlosti 1000 mm/sec a poměru WC-Co 20% vykazoval návar značné nedostatky. Byl porézní a byly v něm neroztavené částice. Změřená tvrdost návarové vrstvy podle Vickerse byla nejnižší v testu 1095 HV, hmotnostní úbytek vrstvy při testu eroze byl vysoký $6,2 \mu\text{g/mm}^2$ a byl zapříčiněn porézností návaru a menším množstvím WC. Hmotnostní úbytek při testu korozivzdornosti byl naopak nejvyšší v testu $3,2 \mu\text{g/mm}^2\cdot\text{hod}$.
2. Při hodnotách proudu 35 mA, navařovací rychlosti 1600 mm/sec a poměru WC-Co 40% byla dosažena optimální kvalita návaru a hodnot odolnosti proti abrazi a korozi. Návar byl bez pórů a neroztavených částic. Tvrdost podle Vickerse byla střední v tomto testu 1310 HV, hmotnostní úbytek vrstvy při testu eroze byl $3,8 \mu\text{g/mm}^2$. Hmotnostní úbytek vrstvy při testu korozivzdornosti byl střední $4,8 \mu\text{g/mm}^2\cdot\text{hod}$.
3. Při hodnotách proudu 45 mA, navařovací rychlosti 2000 mm/sec a poměru WC-Co 60% byly v návaru zjištěny části substrátu, které se zde rozpustily a promíchaly s návarovým materiálem. Tvrdost podle Vickerse byla nejvyšší v testu 1450 HV, hmotnostní úbytek při testu eroze byl $2,5 \mu\text{g/mm}^2$. Hmotnostní úbytek vrstvy při testu korozivzdornosti byl nejvyšší $6,5 \mu\text{g/mm}^2\cdot\text{hod}$.

Tab. 4.6 Výsledky experimentu při různých hodnotách proudu, navařovací rychlosti a poměru WC-Co

pořadí exp.	proud svazku	rychlost navařování	WC-Co poměr	tvrdost	eroze (hm. úbytek)	korozivzdorn. (hm. úbytek)
	[mA]	[mm/sec]	[%]	[HV]	[$\mu\text{g}/\text{mm}^2$]	[$\mu\text{g}/\text{mm}^2 \cdot \text{hod}$]
1.	30	1000	20	1095	6,2	3,2
2.	35	1600	40	1310	3,8	4,8
3.	45	2000	60	1450	2,5	6,5

Závěr:

Jak vyplývá z uvedených naměřených dat, s rostoucím poměrem WC-Co/Ni roste i tvrdost a odolnost proti abrazi. Rovněž však stejně tak klesá i korozivzdornost. Je to způsobeno tím, že s rostoucím poměrem WC-Co/Ni je požadováno i navýšení rychlosti navařování a navařovacího proudu. Tím dochází k navýšení vneseného měrného tepla do substrátu a k jeho natavení a vnesení jeho částic do návaru. Částice Fe byly zjištěny v návarové vrstvě a právě ty způsobily zvýšenou korozi.

Další část experimentu se zabývala řešením tohoto problému.

Byl proveden návar dvou vrstev WC-Co/Ni a to nejprve s poměrem 20% a následně 60%. První vrstva návaru s poměrem 20% byla nanášena s navařovacími podmínkami, jak v první části experimentu. Zajistila minimální vnesení částic substrátu do návaru a tím i dostatečnou odolnost proti korozi. Druhá návarová vrstva byla nanášena na první a zajistila tomuto dvouvrstvému návaru dostatečnou tvrdost. Tím byl problém s nedostatečnou korozivzdorností vyřešen.

5 PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY PRO NAVAŘOVÁNÍ

Rozdělení přídatných materiálů lze provést ze dvou hledisek:

- tvaru
- chemického složení

5.1 Rozdělení podle tvaru

Základní rozdělení přídatných materiálů podle tvaru a způsobu provedení:

- dráty
- obalované elektrody
- tyčinky
- plněné elektrody (trubičkové dráty)
- **plněné pásy**
- **kordy**
- pásy
- **pasty**
- **prášky**

Plněné pásky, kordy, prášky a pasty, u kterých je vzniklý návarový kov odolný vůči různým druhům opotřebení (abrazivní, adhezni, kavitační, korozní aj.), Tyto nejsou určeny pro opravy, ale pro vytvoření nového povrchu s lepšími vlastnostmi, než má základní materiál.

5.2 Rozdělení podle chemického složení

Výběr odpovídajícího přídavného materiálu (hlavně jeho chemické složení) je značně složitá záležitost a vyžaduje pečlivou analýzu vlastností základního materiálu a budoucích vlastností vzniklé návarové vrstvy. Jejich výčet je velice rozsáhlý.

Pro plazmové navařování se jako přídavné materiály používají hlavně prášky na bázi kobaltu – tzv. stellity, které vytváří vrstvy velice tvrdé (až 55HRC) odolné proti abrazi, chemické a tepelné korozi i kontaktnímu zatížení.

Navařování elektronovým svazkem je energeticky velice podobné navařování laserem. V porovnání s navařováním plazmou vnáší laser do navařovaného dílu mnohem méně tepla, což se příznivě projevuje menšími deformacemi, jemnější mikrostrukturou a vyššími tvrdostmi. K přídavným materiálům dále patří:

- nerezové materiály (na bázi železa s vyšším obsahem chromu a niklu),
- niklové prášky (tvrdost od 32 do 62 HRC),
- kobaltové slitiny (pod označením Stellite, otěruvzdorné materiály nad 500 °C),
- měděné prášky (bronzové vrstvy jako výstelky kluzných ložisek).

6 TYPY VAD SVARŮ, NÁVARŮ [18]

Při výrobě vznikají v kovech mikroskopické vady (na úrovni krystal. mřížek, atomů, zrn), které významně ovlivňují další vlastnosti materiálu. Tyto vady mají všechny vyrobené materiály, ty si ale neuvědomujeme a klademe důraz na vady viditelné makroskopické. Ty jsou snadněji zjištělné (např. mikroskopem, ultrazvukem, apod.) a jsou pochopitelnější. Hrají nejdůležitější úlohu na ovlivnění užitečných vlastností kovů, kterou můžeme technicky ovlivnit, například správnou technologií svařování.

Vadou výrobku obecně je každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami případně smluvním vzorkem.

Základní rozdělení vad:

- **zjevné**, které lze zjistit při prohlídce výrobku pouhým okem nebo jednoduchými pomůckami nebo,
- **skryté**, které obvykle zjistíme pomocí přístrojů nebo laboratorními zkouškami.

Tyto vady mohou být obecně **přípustné** (nacházející v povolených hodnotách) nebo **nepřípustné** (mimo povolené hodnoty).

6.1 Vady svarů

U svařování resp. navařování se nacházejí tyto vady:

- **plošné** (trhliny, neprůvary a studené spoje),
- **objemové** (póry, bubliny, kovové a nekovové vměstky, ale také zápaly vruby, nedodržení rozměrů a nepravidelnost povrchu svarů).

Vady svarů se dělí podle polohy vady ve svaru na:

- **povrchové** (na povrchu svaru - líc i rub, neboli kořen svaru)
- **vnitřní** (pod povrchem svaru a nevystupují ven na povrch svaru)

Podle charakteru v souladu s normou **ČSN EN ISO 6520-1** na:

- **trhliny** (podélné, příčné, kráterové, nespojité, rozvětvené ...)
- **dutiny** (např. póry, bubliny, staženiny – vyskytují se jako jednotlivé nebo ve shlucích a řádcích)
- **vměstky** (např. struskové, tavidlové, oxidické, kovové)
- **studený spoj** (neexistující kovová vazba, materiál nebyl nataven a je pouze „nalepený“ bez pevného spojení se zákl. materiálem)
- **neprůvar** (neprovařený kořen)
- **vady tvaru a rozměru** (zápaly, vruby v kořeni, vruby mezi jednotlivými housenkami, nadměrné převýšení svaru, přetečení krycí nebo kořenové vrstvy, lineární přesazení, neúplné vyplnění svaru, nepravidelná šířka, vadné napojení ...)
- **různé vady** (např. stopa po hoření oblouku, rozstřík, vytržený povrch, vada stehu, brusné stopy ...)



Obr. 7.1 Nekvalitní svar trubek se zápaly a studenými spoji [18]

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Technologická operace navařování má svá určitá specifika, z toho vyplývající řada výhod a nevýhod, viz. předcházející kapitoly. Je nezbytné, aby byla dodržena určitá pravidla, např. volba vhodného přídavného materiálu na určený materiál základní. Zároveň je zapotřebí vědět, zda se jedná o renovaci, opravu či vytvoření speciálních funkčních vrstev. To vše dle požadavků zákazníků. Z toho dále vyplývá i to nejzákladnější, tzn. volba vlastní metody navařování (el. obloukem, laserem, el. svazkem, plazmou) s přihlédnutím k ekonomickým možnostem.

V dalších kapitolách jsou popsány dvě metody navařování a to navařování plazmou a el. svazkem.

Navařené hotové vzorky byly broušeny a připraveny pro následné pozorování a vyhodnocení v metalografické laboratoři na Ústavu materiálových věd a inženýrství, FSI VUT v Brně. Vzorky byly pozorovány a hodnoceny za pomoci stereomikroskopu SZ61-TR a světelného mikroskopu Olympus GX-51. Výsledné hodnoty byly zapsány do přehledných tabulek za použití MS Office Excel.

7.1 Navařování elektronovým svazkem

7.1.1 Popis navařovací aparatury

Navařování svazkem elektronů se prováděla na zařízení pro svařování a povrchové tepelné zpracování PROBEAM K26. PROBEAM K26 je systém s univerzální vakuovou komorou s víceosým numericky řízeným polohovacím systémem, s elektronovým dělem umožňujícím horizontální i vertikální navařování. Tento systém je osazen manipulátorem pro podávání drátu do prostoru návaru. Aparatura disponuje vakuovou komorou o objemu 2,6 m³, která obsahuje průchodky pro přívod procesních i inertních plynů, chladicí vody a případné osazení dalších přídavných přístrojů a zařízení. Celé zařízení je ovládáno řídicím systémem Siemens Sinumerik. V možnostech zařízení je svařování běžných (oceli) i reaktivních (titan zirkon) kovů, včetně svařování dvojic materiálů jinak nesvařitelných (heterogenní svary), viz. obr. 8.1-8.14. Dále zařízení umožňuje tepelné zpracování povrchu včetně kalení vnitřním odvodem tepla, přetavování povrchu, legování povrchové vrstvy a vytváření návarů z běžných i speciálních materiálů. Zdroj vysokého napětí 60-150kV, 0.1-100mA (15kW max. výkon svazku). Možnost soustředit výkon do bodu o průměru 50μm.

Technická specifikace:

Objem komory: 2,6m³

Rozměry pracovního stolu: 500 x 800 mm

Max výška: 700 mm

Pohyby v osách x, y: 500 x 800 mm

Max. výkon svazku: 15kW

Urychlovací napětí: 80 až 150 kV

Vakuum: 10-4 mBar

Polohovací zařízení:

Náklon od 0 do +90°

Rotace kolem osy kolmé na osu náklonu až 100 ot.min-1

Umístění zařízení:

NETME centre, budova D5, laboratoř 112

Ústav materiálových věd a inženýrství

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Technická 2896/2, 616 69 Brno

Česká Republika



Obr. 8.1



Obr. 8.2



Obr. 8.3



Obr. 8.4



Obr. 8.5



Obr. 8.6



Obr. 8.7



Obr. 8.8



Obr. 8.9



Obr. 8.10



Obr. 8.11



Obr. 8.12



Obr. 8.13



Obr. 8.14

- Obr. 8.1 - schéma celého zařízení EB,
Obr. 8.2 - řídicí systém,
Obr. 8.3 - řídicí systém mechanických posuvů - Siemens Sinumerik,
Obr. 8.4 - řídicí systém magnetického vychylování svazku,
Obr. 8.5 - vakuová komora,
Obr. 8.6 - PC a manuální ovládání EB,
Obr. 8.7 - Obr. 8.9 - celkový pohled na aparaturu EB,
Obr. 8.10 - dvoustupňový čerpací systém EB děla,
Obr. 8.11 - horní část elektronového děla,
Obr. 8.12 - Obr. 8.13 - dvoustupňový čerpací systém pro komoru z
turbomolekulární a suché šroubové vývěvy,
Obr. 8.14 - vakuová komora.

7.1.2 Popis experimentu

Touto metodou bylo zhotoveno 5 návarů o různých navařovacích parametrech na totožný základní materiál **austenitická nerez ocel 17 240, DIN zn. X2CrNi1810** za použití totožného přídatného materiálu **ocelový nepoměděný svařovací drát ϕ 1,2mm ESAB OK AristoRod 12.50**.

Volba přídatného materiálu, tedy materiálu značně kvalitativně horšího než základního **není pro průmyslovou běžná** (přídatný materiál musí být vždy lepší nebo alespoň stejné kvality jako základní). Pro účely našeho experimentu byla ale zvolena uhlíková ocel pro dobrý kontrast při makroskopickém hodnocení závaru a zředění.

Parametry navařování (konstantní pro všechny návary):

Tvar paprsku: linka délky 3mm kolmo na svar,

Oscilační frekvence: 600Hz,

Napětí 120kV, proud svazku 25mA.

Zbývající parametry: rychlost navařování a rychlost posuvu drátu se měnily, viz. tab. 8.1. 4. návar byl proveden opačným směrem a 5. návar byl vrstvený do trojúhelníku.

Tab. 8.1 Navařovací parametry pro navařování svazkem elektronů

	oscil. frekv.	napětí	proud svazku	svař.rychlost	posuv drátu
č. náv.	[Hz]	[kV]	[mA]	[mm/s]	[m/min]
1	600	120	25	10	3
2	600	120	25	14	6
3	600	120	25	20	4
4 (obr)	600	120	25	20	3
5 (troj)	600	120	25	20	4

Bylo zjištěno následující:

Po provedení experimentu byla provedena vizuální kontrola návarů. Všechny návary byly na povrchu bez výraznějších poruch, bez zápalů. Návarové housenky byly homogenní, bez vrubů, ve stejné výšce a šířce, plně vyplněné návarovou hmotou. Potom byl udělán výbrus a vzorky byly zkoumány pod mikroskopem, viz. obr. 8.15 - 8.22. Na řezech nebyly zjištěny žádné vážné vady návaru. Návar byl bez pórů, dutin, vměstků. Na okrajích byly jasně patrné oblasti tepelně ovlivněné oblasti-TOO (velice tenká obalová křivka kolem návaru v základním materiálu). Průnik, resp. průvar přídatného materiálu do základního byl cca 50%. Příčina je v navařovacích parametrech. Výsledkem je velké množství nataveného kovu základního materiálu v návarovém kovu. To by v běžném případě, tedy při použití funkčního tvrdšího materiálu, znamenalo snížení výsledné tvrdosti návaru.

7.1.3 Výkonové a technologické hodnoty návarů

Dále byly spočteny výkonové a technologické hodnoty všech návarů. Hodnoty napětí $U = 120$ kV a proudu $I = 25$ mA byly u všech návarů stejné. Hmotnost navařeného kovu G_n byla spočtena na 1 m délky návaru. Plocha návaru nad základním materiálem Z byla odhadnuta jako polovina plochy elipsy. Příklad výpočtu pro návar č. 2.

1) Hmotnost navařeného kovu na 1m délky návaru:

$$G_n = Z \cdot 1 \cdot \rho \quad [kg \cdot m^{-1}] \quad (8.1)$$

kde: G_n [kg] - hmotnost navařeného kovu na 1 metr délky návaru
 Z [m²] - plocha návaru nad základním materiálem,
 ρ [kg.m⁻³] - hustota přídavného materiálu (7850 kg.m⁻³).

Výpočet pro návar č. 2:

$$G_n = Z \cdot 1 \cdot \rho = 1,161 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 7850 = 0,0911 \text{ kg}$$

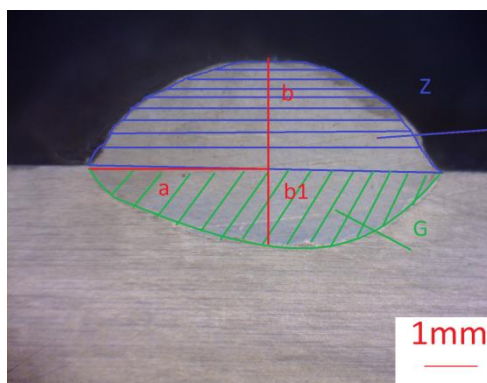
kde: Z [m²] - plocha návaru nad základním materiálem,
 ρ [kg.m⁻³] - hustota přídavného materiálu.

2) Výpočet Z např. u návaru č. 2:

$$Z = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{2} \quad [mm^2] \quad (8.2)$$

kde: Z [mm²] - plocha návaru nad základním materiálem,
 a [mm] - hlavní poloosa,
 b [mm] - vedlejší poloosa.

$$Z = \frac{\pi \cdot 3,33 \cdot 2,22}{2} = 11,61 \text{ mm}^2 = 1,161 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$



Obr. 8.15 Návar č. 2-řez s plochami

3) Výkon navaření na 1m návaru:

$$P_n = \frac{G_n \cdot 1000}{t_t} \cdot 60 \quad [g \cdot \min^{-1}] \quad (8.3)$$

kde: P_n [$g \cdot \min^{-1}$] - výkon navaření,
 G_n [kg] - hmotnost navařeného kovu.
 t_t [s] - doba navařování 1m návaru

$$t_t = \frac{1 \cdot 1000}{v_s} \quad [s]$$

Výpočet pro návar č. 2:

$$P_n = \frac{0,0911 \cdot 1000}{71,4} \cdot 60 = 76,54 \, g \cdot \min^{-1}$$

$$t_t = \frac{1 \cdot 1000}{v_s} = \frac{1 \cdot 1000}{14} = 71,4 \, s$$

v_s [$mm \cdot s^{-1}$] - rychlost svařování

4) Měrná spotřeba energie:

$$N_n = \frac{U \cdot I \cdot t_t}{3600 \cdot G_n} \quad [Wh \cdot kg^{-1}] \quad (8.4)$$

kde: N_n [$kWh \cdot kg^{-1}$] - měrná spotřeba energie,
 U [V] - napětí na svorkách,
 I [A] - svařovací proud.

Výpočet pro návar č. 2:

$$N_n = \frac{120000 \cdot 0,025 \cdot 71,4}{3600 \cdot 0,0911} = 653,13 \, Wh \cdot kg^{-1}$$

5) specifický tepelný příkon:

$$Q_s = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{1000 \cdot v_s} \quad [kJ \cdot mm^{-1}] \quad (8.5)$$

kde: Q_s [$kJ \cdot mm^{-1}$] - specifický tepelný příkon,
 η [-] - účinnost metody navařování,
 v_s [$mm \cdot s^{-1}$] - rychlost svařování.

Výpočet pro návar č. 2:

$$Q_s = \frac{120000 \cdot 0,025 \cdot 1}{1000 \cdot 14} = 0,2143 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

5) zředění svarového, návarového kovu:

$$V = \frac{G}{G + Z} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8.6)$$

kde: $G [\text{mm}^2]$ - plocha roztaveného základního materiálu,
 $Z [\text{mm}^2]$ - plocha návarového materiálu.

Výpočet pro návar č. 2:

$$V = \frac{9}{9 + 11,61} \cdot 100 = 43,67 \%$$

$$G = \frac{\pi \cdot a \cdot b1}{2} \quad [\text{mm}^2] \quad (8.7)$$

kde: $Z [\text{mm}^2]$ - plocha návaru nad základním materiálem,
 $a [\text{mm}]$ - hlavní poloosa,
 $b1 [\text{mm}]$ - vedlejší spodní poloosa.

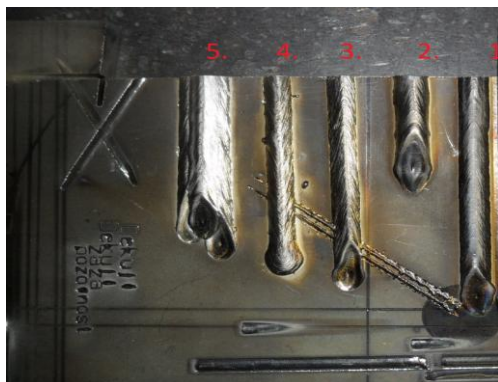
$$G = \frac{\pi \cdot 3,33 \cdot 1,72}{2} = 9 \text{ mm}^2$$

Vypočtené hodnoty byly dány do přehledné tabulky, viz. tab. 8.2.

Tab. 8.2 Vypočtené výkonové a technologické hodnoty návarů EBC

veličina EBC	označení	jednotka	návar č. 1	návar č. 2	návar č. 3	návar č. 4	návar č. 5
a poloosa	a	[mm]	2,7700	3,3300	2,6100	2,5000	2,5000
b poloosa	b	[mm]	1,3300	2,2200	1,0000	1,3880	1,3888
b1 poloosa	b1	[mm]	1,6600	1,7200	2,2700	1,8800	1,6600
Z plocha	Z	[mm ²]	5,7840	11,6064	4,0977	5,4479	16,3531
G plocha	G	[mm ²]	7,2192	8,9923	9,3018	7,3790	13,0310
hustota příd. mater.	ρ	[kg.m ⁻³]	7850,0000	7850,0000	7850,0000	7850,0000	7850,0000
rychlost navařování	v_s	[mm.s ⁻¹]	10,0000	14,0000	20,0000	20,0000	20,0000
napětí	U	[kV]	120,0000	120,0000	120,0000	120,0000	120,0000
proud	I	[mA]	25,0000	25,0000	25,0000	25,0000	25,0000
účinnost	η	[-]	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
doba navařování 1m	t_t	[s]	100,0000	71,4286	50,0000	50,0000	150,0000
hmot. navař. kovu	G_n	[kg]	0,0454	0,0911	0,0322	0,0428	0,1284
výkon navaření	P_n	[g.min ⁻¹]	27,2428	76,5325	38,6003	51,3192	51,3488
měr. spotřeba energie	N_n	[Wh.kg ⁻¹]	1835,3464	653,3174	1295,3256	974,2939	973,7327
součinitel navaření	α_n	[g.A ⁻¹ .min ⁻¹]	PLC	PLC	PLC	PLC	PLC
spec. tepel. výkon	Q_s	[kJ.mm ⁻¹]	0,3000	0,2143	0,1500	0,1500	0,1500
zředění	V	%	55,5184	43,6548	69,4190	57,5275	44,3471

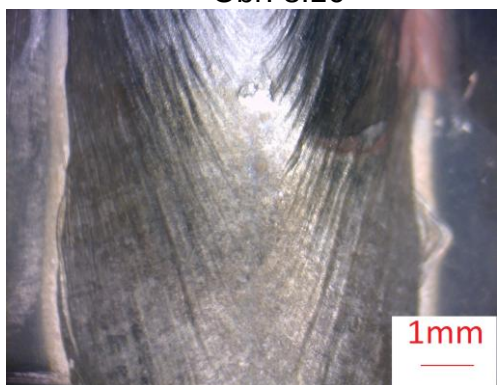
7.1.4 Obrazová dokumentace



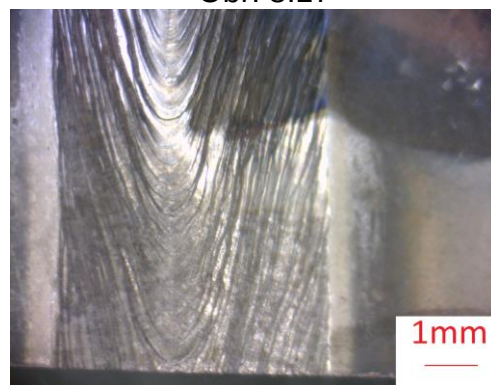
Obr. 8.16



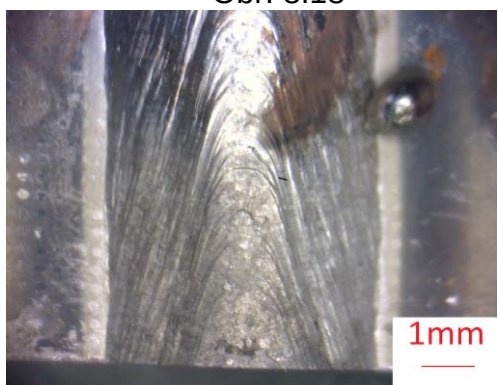
Obr. 8.17



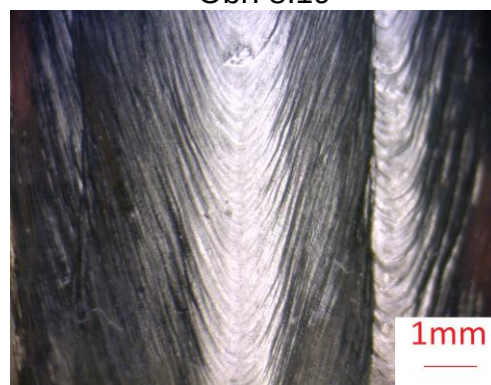
Obr. 8.18



Obr. 8.19



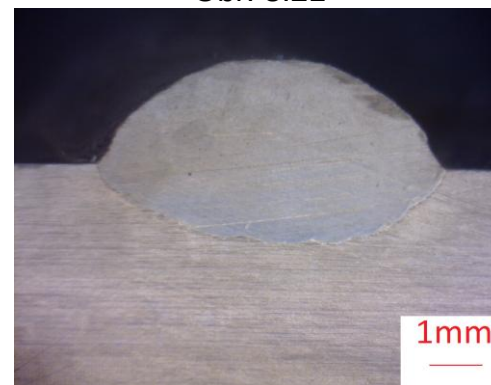
Obr. 8.20



Obr. 8.21



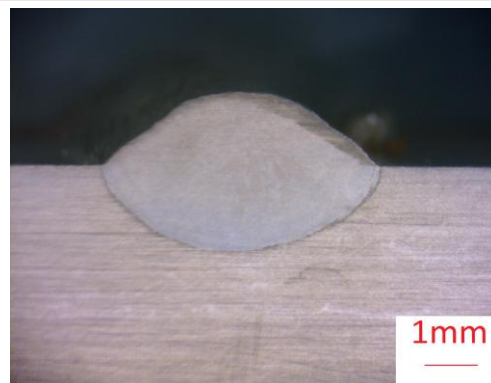
Obr. 8.22



Obr. 8.23



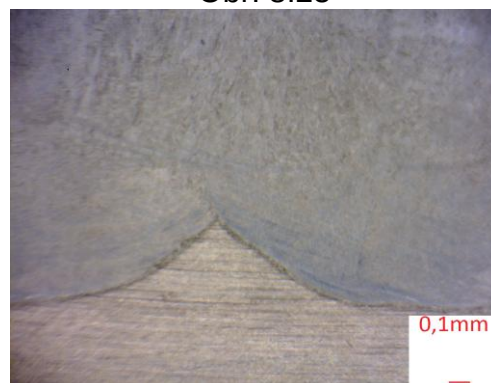
Obr. 8.24



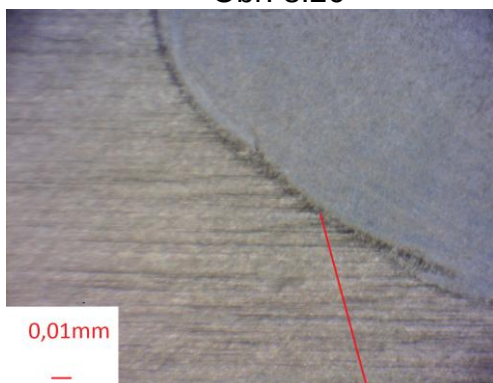
Obr. 8.25



Obr. 8.26



Obr. 8.27



Obr. 8.28

Obr. 8.16 - všechny návary na základním materiálu,
Obr. 8.1 - 8.21 - povrch návaru č. 1-5, zvětšeno 10x,
Obr. 8.22 - 8.26 - řez návaru č. 1-5, zvětšeno 10x,
Obr. 8.27 - řez návaru č. 5 zvětšeno 20x,
Obr. 8.28 - řez návaru č. 5 zvětšeno 50x.

7.2 Navařování plazmou

7.2.1 Popis navařovací aparatury

Pro navařování plazmou byl použit plazmový navařovací automat fy Blumenbecker, a.s. Praha s označením **KR 5 ARC** s nosností zátěže 5 kg. Má 6 os volnosti a dosahuje opakovatelné přesnosti $\leq \pm 0,04\text{mm}$. Plazmové zařízení tvoří:

- plazmový modul Plasma Modul FPM,
- svařovací zdroj TransPuls Synergic 4000,
- podavač drátu VR 7000,
- plazmový strojní hořák PTW 1500,
- přívod studeného drátu WIG Roboter Drivezdrojem fy. Fronius.

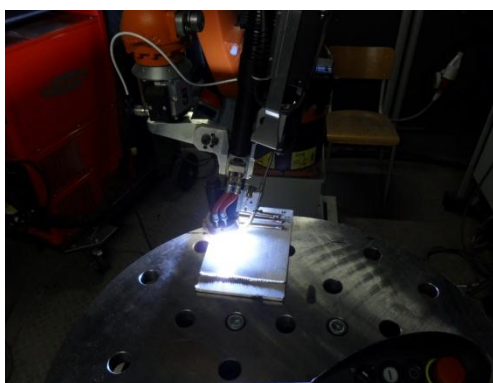
Tento automat je umístěn v laboratoři plazmových nástřiků, odboru svařování a povrchových úprav ÚST FSI VUT Brno.



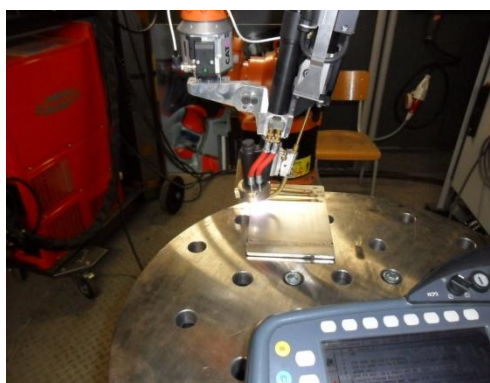
Obr. 8.29



Obr. 8.30



Obr. 8.31



Obr. 8.32

Obr. 8.29 - 8.32 - plazmový navařovací automat KR 5 ARC

Bylo provedeno 5 návarů na základní materiál **ocel 11 373, DIN zn. 8235JRG1** a 4 návary na základní materiál **nerez ocel 17 240, DIN zn. X5CrNi 1810, AISI 304**. Jako přídatný materiál byl ve všech případech použit **ocelový**

nízkolegovaný drát ϕ 1mm ESAB 13.31. Navařovací parametry viz. tab. 7.2. , 7.3.

Tab. 7.2 Navařovací parametry pro navařování plazmou (mat. ocel 11 737)

11 737	napětí	proud svazku	sv.rychlost	posuv drátu
č. návaru	[V]	[A]	[mm/s]	[m/min]
1	20	130	6,64	1,0
2	20	130	6,64	1,3
3	20	130	6,64	1,5
4 (osa)	20	130	6,64	1,5
5	20	130	6,64	nátav

Tab. 7.3 Navařovací parametry pro navařování plazmou (mat. nerez ocel)

nerez	napětí	proud svazku	sv.rychlost	posuv drátu
č. návaru	[V]	[A]	[mm/s]	[m/min]
1	20	130	6,64	1,5
2	20	130	6,64	1,3
3	20	130	6,64	1,3
4	20	130	6,64	1,7
5	20	130	6,64	1,8

Bylo zjištěno následující:

Návary na ocel 11373:

Po provedení experimentu byla stejně jako v prvním případě provedena vizuální kontrola návarů. Návar č. 5, resp. nátav bez přídavného materiálu vykazoval značné vady průběhu návaru (návar byl přerušovaný). U návarů č. 1 a 4 byl průběh plynulý, bez vrubů, s plynulým lineárním přesazením. U zbývajících návarů byly housenky přerušované, okraje rozřepené, v okolí kapky nataveného kovu. Potom byl udělán výbrus a vzorky byly zkoumány pod mikroskopem, viz. obr. 8.34 - 8.43. Na řezech nebyly zjištěny žádné vážné vady návaru. Návar byl bez pórů, dutin, vměstků. Na okrajích byly jasně patrné oblasti tepelně ovlivněné oblasti-TOO (cca řádově silnější obalová křivka kolem návaru v základním materiálu než při EBC). Průnik, resp. průvar přídavného materiálu do základního byl minimální ve srovnání s EBC, tzn. že smíšení návarového kovu se základním materiálem (zředění) bylo minimální, viz. tab.8.3.

Návary na nerez ocel:

I v tomto případě byla provedena vizuální kontrola návarů. Celkově se jevily všechny návary bez vážnějších vad. Na povrchu byly všechny zabavené ve spektru od modré po žlutou. Všechny návary, resp. návarové housenky byly

homogenní, bez pórů, dutin, vměstků, s minimální tepelně ovlivněnou oblastí na okrajích v řádech 0,1mm, podobně jako u EBC. Průnik, resp. průvar přídavného materiálu do základního byl minimální ve srovnání s EBC, tzn. že smíšení návarového kovu se základním materiálem bylo minimální, zředění bylo tedy minimální, viz. tab.8.4.

7.2.2 Výkonové a technologické hodnoty návarů

Kromě výpočtů uvedených v kapitole 8.1.2 u metody EBC se při navařování plazmou použije ještě jeden výpočet pro stanovení **součinitele navaření**, který se u EBC nepoužívá. Hodnoty napětí $U = 20 \text{ V}$ a proudu $I = 130 \text{ A}$ byly u všech návarů stejné.

1) Výpočet součinitele navaření:

$$\alpha_n = \frac{P_n}{I} \quad [g \cdot A^{-1} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (8.8)$$

kde: $\alpha_n [g \cdot A^{-1} \cdot \text{min}^{-1}]$ - součinitel navaření,
 $P_n [g \cdot \text{min}^{-1}]$ - výkon navaření,
 $I [A]$ - svařovací proud.

Výpočet pro návar č. 2 na základní materiál ocel 11 373:

$$\alpha_n = \frac{P_n}{I} = \frac{1,43}{130} = 0,011 \text{ g} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$$

Vypočtené hodnoty byly dány do přehledné tabulky, viz. tab. 8.3.

Tab. 8.3 Vypočtené výkonové a technologické hodnoty návarů na ocel 11373

veličina PLC 11373	označení	jednotka	návar č. 1	návar č. 2	návar č. 3	návar č. 4	návar č. 5
a poloosa	a	[mm]	1,9440	0,8330	1,9780	1,7500	1,2500
b poloosa	b	[mm]	0,4400	0,3500	1,1100	1,0000	0,2770
b1 poloosa	b1	[mm]	0,5000	0,2100	0,8000	0,3000	0,2200
Z plocha	Z	[mm ²]	1,3429	0,4577	3,4471	2,7475	0,5436
G plocha	G	[mm ²]	1,5260	0,2746	2,4844	0,8243	0,4318
hustota příd. mater.	ρ	[kg.m ⁻³]	7850,0000	7850,0000	7850,0000	7850,0000	7850,0000
rychlost navařování	v_s	[mm.s ⁻¹]	6,6400	6,6400	6,6400	6,6400	6,6400
napětí	U	[V]	20,0000	20,0000	20,0000	20,0000	20,0000
proud	I	[A]	130,0000	130,0000	130,0000	130,0000	130,0000
účinnost	η	[-]	0,7000	0,7000	0,7000	0,7000	0,7000
doba navařování 1m	t_t	[s]	150,6024	150,6024	150,6024	150,6024	150,6024
hmot. navař. kovu	G_n	[kg]	0,0105	0,0036	0,0271	0,0216	0,0043
výkon navaření	P_n	[g.min ⁻¹]	4,1999	1,4315	10,7805	8,5926	1,7001
měr. spotřeba energie	N_n	[Wh.kg ⁻¹]	10317,7386	30270,5570	4019,6125	5043,0748	25488,4647
součinitel navaření	α_n	[g.A ⁻¹ .min ⁻¹]	0,0323	0,0110	0,0829	0,0661	0,0131
spec. tepel. výkon	Q_s	[kJ.mm ⁻¹]	0,2741	0,2741	0,2741	0,2741	0,2741
zředění	V	%	53,1915	37,5000	41,8848	23,0769	44,2656

Tab. 8.4 Vypočtené výkonové a technologické hodnoty návarů na nerez ocel

veličina PLC nerez	označení	jednotka	návar č. 1	návar č. 2	návar č. 3	návar č. 4
a poloosa	a	[mm]	2,5000	2,2500	2,6100	2,3750
b poloosa	b	[mm]	0,9000	0,9000	0,8300	1,0000
b1 poloosa	b1	[mm]	0,5000	0,5000	1,0000	0,5000
Z plocha	Z	[mm ²]	3,5325	3,1793	6,8022	3,7288
G plocha	G	[mm ²]	1,9625	1,7663	8,1954	1,8644
hustota příd. mater.	ρ	[kg.m ⁻³]	7850,0000	7850,0000	7850,0000	7850,0000
rychlost navařování	v_s	[mm.s ⁻¹]	6,6400	6,6400	6,6400	6,6400
napětí	U	[V]	20,0000	20,0000	20,0000	20,0000
proud	I	[A]	130,0000	130,0000	130,0000	130,0000
účinnost	η	[-]	0,7000	0,7000	0,7000	0,7000
doba navařování 1m	t_t	[s]	150,6024	150,6024	150,6024	150,6024
hmot. navař. kovu	G_n	[kg]	0,0277	0,0250	0,0534	0,0293
výkon navaření	P_n	[g.min ⁻¹]	11,0477	9,9429	21,2734	11,6614
měr. spotřeba energie	N_n	[Wh.kg ⁻¹]	3922,3915	4358,2128	2036,9711	3715,9499
součinitel navaření	α_n	[g.A ⁻¹ .min ⁻¹]	0,0850	0,0765	0,1636	0,0897
spec. tepel. výkon	Q_s	[kJ.mm ⁻¹]	0,2741	0,2741	0,2741	0,2741
žředění	V	%	35,7143	35,7143	54,6448	33,3333

7.2.3 Obrazová dokumentace



Obr. 8.33



Obr. 8.34



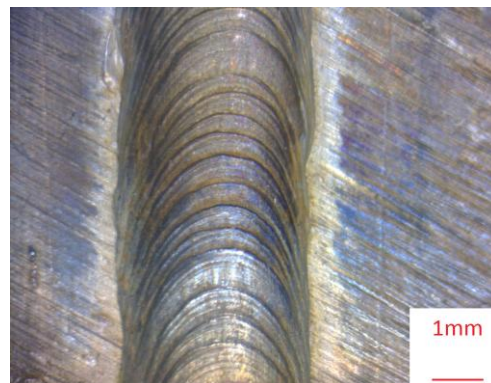
Obr. 8.35



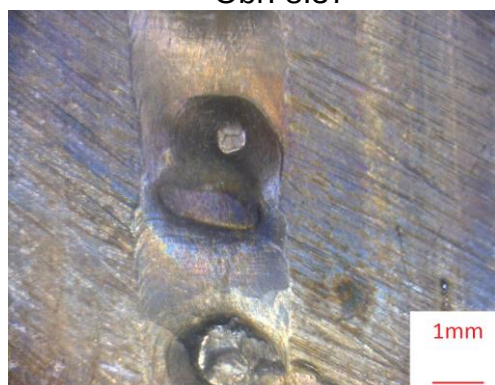
Obr. 8.36



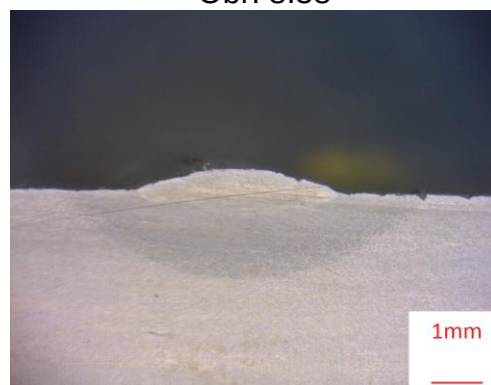
Obr. 8.37



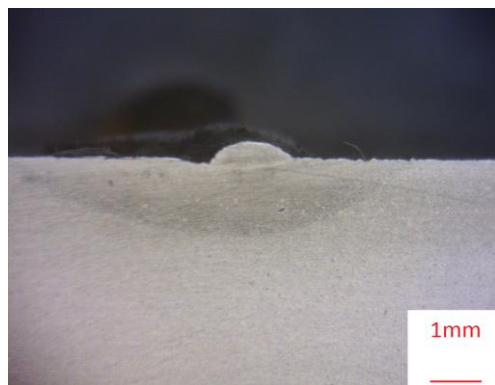
Obr. 8.38



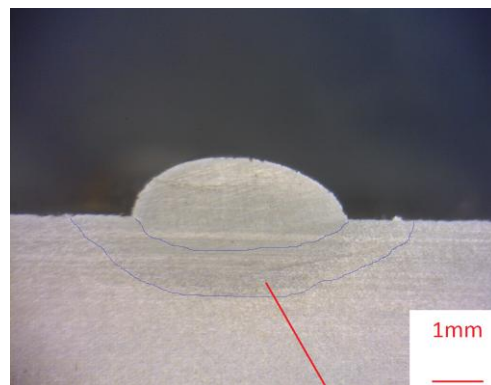
Obr. 8.39



Obr. 8.40



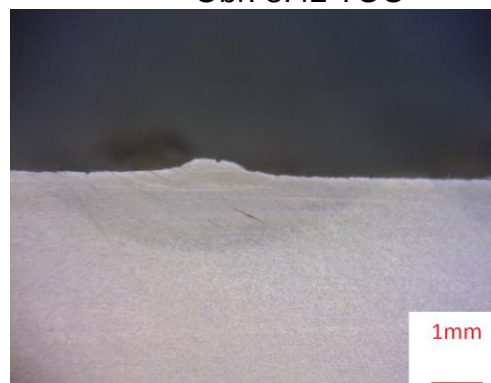
Obr. 8.41



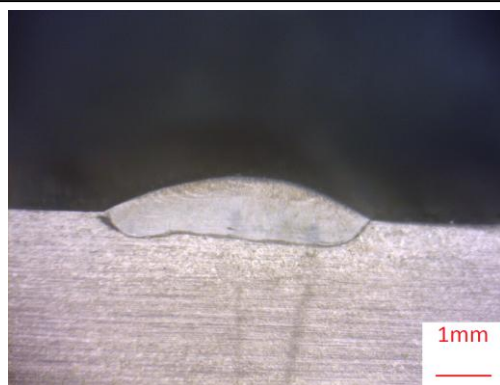
Obr. 8.42 TOO



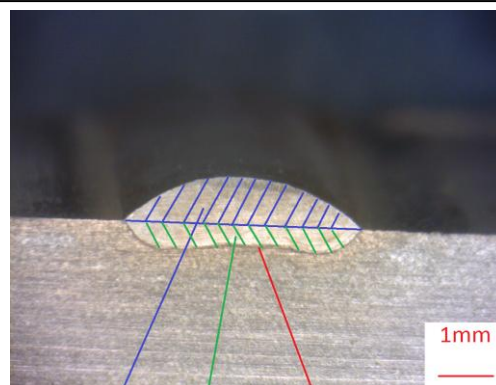
Obr. 8.43



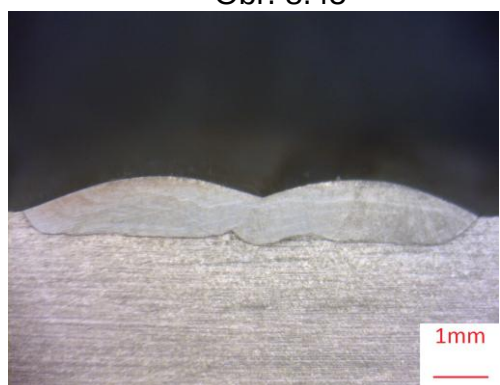
Obr. 8.44



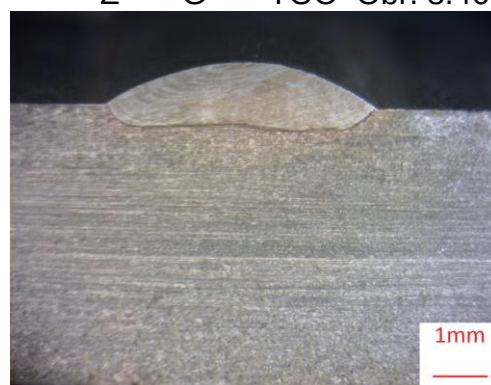
Obr. 8.45



Z G TOO Obr. 8.46



Obr. 8.47



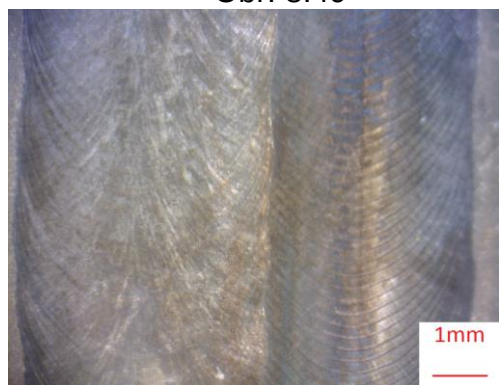
Obr. 8.48



Obr. 8.49



Obr. 8.50



Obr. 8.51



Obr. 8.52

Obr. 8.33 - všechny návary na základním materiálu 11373,
Obr. 8.34 - všechny návary na základním materiálu nerez ocel,
Obr. 8.35 - 8.39 - povrch návaru č. 1-5 na materiálu 11373, zvětšeno 10x,
Obr. 8.40 - 8.44 - řez návaru č. 1-5 na materiálu 11373, zvětšeno 10x,
Obr. 8.45 - 8.48 - řez návaru č. 1-4 na materiálu nerez ocel,
Obr. 8.49 - 8.52 - povrch návaru č. 1-4 na materiálu nerez ocel.

8 TECHNICKO EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Na závěr práce přichází na řadu technicko ekonomické porovnání obou metod navařování. Při operacích svařování a navařování se v praxi běžně používá stanovení **nákladů na vytvoření 1m svaru**, resp. návaru pro konkrétní materiál. V hodnocení byly brány v úvahu ceny materiálu zjištěné na internetových portálech prodejců, tedy ceny orientační. Konkrétní ceny pro firmy v rámci dodavatelsko odběratelských vztahů se mohou a jistě i budou lišit. Rovněž tak nákladové ceny na 1 hod. práce na plazmovém navařovacím robotu a na EBC jsou velice orientační a nemusí odrážet reálnou hodnotu. Důvodem je různá pořizovací cena obou zařízení (zvláště EBC) a různě stanovené ROI (koeficienty návratnosti kapitálu), různé fixní náklady (pronájmy budov, strojů, pojištění, apod.)

8.1 Výpočty spotřeby času a materiálu

Pro výpočet nákladů na 1 m návaru byly postupně stanoveny tyto výpočty:

1) Objem návaru na 1 m svaru:

$$V_n = \frac{S_n}{1 \cdot 10^6} \quad [m^3] \quad (9.1)$$

kde: $V_n [m^3]$ - objem návaru,
 $S_n [mm^2]$ - plocha návaru.

2) Spotřeba přídavného materiálu na 1 metr svaru:

$$Sp_d = V_n \cdot \rho \quad [kg \cdot m^{-1}] \quad (9.2)$$

kde: $Sp_d [kg \cdot m^{-1}]$ - spotřeba přídavného materiálu,
 $\rho [kg \cdot m^{-3}]$ - hustota přídavného materiálu.

3) Náklady na přídavný materiál na 1 metr svaru:

$$N_m = Sp_d \cdot C_d \quad [K\check{c} \cdot m^{-1}] \quad (9.3)$$

kde: $N_m [K\check{c} \cdot m^{-1}]$ - náklady na přídavný materiál na 1 metr,
 $C_d [K\check{c} \cdot kg^{-1}]$ - cena přídavného materiálu na 1 kg.

4) Spotřeba plynu na 1 metr svaru:

$$Sp_{pl} = \frac{q_{pl}}{v_s} \quad [l \cdot m^{-1}] \quad (9.4)$$

kde: $Sp_{pl} [l \cdot m^{-1}]$ - spotřeba plynu na 1 metr svaru,
 $q_{pl} [l \cdot min^{-1}]$ - průtok ochranného plynu,
 $v_s [m \cdot min^{-1}]$ - rychlost svařování.

5) Náklady na ochranný plyn na 1 metr svaru:

$$N_{pl} = \frac{Sp_{pl} \cdot C_{pl}}{1 \cdot 10^3} \quad [K\check{c} \cdot m^{-1}] \quad (9.5)$$

kde: $N_{pl} [K\check{c} \cdot m^{-1}]$ - náklady na ochranný plyn na 1 metr svaru,
 $C_{pl} [K\check{c} \cdot l^{-1}]$ - cena ochranného plynu.

6) Čas potřebný na navaření 1m svaru:

$$t_s = \frac{1}{v_s} \quad [min \cdot m^{-1}] \quad (9.6)$$

kde: $t_s [min \cdot m^{-1}]$ - čas na navaření 1m svaru.

7) Pracovní náklady na 1 metr svaru:

$$N_{pr} = \frac{t_s \cdot N_h}{60} \quad [K\check{c} \cdot m^{-1}] \quad (9.7)$$

kde: $N_{pr} [K\check{c} \cdot m^{-1}]$ - pracovní náklady na 1 metr svaru,
 $N_h [K\check{c} \cdot hod^{-1}]$ - hodinové pracovní náklady.

8) Celkové náklady na 1 metr svaru:

$$N = N_m + N_{pl} + N_{pr} \quad [K\check{c} \cdot m^{-1}] \quad (9.8)$$

kde: $N [K\check{c} \cdot m^{-1}]$ - celkové náklady na 1 metr svaru

Tab. 9.1 Náklady na 1 metr návaru pro navařování EBC

veličina náklady EBC	označení	jednotka	návar č. 1	návar č. 2	návar č. 3	návar č. 4	návar č. 5
a poloosa	a	[mm]	2,7700	3,3300	2,6100	2,5000	2,5000
b poloosa	b	[mm]	1,3300	2,2200	1,0000	1,3880	1,3888
S_n plocha	S_n	[mm ²]	5,7840	11,6064	4,0977	5,4479	16,3531
hustota příd. mater.	ρ	[kg.m ⁻³]	7850,0000	7850,0000	7850,0000	7850,0000	7850,0000
rychlost navařování	v_s	[mm.s ⁻¹]	10,0000	14,0000	20,0000	20,0000	20,0000
dobu navařování 1m	t_t	[s]	100,0000	71,4286	50,0000	50,0000	150,0000
hmot. navař. kovu	S_{pd}	[kg.m ⁻¹]	0,0454	0,0911	0,0322	0,0428	0,1284
náklady na navař. kov	N_m	[Kč.m ⁻¹]	2,6185	5,2543	1,8551	2,4663	7,4032
cena navař. kovu	C_d	[Kč.kg ⁻¹]	57,6700	57,6700	57,6700	57,6700	57,6700
pracovní náklady	N_{pr}	[Kč.m ⁻¹]	55,5556	39,6825	27,7778	27,7778	83,3333
hodin. prac. náklady	N_h	[Kč.hod ⁻¹]	2000,0000	2000,0000	2000,0000	2000,0000	2000,0000
celk. výrob. náklady	N	[Kč.m ⁻¹]	58,1740	44,9369	29,6328	30,2441	90,7365

Tab. 9.2 Náklady na 1 metr návaru pro navařování PLC ocel 11373

veličina náklady 11373	označení	jednotka	návar č. 1	návar č. 2	návar č. 3	návar č. 4	návar č. 5
a poloosa	a	[mm]	1,9440	0,8330	1,9780	1,7500	1,2500
b poloosa	b	[mm]	0,4400	0,3500	1,1100	1,0000	0,2770
S_n plocha	S_n	[mm ²]	1,3429	0,4577	3,4471	2,7475	0,5436
hustota příd. mater.	ρ	[kg.m ⁻³]	7850,0000	7850,0000	7850,0000	7850,0000	7850,0000
rychlost navařování	v_s	[mm.s ⁻¹]	6,6400	6,6400	6,6400	6,6400	6,6400
dobu navařování 1m	t_t	[s]	150,6024	150,6024	150,6024	150,6024	150,6024
hmot. navař. kovu	S_{pd}	[kg.m ⁻¹]	0,0105	0,0036	0,0271	0,0216	0,0043
náklady na navař. kov	N_m	[Kč.m ⁻¹]	0,6080	0,2072	1,5605	1,2438	0,2461
cena navař. kovu	C_d	[Kč.kg ⁻¹]	57,6700	57,6700	57,6700	57,6700	57,6700
spotřeba plynu	S_{pl}	[l.m ⁻¹]	45,1807	45,1807	45,1807	45,1807	45,1807
průtok plynu	q_{pl}	[l.m ⁻¹]	18,0000	18,0000	18,0000	18,0000	18,0000
cena ochran. plynu	C_{pl}	[Kč.m ⁻³]	355,0000	355,0000	355,0000	355,0000	355,0000
náklady na plyn	N_{pl}	[Kč.m ⁻¹]	16,0392	16,0392	16,0392	16,0392	16,0392
pracovní náklady	N_{pr}	[Kč.m ⁻¹]	62,7510	62,7510	62,7510	62,7510	62,7510
hodin. prac. náklady	N_h	[Kč.hod ⁻¹]	1500,0000	1500,0000	1500,0000	1500,0000	1500,0000
celk. výrob. náklady	N	[Kč.m ⁻¹]	79,3981	78,9974	80,3507	80,0340	79,0363

Tab. 9.3 Náklady na 1 metr návaru pro navařování PLC nerez ocel

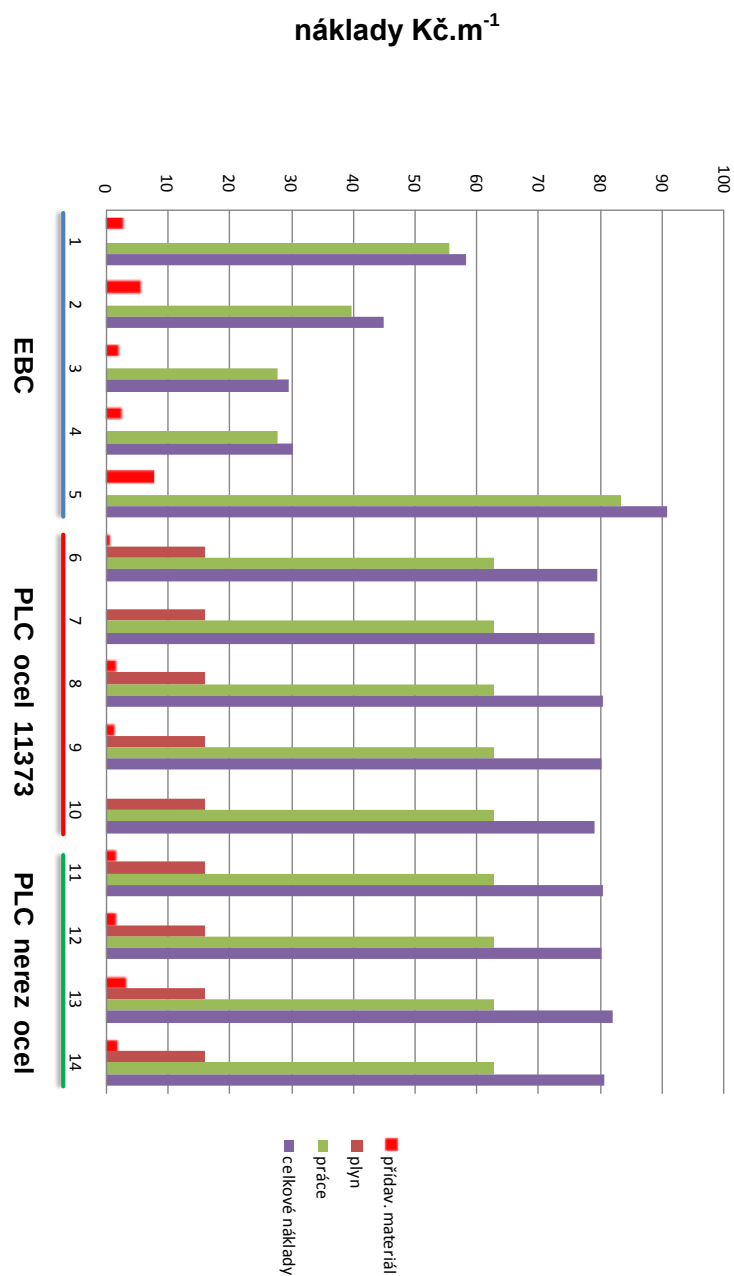
veličina náklady nerez	označení	jednotka	návar č. 1	návar č. 2	návar č. 3	návar č. 4
a poloosa	a	[mm]	2,5000	2,2500	2,6100	2,3750
b poloosa	b	[mm]	0,9000	0,9000	0,8300	1,0000
S_n plocha	S_n	[mm ²]	3,5325	3,1793	6,8022	3,7288
hustota příd. mater.	ρ	[kg.m ⁻³]	7850,0000	7850,0000	7850,0000	7850,0000
rychlost navařování	v_s	[mm.s ⁻¹]	6,6400	6,6400	6,6400	6,6400
doba navařování 1m	t_t	[s]	150,6024	150,6024	150,6024	150,6024
hmot. navař. kovu	S_{pd}	[kg.m ⁻¹]	0,0277	0,0250	0,0534	0,0293
náklady na navař. kov	N_m	[Kč.m ⁻¹]	1,5992	1,4393	3,0794	1,6880
cena navar. kovu	C_d	[Kč.kg ⁻¹]	57,6700	57,6700	57,6700	57,6700
spotřeba plynu	S_{pl}	[l.m ⁻¹]	45,1807	45,1807	45,1807	45,1807
průtok plynu	q_{pl}	[l.m ⁻¹]	18,0000	18,0000	18,0000	18,0000
cena ochran. plynu	C_{pl}	[Kč.m ⁻³]	355,0000	355,0000	355,0000	355,0000
náklady na plyn	N_{pl}	[Kč.m ⁻¹]	16,0392	16,0392	16,0392	16,0392
pracovní náklady	N_{pr}	[Kč.m ⁻¹]	62,7510	62,7510	62,7510	62,7510
hodin. prac. náklady	N_h	[Kč.hod ⁻¹]	1500,0000	1500,0000	1500,0000	1500,0000
celk. výrobn. náklady	N	[Kč.m ⁻¹]	80,3894	80,2294	81,8696	80,4782

Tab. 9.4 Tabulka porovnání celkových nákladů na 1m návaru u obou metod

náklady			EBC				
nákl. položka	označení	jednotka	návar č. 1	návar č. 2	návar č. 3	návar č. 4	návar č. 5
hmot. navař. kovu	S _{pd}	[kg.m ⁻¹]	0,0454	0,0911	0,0322	0,0428	0,1284
náklady na navař. kov	N _m	[Kč.m ⁻¹]	2,6185	5,2543	1,8551	2,4663	7,4032
spotřeba plynu	S _{pl}	[l.m ⁻¹]	-	-	-	-	-
průtok plynu	q _{pl}	[l.m ⁻¹]	-	-	-	-	-
cena ochran. plynu	C _{pl}	[Kč.m ⁻³]	-	-	-	-	-
náklady na plyn	N _{pl}	[Kč.m ⁻¹]	-	-	-	-	-
hodin. prac. náklady	N _h	[Kč.hod ⁻¹]	2000,0000	2000,0000	2000,0000	2000,0000	2000,0000
pracovní náklady	N _{pr}	[Kč.m ⁻¹]	55,5556	39,6825	27,7778	27,7778	83,3333
celk. výrobn. náklady	N	[Kč.m⁻¹]	58,1740	44,9369	29,6328	30,2441	90,7365

PLC ocel 11373					PLC nerez ocel			
návar č. 1	návar č. 2	návar č. 3	návar č. 4	návar č. 5	návar č. 1	návar č. 2	návar č. 3	návar č. 4
0,0105	0,0036	0,0271	0,0216	0,0043	0,0277	0,0250	0,0534	0,0293
0,6080	0,2072	1,5605	1,2438	0,2461	1,5992	1,4393	3,0794	1,6880
45,1807	45,1807	45,1807	45,1807	45,1807	45,1807	45,1807	45,1807	45,1807
18,0000	18,0000	18,0000	18,0000	18,0000	18,0000	18,0000	18,0000	18,0000
355,0000	355,0000	355,0000	355,0000	355,0000	355,0000	355,0000	355,0000	355,0000
16,0392	16,0392	16,0392	16,0392	16,0392	16,0392	16,0392	16,0392	16,0392
1500,0000	1500,0000	1500,0000	1500,0000	1500,0000	1500,0000	1500,0000	1500,0000	1500,0000
62,7510	62,7510	62,7510	62,7510	62,7510	62,7510	62,7510	62,7510	62,7510
79,3981	78,9974	80,3507	80,0340	79,0363	80,3894	80,2294	81,8696	80,4782

Graf 9.1 Porovnání celkových nákladů u obou metod navařování



9 ZÁVĚR

V teoretické části této diplomové práce byly po provedení důkladné rešerše popsány základní způsoby navařování speciálními metodami tavného svařování, t.j. navařování laserem, plazmou a v neposlední řadě svazkem elektronů. Byly popsány principy, výhody, nevýhody, postupy a využití těchto metod. V rámci této části práce byly popsány dva experimenty, které byly provedeny na ósacké univerzitě. V těchto experimentech se prováděly návary svazkem elektronů a byla zkoumána souvislost mezi nastavením svařovacích, resp. navařovacích parametrů (proud el. svazku, rychlost navařování, množství a rychlost přídavného materiálu-prášku) a vlastnostmi vzniklého návaru.

V prvním experimentu bylo zjištěno, že oba faktory elektronového navařování navařovací proud a rychlost navařování jsou významnými činiteli pro budoucí kvalitu návarové vrstvy. S nízkou hodnotou navařovacího proudu a rychlosti navařování byly v na povrchu návaru zjištěny neroztavené částice. Naopak s přibývajícím hodnotou navařovacího proudu a rychlosti navařování se uprostřed návarové vrstvy utvořil nepravidelný vrchol a byly zde zjištěny i částice základního materiálu-substrátu. To způsobilo snížení tvrdosti a odolnosti proti erozi.

V druhém experimentu byl zkoumán vliv nastavení navařovacích podmínek a poměru navařovacího materiálu - prášku WC-12%Co a Ni samotavicí slitina na vlastnosti vzniklého návaru. Bylo zjištěno, že s rostoucím poměrem WC-Co/Ni roste i tvrdost a odolnost proti abrazi. Rovněž však stejně tak klesá i korozivzdornost. Je to způsobeno tím, že s rostoucím poměrem WC-Co/Ni je požadováno i navýšení rychlosti navařování a navařovacího proudu. Tím dochází k navýšení vneseného měrného tepla do substrátu a k jeho natavení a vnesení jeho částic do návaru. Částice Fe byly zjištěny v návarové vrstvě a právě ty způsobily zvýšenou korozi. Tento problém byl vyřešen tak, že byl proveden návar dvou vrstev WC-Co/Ni a to nejprve s poměrem 20% a následně 60%. První vrstva návaru s poměrem 20% zajistila minimální vnesení částic substrátu do návaru a tím i dostatečnou odolnost proti korozi. Druhá návarová vrstva 60% byla nanášena na první a zajistila tomuto dvouvrstvému návaru dostatečnou tvrdost.

V praktické část této práce byl proveden a popsán vlastní experiment navařování svazkem elektronů a plazmou, který se prováděl jednak na pracovišti NETME centru, Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně - navařování svazkem elektronů (EBC) a v laboratoři plazmových nástřiků, odboru svařování a povrchových úprav ÚST FSI VUT Brno - navařování plazmou (PLC). Navařené hotové vzorky byly broušeny a připraveny pro následné pozorování a vyhodnocení v metalografické laboratoři na Ústavu materiálových věd a inženýrství, FSI VUT v Brně.

V případě EBC bylo zhotoveno 5 návarů na základní materiál austenitická nerez ocel 17 240, DIN zn. X2CrNi1810 za použití přídavného materiálu ocelový nepomědřený svařovací drát ϕ 1,2mm ESAB OK AristoRod 12.50. Úmyslné použití uhlíkové oceli pro kontrastní rozlišení návar- základní materiál. Vzhled návarů byl v normě bez výraznějších poruch, bez zápalů. Na okrajích byly jasně patrné oblasti tepelně ovlivněné oblasti-TOO (velice tenká obalová křivka kolem návaru v základním materiálu). Průnik, resp. průvar přídavného materiálu do základního byl značný cca 50%. Příčina byla v navařovacích

parametrech. Výsledkem je velké množství nataveného kovu základního materiálu v návarovém kovu. To by v běžném případě, tedy při použití funkčního tvrdšího materiálu, znamenalo snížení výsledné tvrdosti návaru.

Následně byl proveden experiment navařování PLC, kde bylo provedeno 5 návarů na základní materiál ocel 11 373, DIN zn. 8235JRG1 a 4 návary na základní materiál nerez ocel 17 240, DIN zn. X5CrNi 1810, AISI 304. Jako přídatný materiál byl ve všech případech použit ocelový nízkolegovaný drát ϕ 1mm ESAB 13.31.

V prvním případě (ocel 11373) vykazovaly některé návary na povrchu značné vady průběhu návaru (návar byl přerušovaný). Na řezech nebyly zjištěny žádné vážné vady návaru. Na okrajích byly jasně patrné oblasti tepelně ovlivněné oblasti-TOO (cca řádově silnější obalová křivka kolem návaru v základním materiálu než při EBC). Průnik, resp. průvar přídatného materiálu do základního byl minimální ve srovnání s EBC, tzn. že smíšení návarového kovu se základním materiálem (zředění) bylo minimální.

V případě druhém (nerez ocel) byly návary bez vážnějších vad. Na povrchu byly všechny zabavené ve spektru od modré po žlutou. Všechny návary, resp. návarové housenky byly homogenní, bez pórů, dutin, vměstků, s minimální tepelně ovlivněnou oblastí na okrajích v řádech 0,1mm, podobně jako u EBC. Průnik, resp. průvar přídatného materiálu do základního byl také minimální ve srovnání s EBC.

V poslední části práce bylo provedeno technicko ekonomické zhodnocení obou zmíněných metod. Všechny vypočtené parametry byly zpracovány do přehledných tabulek a grafů.

Jako základní kritérium se v praxi běžně používá stanovení **nákladů na vytvoření 1m svaru**, resp. návaru pro konkrétní materiál. V hodnocení byly brány v úvahu ceny materiálu zjištěné na internetových portálech prodejců, tedy ceny orientační. Konkrétní ceny pro firmy v rámci dodavatelsko odběratelských vztahů se mohou a jistě i budou lišit. Rovněž tak nákladové ceny na 1 hod. práce na plazmovém navařovacím robotu a na EBC jsou velice orientační a nemusí odrážet reálnou hodnotu. Důvodem je různá pořizovací cena obou zařízení (zvláště EBC) a různě stanovené ROI (koeficienty návratnosti kapitálu), různé fixní náklady (pronájmy budov, strojů, pojištění, apod.). Jako neekonomičtější metoda se jeví návar. č. 3 EBC (sv. rychlost 20mm/s a rychlost podávání drátu 4m/min), ovšem tento návar měl největšího zředění v experimentu 69,4%. Obě veličiny mezi sebou nemají samozřejmě žádný vztah.

Obecně všechny návary EBC vyšly levněji než návary PLC. Náklady na přídatný materiál byly v průměru vyšší u EBC, náklady na práci a náklady na ochranný plyn byly vyšší u PLC. U EBC se ochranný plyn nepoužívá vůbec.

Zde bych mohl polemizovat o tom, co všechno je zahrnuto v ceně 2000 Kč/hod u EBC. Jsou to jen náklady čistě na vlastní provádění návaru se započítáním přiměřené míry zisku? Nutno uvážit, že vlastní příprava výroby může trvat i několik týdnů, příprava povrchů vyžaduje mnohdy další technologickou operaci na jiném stroji nebo dokonce strojích (soustruh, bruska, apod.). Samozřejmě je také důležité, zda se jedná o sériovou výrobu, kde se uplatní úspory z rozsahu výroby nebo kusovou-zakázkovou.

Také jedním z rozhodujících kritérií pro volbu metody navařování jsou rozměry součástí, které chceme navařovat nebo také svařovat (z hlediska ekonomického je naprosto irelevantní, zda se jedná o navařování nebo

svařování). U PLC se jedná pouze o zabezpečení rozměru pracoviště, kdežto u EBC je to jedno z významných kritérií. Na tom totiž závisí rozměry vakuové komory, kde se provádí vlastní operace. Existují firmy automobilového průmyslu, kde se provádějí svary EB např. klikových hřídelí automatizovaně v malých vakuových komorách. Vlastní operace trvá pár sekund včetně vyčerpání vzduchu (to patří k nejdelším operacím při EBW, EBC). O kvalitě svaru je zbytečné se dále vyjadřovat. Navíc EBW se vyznačuje velkou hloubkou závaru, tzn. že součásti je možné svařovat najednou, bez otáčení např. při obvodových svarech. Pokud je zapotřebí komora větší, je zapotřebí delší čas na její vyčerpání (více energie, menší výrobnost, apod.), což se zákonitě musí projevit i ve vyšší hodinové sazbě. Dalším důležitým faktorem je, zda jsme zákazníci nebo vlastníci tohoto zařízení. Pořizovací cena plazmového navařovacího automatu je cca 1 mil Kč a cena svařovací aparatury EBW je cca 30 mil Kč. Proto bude v praxi rozhodovat o volbě EBC nebo PLC konkrétní výrobní program a na ten se udělá důkladná ekonomická analýza.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KUBÍČEK, Jaroslav. *Sylabus přednášek Technologie II, část Svařování*. 1vyd. Brno, 5/2006. 115 s.
2. BAJDA, Miloslav. *Navařování kovů*. [online]. 2007, s. 12 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Navarovani_complete
3. KUBÍČEK, Jaroslav. *Renovace a povrchové úpravy, v. 1.3*. 1vyd. Brno, 12/2006. 52 s.
4. ŠALBOT, Josef. KMT International. [online]. 2013. vyd. [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: <http://www.kmt.cz>.
5. BADO, Peter. *Železničný svršok 1. část. Vlaky.net* [online]. [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/002319-Zeleznicky-zvrsok-1-cast-uvod>.
6. RUDYK, Martin. *Analýza aplikací svazku elektronů v průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s.
7. KUBÍČEK, Jaroslav. *Sylabus přednášek Technologie II, část Svařování. Speciální metody tavného svařování*, vyd. Brno, 5/2006. 115 s.
8. ESAB, *Svařování plazmou* [online]. [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://www.esab.com/cz/cz/education/processes-paw.cfm>.
9. TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvarania*. Bratislava : ALFA, 1989. Zváranie elektrónovým lúčom, s. 188. ISBN 80-05-00097-9.
10. ZOBAČ, Ladislav. *Praktická příručka pro uživatele elektronové svářečky*. Brno, 2007. 29 s.
11. ZOBAČ, Ladislav; ZOBAČ, Martin. *Elektronové svářečky, jejich historie a současnost v ČR*. Brno , 2007. 19 s.
12. PRO BEAM, *Pro-beam.com* [online]. 2008 [cit. 2011-08-20]. Services - pro-beam. Dostupné z: <http://www.pro-beam.com/en/leistungen1.htm>.
13. ABE, Nobuyuki, Masahiro TSUKAMOTO, Shoji MIYAKE, Fumiaki KURIYAMA, Junji MORIMOTO a Michio TOMIE. *Effect of Formation Parameters on Layer Properties in Electron Beam Cladding with Powder Feeder*. [online]. 2004 [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11094/5441>.

14. ABE, Nobuyuki a Junji MORIMOTO. *Formation of Hard Surfacing Layers of WC-Co with Electron Beam Cladding Method*. [online]. 2004 [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/13095/5288>.
15. SUEGAMA, Peter, ESPALLARGAS, Nuria, GUILMANY, Josep Maria., et al. *Electrochemical and Structural Characterization of Heat-Treated Cr₃C₂-NiCr Coatings*. *Journal of The Electrochemical Society* 2006, 153 (10), B434-B445.
16. PVD COATINGS, *Pvd coatings.org* [online]. 2008 [cit. 2011-08-20]. Coating machines. Dostupné z: <http://www.pvdcoatings.org/coating-machine/>.
17. LASERTHERM, *Lasertherm.cz* [online]. 2008 [cit. 2011-08-20]. Laserové navařování. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-navarovani>.
18. KOLEKTIV AUTORU FSID ČVUT, Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I - Hodnocení kvality svarového spoje. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Veličina	Jednotka/hodnota
m_e	hmotnost elektronu	$9,1 \cdot 10^{-32} \text{ kg}$
q	elektrický náboj	$-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
v	rychlost	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
J_e	proudová hustota emisního proudu	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$
A_j	konstanta emise závisající na povrchu	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$
T	absolutní teplota	K
e	Eulerovo číslo	2,71828
k	Boltzmannova konstanta	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
F	síla (elektrická)	N
E	intenzita elektrického pole	$\text{N} \cdot \text{C}^{-1} (\text{V} \cdot \text{m}^{-1})$
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	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
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)
G_n	hmotnost návaru na 1 metr	kg
Z	plocha návaru nad základním materiálem	m^2
P_n	výkon navaření	$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$
t_t	doba navařování 1m návaru	s
N_n	měrná spotřeba energie	$\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$
Q_s	specifický tepelný příkon	$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
G	plocha roztaveného základního materiálu	mm^2
V	zředění	%

v_s	rychlost svařování	mm.s^{-1}
α_n	součinitel navaření	$\text{g.A}^{-1}.\text{min}^{-1}$
V_n	objem návaru	m^3
S_n	plocha návaru	mm^2
Sp_d	spotřeba přídatného materiálu	kg.m^{-1}
N_m	náklady na přídatný materiál	Kč.m^{-1}
Sp_{pl}	spotřeba plynu na 1 metr svaru	l.m^{-1}
q_{pl}	průtok ochranného plynu	l.min^{-1}
N_{pl}	náklady na ochranný plyn	Kč.m^{-1}
C_{pl}	cena ochranného plynu	Kč.l^{-1}
N_{pr}	pracovní náklady na 1 metr svaru	Kč.m^{-1}
N_h	hodinové pracovní náklady	Kč.hod^{-1}
N	celkové náklady na 1 metr svaru	Kč.m^{-1}