

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# ELEKTRONOVÉ SVAŘOVÁNÍ SOUČÁSTI ZE SLITINY AL

ELECTRON BEAM WELDING OF PARTS MADE FROM ALUMINIUM ALLOY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DAVID JIRÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR'S

Doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

Brno 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2010/11

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): David Jiráček

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

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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

### **Elektronové svařování součástí ze slitiny Al**

v anglickém jazyce:

### **Electron beam welding of parts made from aluminium alloy**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařitelnost Al a jeho slitin je velmi dobrá za předpokladu, že se použije svařovací metody, která zaručuje rozrušení povrchové oxidické vrstvy. Svařování elektronovým paprskem lze použít pro většinu hliníkových slitin. Při svařování slitin s Mg, Cu nebo Zn však vzniká nebezpečí výskytu trhlin ve svaru. Při použití vysoké rychlosti svařování mohou ve svarovém kovu vznikat póry, které nejsou iniciovány vodíkem jako v jiných případech, ale vznikají selektivním vypařováním některých prvků ze slitiny.

Cíle bakalářské práce:

Materiálové a technologické aspekty elektronového svařování hliníkových slitin.  
Analýza současného stavu svařování. Popis problémů a návrh na zlepšení.

Seznam odborné literatury:

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

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

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

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


TURŇA, M. Špeciálne metódy zvarovania. 1. vyd. Bratislava: ALFA. 1989. 384 s. ISBN 80-05-00097-9

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu



  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

JIRÁK David: Elektronové svařování součástí ze slitiny hliníku

Téma práce bylo zadáno firmou Valeo Compressor Humpolec, s.r.o (dále jen Valeo). Jedná se o elektronové svařování součástí ze slitiny hliníku, konkrétně o píst, který je určen do kompresoru klimatizace osobního automobilu. Cílem práce bylo vyhodnocení a návrh zlepšení pórovitosti na svařované ploše. Data potřebná pro analýzu a současný stav svařované plochy byla poskytnuta firmou Valeo.

Klíčová slova: Slitina hliníku, píst, elektronové svařování, elektronový paprsek, svarový spoj

## **ABSTRACT**

JIRÁK David: Electron beam welding of parts made from aluminium alloy

The topic of this thesis was ordered by Valeo Compressor Humpolec Ltd (further referred to as Valeo). It deals with the electron welding of a component made of an aluminium alloy, a piston specifically, which is made for an automobile air-conditioning compressor. The aim of this thesis was to analyze and suggest a way of increasing porosity of the welded area. The data needed for the analysis and the present state of the welded area was provided by Valeo.

Key words: Aluminium alloy, piston, electron welding, electron ray, welded joint

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

JIRÁK David: *Elektronové svařování součástí ze slitiny hliníku*. Brno, 2011. 36 s., 3 přílohy, CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Elektronové svařování součásti ze slitiny hliníku vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 24. 5. 2011

Jméno a příjmení: David Jirák

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc., Ing. Kubovi Urbanovi, Otovi Trkolovi a celé firmě Valeo za cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce. Děkuji i své rodině za podporu během celého studia.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

<b>1. TEORETICKÝ ÚVOD</b> .....	9
<b>1.1 Valeo Compressor Europe</b> .....	10
<b>2. SVAŘOVÁNÍ ELEKTRONOVÝM PAPSREM</b> .....	11
<b>2.1 Základní pojmy</b> .....	11
<b>2.2 Vlastnosti svazku elektronů</b> .....	14
<b>2.3 Interakce elektronů s materiálem</b> .....	16
<b>2.4 Síly působící v kapiláře</b> .....	17
<b>2.5 Materiálové aspekty hliníkových slitin</b> .....	20
<b>3. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU</b> .....	24
<b>3.1 Materiál součásti</b> .....	24
<b>3.2 Technologie výroby pístu</b> .....	27
<b>3.3 Elektronová svářečka a její parametry</b> .....	29
<b>3.4 Kontrola svarového spoje</b> .....	30
<b>4. POPIS PROBLÉMU</b> .....	31
<b>5. NÁVRH NA ZLEPŠENÍ</b> .....	32
<b>6. ZÁVĚR</b> .....	33

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých zkratk a symbolů

Seznam příloh



## 1 TEORETICKÝ ÚVOD [1] [2] [3]

Počátek svařování elektronovým paprskem se datuje od poloviny 20. století. Ruku v ruce se také vyvíjel elektronový mikroskop, který má stejné elektronové dělo a částečně i elektronovou optiku. Tuto metodu svařování si hned v počátcích jeho vzniku osvojil letecký, energetický, jaderný průmysl spolu s astronautikou. Po několika testech a zkouškách, byla tato metoda přesunuta do výroby s vysokým stupněm automatizace. Velkou výhodou tohoto typu svařování je získání velmi kvalitních svarů při velkých tloušťkách materiálu spolu s malou tepelně ovlivněnou oblastí.

Svařování probíhá za velmi vysokých teplot, kdy jsou složité fyzikální a chemické děje. Pro další vývoj je tedy zapotřebí, aby svařovací procesy byly postaveny na vědecké základně. A to z toho důvodu, že jedním z největších problémů při svařování je vznik trhlin ve svarových spojích. Jiné defekty mohou být vyvolány např. prostorovou napjatostí, atd.

Pro dokonalý svar bez trhlin a jiných vad je zapotřebí nejprve provést důkladný rozbor svařovaných materiálů. Poté můžeme zvolit co nejvhodnější rozhodnutí o provozních parametrech a podmínkách. Při určitém problému a jeho řešení je důležitým předpokladem znalost teorie, použití výpočetní techniky a návrh experimentů, které je možno ověřit na reálných svarových spojích.

Závěrem nutno podotknout, že teorie a ani výzkum není schopna vyřešit hrubé chyby výrobní praxe. Dnešní vývoj techniky svařování však jednoznačně dokazuje, že se neobejdeme pouze s praktickými zkušenostmi. K dosažení bezchybného svarového spoje je zapotřebí mnoho výzkumů, analýz a testů.

## 1.1 VALEO COMPRESOR EUROPE [4]

Valeo compressor v Humpolci je nejmladším zástupcem skupiny Valeo v České republice. Společnost Valeo patří k předním výrobcům kompresorů pro klimatizační jednotky osobních automobilů. V tomto závodě jsou aplikovány ty nejmodernější metody obrábění a montáže.

Pro vývoj optimálního klimatizačního systému pro automobily v celosvětovém měřítku jsou v Japonsku, ve Spojených státech a v Evropě sídla společnosti, zabývající se výzkumnými a vývojovými pracemi spolu s řešením problémů.

Své produkty vyváží k světovým výrobcům automobilů, jako jsou VW group (Audi, Škoda, Seat, Volkswagen), General motors, Renault, Toyota a další.



Obr. 1.1 Valeo compressor Humpolec [4]

Valeo compressor Europe, s.r.o. v Humpolci vyrábí kompresy, které se montují do HVAC (Heating, Ventilating and Air-Conditioning) jednotek osobních automobilů.

Hlavní funkcí těchto kompresorů je pohánět chladící medium, které proudí v klimatizaci.

Jedním z kompresorů vyráběných touto firmou je kompresor s variabilním zdvihovým objemem DCS-17E, který má schopnost měnit svůj pracovní výkon (změnou zdvihového objemu). Tímto je dosaženo maximálního možného naplnění požadavků zákazníka, při ochlazení interiéru vozu a nedochází k náhlým poklesům teploty v kabině.

- Základní údaje:    obrat 2 900 milionu Kč  
                          zaměstnanců 940  
                          výrobní závod v ČR  
                          R&D a prodej v Německu

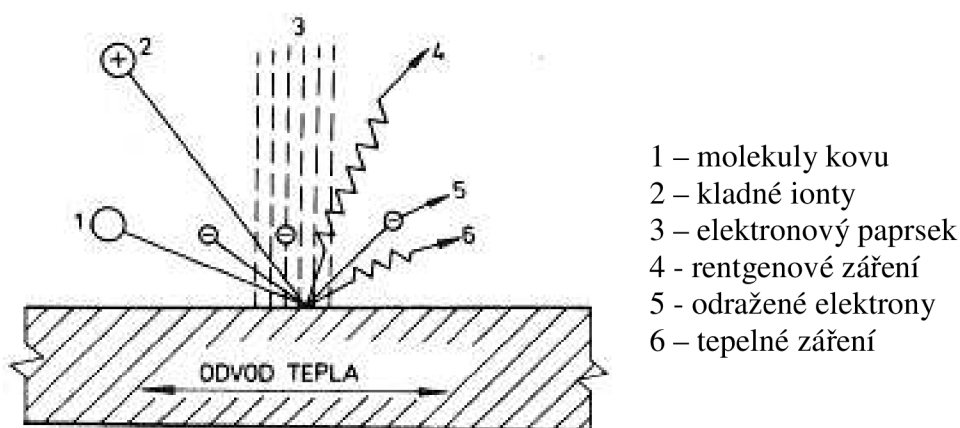


Obr. 1.2 Řez kompresoru DSC-17E [4]

## 2 SVAŘOVÁNÍ ELEKTRONOVÝM PAPRSKEM [2] [5]

Svařování elektronovým paprskem je proces, při kterém vzniká teplo a v tomto důsledku dojde ke spojení dvou materiálů. Teplo vzniká v důsledku nepružného vzájemného působení elektronového paprsku s kovem. Svařování uskutečňuje svazek elektronů, které jsou zrychleny pomocí elektronového děla. Tyto elektrony jsou zrychleny na 0,3 až 0,7 násobku rychlosti světla, což je  $89\,937\,737\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  až  $20\,985\,720\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Při dopadu elektronů na povrch svařovaného kovu, se téměř všechna jejich kinetická energie přemění na teplo a dochází k tavení materiálu a jeho spojení bez působení tlaku. Elektrony, které dopadnou na povrch a zároveň elektrony rozptýlené jsou znázorněny na obrázku 2.1. Protože celková kinetická energie elektronů může být fokusována do malé plochy na obrobku, tak lze dosáhnout hustotu výkonu  $10^6\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Vysoká hustota výkonu a extrémně úzký svazek elektronů, který vstupuje do pevné látky obrobku má za následek okamžité tavení v místě průchodu svazku elektronů a zároveň odpařování materiálu. Metoda svařování svazkem elektronů se odlišuje od ostatních metod, kde je rychlost tání omezena tepelnou vodivostí svařovaného materiálu.



Obr. 2 Jevy při dopadu elektronu na povrch základního materiálu [1]

### 2.1 ZÁKLADNÍ POJMY [2] [5] [6] [7]

Zařízení na elektronové svařování se dělí na tyto hlavní části: elektronové dělo, elektronová optika, řídicí systém a pracovní komora. Principy fungování a podrobnější vysvětlení těchto pojmů jsou vysvětleny níže.

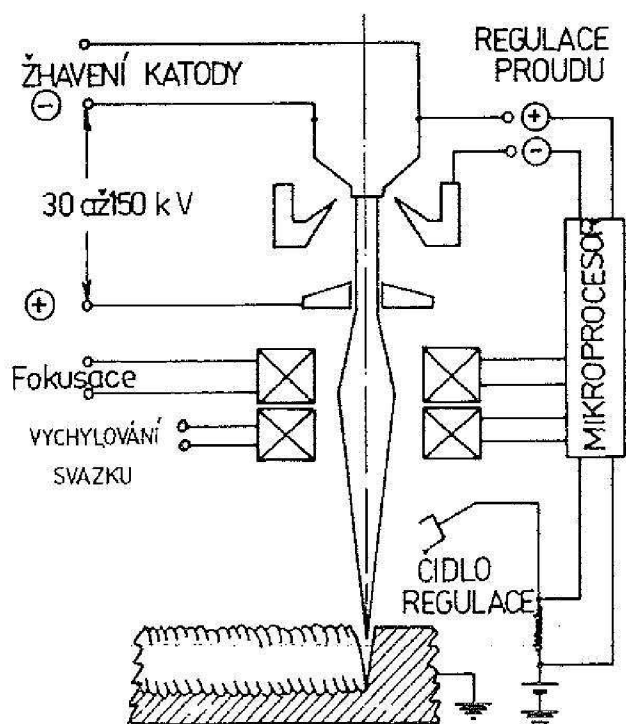
- **Elektronové dělo**

K svařování je potřebný dostatečně výkonný zdroj, pomocí kterého můžeme soustředit svazek elektronů do ohniska, který má malý průměr. K tomu slouží tzv. elektronové dělo. Toto dělo se skládá z emitru elektronů, kterým je většinou wolframové nebo tantalové vlákno ohnuté do tvaru písmenka V, které je zahřáno na vysokou teplotu (asi  $2700^{\circ}\text{C}$ ) nebo se vlákno zahřeje při průchodu elektrickým proudem. Další možnost zahřátí je pomocí vinutých vláken. Vlákno slouží jako katoda elektronového děla.

Okolo vlákna je tzv. Wehnelův válec, který má za úkol zaostřovat a ovládat elektronový paprsek, který má asi o 300 voltů záporné napětí vůči katodě. To má za následek, že slouží jako akumulátor termálně emitovaných elektronů.

Elektrony, které jsou emitovány katodou a urychlené spádem napětí mezi katodou a anodou, procházejí skrze otvor v anodě a jsou soustředěny fokusační cívkou do ohniska. Paprsek elektronů je možno vychylovat pomocí cívkou do požadovaného místa.

Bereme-li v úvahu pouze systém katoda-anoda, tak tvoří první elektrostatickou čočku,



pomocí které jsou fokusovány samotné elektrony. Celkovou energii elektronového svazku lze vypočítat pomocí zákona o zachování energie: součet kinetické a potenciální energie elektronů musí být na anodě a katodě stejný.

Dnešní zařízení jsou vybavena plně automatickým mikroprocesorem nebo minipočítačem. Pomocí těchto zařízení lze vyhodnotit všechny rozhodující vstupní parametry a podle těchto hodnot okamžitě provést korekci.

Díky tomuto vybavení se změnila, resp. zvýšila spolehlivost a proto je uplatňována v sériové výrobě, ale i při výrobě vysoce konstrukčně náročných výrobků.

Obr. 2.1 Schéma zařízení [6]

- **Elektronová optika a řídicí systém**

Pomocí optiky lze sledovat svařecí proces a v tomto důsledku je možnost korigovat paprsek pomocí magnetických čoček, které vychýlí, vzdálí, nebo zvětší paprsek elektronů. V této části elektronové svařečky je elektromagnetický kondenzor, pomocí kterého lze paprsek elektronů přenést na delší vzdálenost k ploše obrobku.

Pomocí vychylovací čočky, která je též součástí optiky, lze dle potřeby vychýlit nebo zaostřit paprsek. Je možná možnost použití další čočky, která bude umístěna též v optice svařečky. Ta by měla za úkol skenování svařovaného povrchu a dle potřeby paprsek oscilovat, aby zaujímal širší plochu.

Do optiky je možno instalovat sledovací zařízení (okulár a prizma), pomocí kterého můžeme přímo sledovat svařovací proces. Na tomto základě lze změnit vstupní data, pokud by docházelo k defektu na svařovaném výrobku.

- **Pracovní komora**

Velikost pracovní komory je úměrná velikosti obrobku. V této komoře je pracovní stůl, na kterém je umístěn a uchycen obrobek pro následné svařování. Tento stůl bývá univerzálně polohovací, aby umožnil náklon ve všech osách a rotaci kolem osy, aby umožnil dostupnost na všech místech svařovaného obrobku. Je možno také použít automatizovaný proces dopravníků, které pomocí naprogramovaného chodu dopraví obrobek do pracovní komory.

Jednou z podmínek, která zaručuje kvalitu svaru, je vakuum uvnitř pracovní komory. Vlivem vakua není paprsek ovlivňován okolní atmosférou a není tolik rozptýlený jako na vzduchu, kde jsou nepříznivé vlivy pro svařování touto metodou.

Zařízení na odsávání vzduchu z pracovní komory je jednoduché. Používáme rotační vývěvu s vysokou kapacitou, které umožňuje získat vakuum až do řádu  $10^{-3}$  torrů. Pro dosažení většího vakua použijeme difúzní vývěvu. Tato vývěva pracuje se silikonovým olejem. Další zařízení, pomocí kterého lze získat vysoké vakuum, se nazývá molekulární vývěva, která pracuje při velmi vysokých otáčkách. Při použití systému airlock, lze naplnit komoru vzduchem, zatímco ostatní části jsou pod vakuem.

Některé komory jsou taky opatřeny systémem clon, které postupně snižují hodnotu vakua. To znamená, že v místě elektronového děla a optického systému se udržuje vysoké vakuum, zatímco v předkomoře je vakuum nižší, nebo se dokonce pracuje při atmosférickém tlaku.



Obr. 2.11 Rotační vývěva (vlevo) a difúzní vývěva (vpravo) [8] [9]

Při svařování můžeme použít dvě možnosti. První z nich je pomocí *vedení tepla*, které se používá při svařování tenkých materiálů. Povrch materiálů se rychle roztaví a pomocí vedení tepla v materiálu dojde k jeho úplnému anebo částečnému přetavení. Zhotovený svar je velmi úzký, protože průměr fokusovaného svazku elektronů je malý (0,1 - 0,2 mm) a je velmi vysoká proudová hustota, která umožňuje velmi rychlé svařování, takže je velmi malá tepelně ovlivněná oblast.

Druhá metoda svařování je technika *klíčové dírky*. Tato metoda je použita při svařování silnostěnných obrobků. Paprsek elektronů je fokusovaný pod povrch materiálu, aby se dosáhlo lepšího provaření základního materiálu. Rychlý ohřev materiálu a následné tavení včetně odpařování roztaveného kovu způsobí vznik úzké dírky přes celou tloušťku materiálu. V této dírce vzniká při vypařování materiálu tlak, který je stejný jako povrchové napětí roztaveného kovu. Poté ve směru svařování se roztavený kov přesouvá za paprsek, kde posléze tuhne a vzniká svarový spoj.

Obě možnosti svařování jsou v podstatě stejné a mají stejný vliv na kvalitu svaru a tepelně ovlivněnou oblast. Rozdíl je jen v tom, že při použití metody *klíčové dírky* dochází k úplnému přetavení základnímu materiálu na rozdíl od druhé metody, kde se po natavení povrchu svaru šíří tento natavený materiál vedením tepla v materiálu.

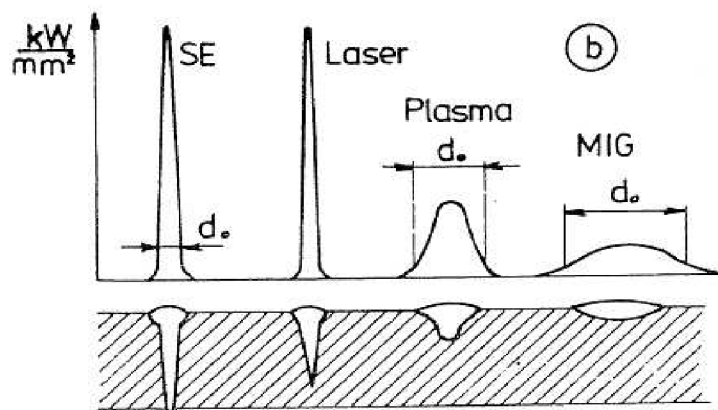
## 2.2 VLASTNOSTI SVAZKU ELEKTRONŮ [1] [2] [6]

Hustota elektronů je velice důležitá hodnota, pomocí které lze ovlivnit tvar průvaru, velikosti tepelně ovlivněné oblasti a jiné parametry. Elektronový paprsek je jedním z nejefektivnějších zdrojů tepla při svařování kovů. Při srovnání hustoty elektronového paprsku a svařovacího oblouku, dojdeme k závěru, že hustota paprsku elektronů je víc než o dva řády větší.

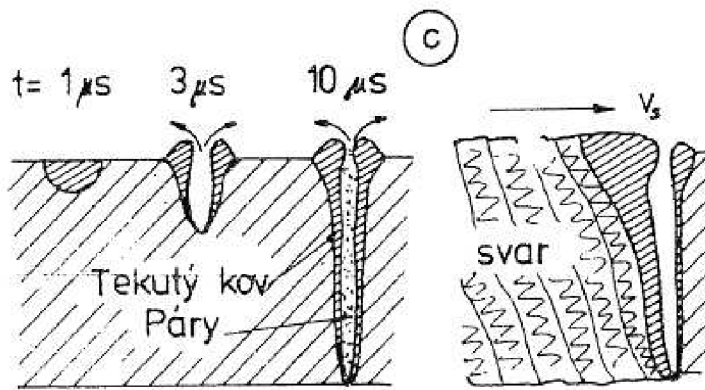
Není problém vyvinout svazek elektronů, který bude mít hustotu  $5 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ . To je  $500\,000 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

Ohřev základního materiálu pomocí elektronového paprsku je velmi krátký. Výpočtové metody nám dokazují hodnotu  $10^7$  až  $10^8 \text{ }^\circ\text{C}$ , které se dosáhlo za 1 sekundu. Ovšem v reálném provozu jsou tyto hodnoty nemožné a to z důvodu odpařování kovů na povrchu, přemísťování roztaveného kovu plyny a parami, při čemž se spotřebuje velké množství energie.

Dnešní zařízení pro elektronové svařování pracují nejčastěji s urychlovacím napětím od 25 do 200 kV a proudy tomu odpovídající od 50 do 1000 mA, výkon od 1 do 50 kW. Elektronový paprsek můžeme fokusovat na šířku stopy 0,1 až 0,8 mm. Tyto hodnoty se liší dle tloušťky svařovaného materiálu. Energie svazků je odlišná po celé délce paprsku. Toto rozložení energie je zhruba dle Gaussovy křivky a to s maximem v ose svazku. Viz obrázek 2.2, kde jsou porovnány různé metody tavného svařování odpovídající stejné geometrii průvaru. Z obrázku je patrné, že pouze Laser má podobné vlastnosti jako paprsek elektronů. Jiné metody jsou zanedbatelné, jak ve výkonu svazku, tak v hloubce závaru.



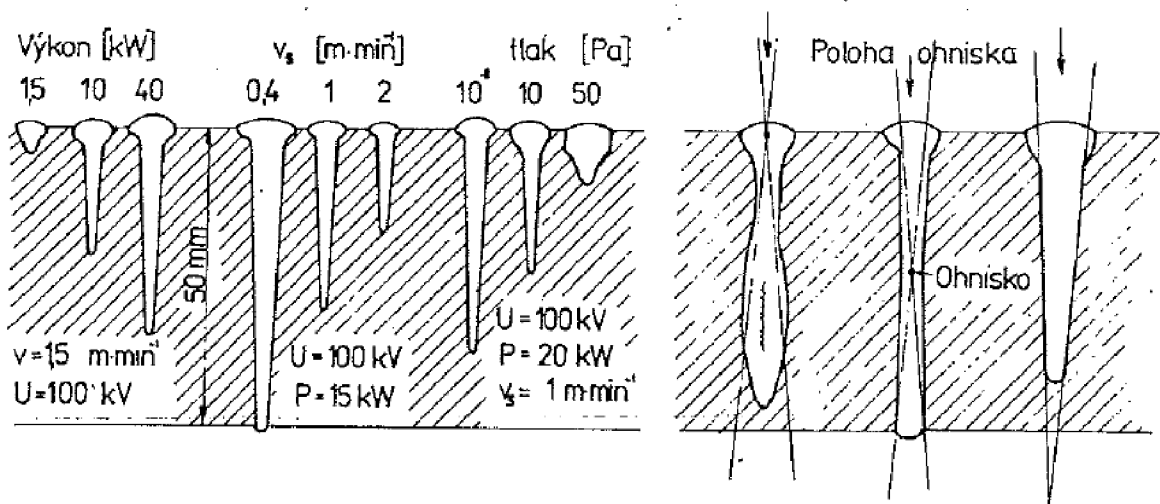
Obr. 2.2 Rozložení hustoty energie a odpovídající závar [6]



Obr. 2.21 Mechanismus tavení [6]

Největší vliv na celkový tvar svaru a jeho průvar má urychlovací napětí. Při hodnotě okolo 70 kV je velmi intenzivní hloubka průvaru. Oblast tavení materiálu se posouvá směrem k působení paprsku a s přibývajícím intenzitou roste hloubka přetavení. Ve svarovém spoji se vyskytují krátery, které doposud nejsou vysvětleny. Při vysokých urychlovacích napětích se může dosáhnout úzkého hlubokého průvaru a to je jedna z největších výhod. Při nízkonapěťových elektronových dělech a při malých proudech paprsku do 35 mA se tvar průvaru nijak neliší od ostatních metod svařování, např. při obloukovém svařování v ochranné atmosféře argonu. Platí zde přímá úměra mezi proudem a hloubkou závaru. Čím bude proud vyšší, tím bude hloubka závaru také větší.

Chceme-li nějakým kvalitativním znakem určit kvalitu paprsku, použijeme tzv. úhel konvergence svazku nebo resp. úhel divergence za ohniskem. Tento úhel rozhoduje o změně velikosti hustoty energie plochy svazku elektronů vlivem změněné polohy ohniska. Menší úhel konvergence, který má za následek svary, které jsou dostatečně hluboké, a úzké použijeme u tlustších materiálů. Pro znázornění je na obrázku 2.21 ukázán vliv parametrů na svařování.



Obr. 2.22 Vliv parametrů svařování svazkem elektronů na hloubku a tvar závaru [6]

Elektronový paprsek a jeho tepelný příkon je kontrolován 4 faktory. První z nich je počet elektronů za sekundu, které bombardují povrch svaru anebo proud parsku. Druhý je rychlost elektronů v okamžiku srážky se základním materiálem. Třetí a čtvrtý faktor je průměr stopy na svarku a rychlost svařování. První dva faktory se používají jako základní.

Pro co nejlepší plochu svaru a závaru, musíme zajistit bilanci mezi urychlovacím napětím a svařovacím proudem. Tato bilance má za následek maximální fokusaci elektronového parsku a celkové kvality spoje.

## 2.3 INTERAKCE ELEKTRONŮ S MATERIÁLEM [1] [2] [6] [10]

Urychlené elektrony z elektronového děla, se při dopadu na základní materiál mění jejich kinetická energie na energii tepelnou. Tyto elektrony jsou až ze 70 % odraženy ve formě rentgenového a tepelného záření. Uvolňují se však také sekundární elektrony, molekuly kovů a kladné ionty, což je možné vidět na obrázku 2. Elektrony, které projdou do základního materiálu, proniknou jen několik mikrometrů do základního materiálu. V důsledku toho dochází k vibračnímu přenosu energie, která urychluje kmitání atomové mřížky kovů. Elektrony neztrácejí svoji energii hned po nárazu do základního materiálu, ale postupně je tato energie předávána do krystalické mřížky. Tento proces má za následek přeměnu kinetické energie elektronů na tepelnou energii.

V místě dopadu elektronů, dosáhne během několika mikrosekund teploty tavení materiálu. Poté dosáhne bodu varu kovu a za pomoci reakce tlaku při unikání par se začne tvořit prohlubeň. Tento tlak je dostatečně vysoký, aby udržel taveninu na stěně kapiláry neboli dutiny. Dutina umožňuje pronikání dalších elektronů do větší hloubky materiálu, které svým tlakem udržují kapiláru otevřenou. Tento proces trvá tak dlouho, dokud se neodpaří všechny kov z místa bombardování elektronů a nevytvoří se otvor. Mimochodem na tomto principu pracuje zařízení pro vrtání paprskem elektronů. Při svařování určitou konstantní rychlostí pronikne paprsek do určité hloubky a nastane stav, kdy energie postačí na natavení určitého množství kovů před paprskem a tím vznikne i potřebné množství par pro stability kapiláry. Poté tento natavený kov obtéká po stranách kapiláru a následně tvoří spoj.

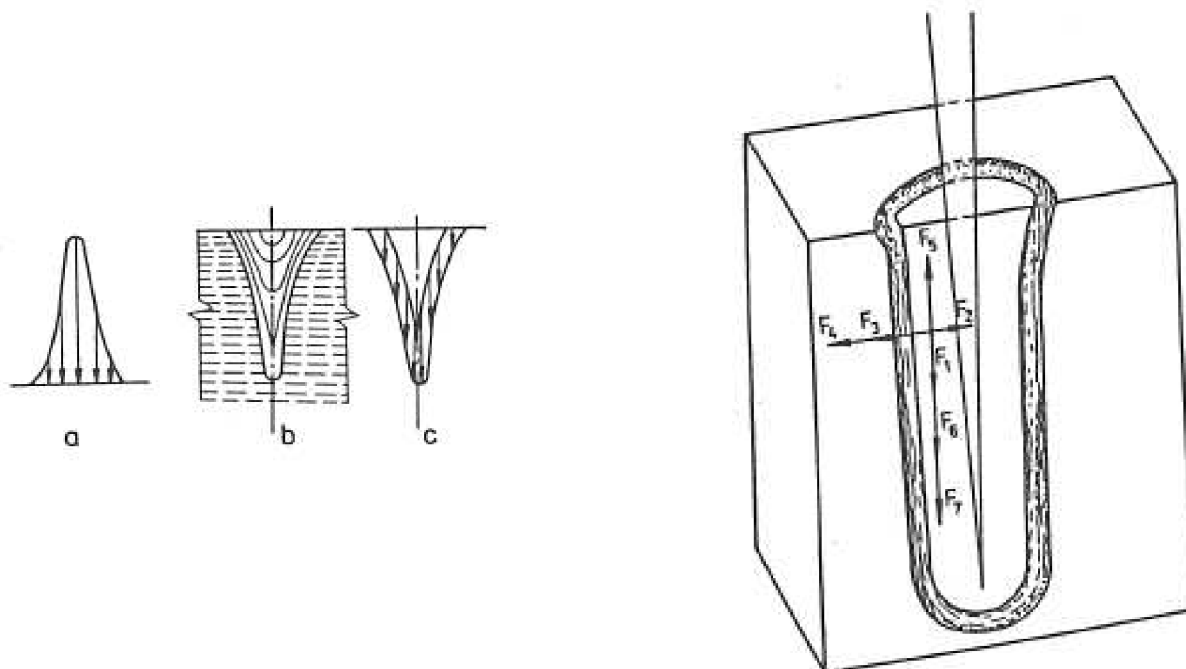
U tohoto způsobu svařování se používá přídavný materiál jen zřídka. A to z důvodu natavení obou polovin svařované součásti. Jak už bylo psáno dříve, tak vysoká energie až  $5 \times 10^8 \text{ W.cm}^{-2}$  vytvoří svar s minimální tepelně ovlivněnou oblastí, která dosahuje pouze několika desetin milimetrů. Spoj, který vznikne, se velmi podobá svými mechanickými vlastnostmi a strukturou základnímu materiálu. Svarový spoj má velmi malé deformace, které nám umožňují svařovat součásti bez dalšího opracování povrchu. Plochy, které jsou určeny pro svaření, musí být dostatečně zbaveny nečistot. Součásti, jejichž předchozí operace byla obrábění či frézování a bylo zde použito řezné kapaliny, tak je nutné použít pračku pro odmaštění. Kdybychom tento proces vynechali, tak zbytkový tuk, nečistota na povrchu materiálu se při ohřevu může přeměnit na plyny, které nám ovlivní svarový spoj. Tyto nečistoty mohou vést k bublinatosti nebo pórovitost. Další podmínkou je dobré opracování svarových míst a to na optimální drsnost  $R_a = 0,8 - 1,6 \text{ } \mu\text{m}$ . Zcela vyhovující mezera mezi svařovanými materiály je 0,1 mm. Šířka parsku se volí dle šířky mezery mezi materiály. Volí se přibližně čtyřnásobek této vzdálenosti, aby se dosáhlo dokonalého překrytí.

Při nedodržení těchto aspektů se svarový spoj může stát nedokonalým a při následné kontrole svaru i nevyhovujícím. Proto je všechny tyto podmínky nutno respektovat.



## 2.4 SÍLY PŮSOBÍCÍ V KAPILÁŘE [1] [2] [10]

V místě svaru základního materiálu, kde vznikl otvor za pomoci vypaření materiálu, vznikají síly. Tyto síly jsou znázorněny na obrázku 2.4 včetně rozložení hustoty energie. Parametry svařování velmi ovlivňují síly v kapiláře, proto je nutno dbát na správném nastavení vstupních hodnot.



Obr. 2.4 Tvorba svaru a rozložení sil při stojatém svazku elektronů a vliv parametrů na hloubku a tvar závaru [10]

- a – rozložení hustoty energie,
- b – postup protavení materiálu,
- c – rozložení energie v oblasti tavení.

- a) Síla tlaku elektronového proudu

$$F_1 = 0,34 \times I \times \sqrt{U} \quad (2.40)$$

- $F_1$  – síla tlaku elektronového proudu [N]
- $I$  – intenzita proudu v paprsku [A]
- $U$  – napětí [V]

- b) Elektromagnetická síla vznikající od proudu paprsku

$$F_2 = 2,30 \times 10^{-3} \times I^2 \times \log \frac{R_0}{r_0} \quad (2.41)$$

$$R_0 = \frac{I}{2} \times b \quad (2.42)$$

- $F_2$  - Elektromagnetická síla vznikající od proudu paprsku [N]

b – šířka svaru [cm]  
r<sub>0</sub> – rádius paprsku [cm]

c) Síla reakce par kovu

$$F_3 = m \times v \quad (2.43)$$

F<sub>3</sub> - elektromagnetická síla vznikající od proudu paprsku [N]

m – množství par kovu za jednotku času [g.s<sup>-1</sup>]

v – rychlost molekul vypařujícího se kovu [cm.s<sup>-1</sup>]

Rychlost odpařování hmoty z povrchu materiálu ve vakuu je dána vztahem:

$$G = p \times \sqrt{\frac{m}{2\pi RI}} \quad (2.44)$$

$$G = \frac{m}{A} \quad (2.45)$$

G – rychlost odpaření [g.cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

A – plocha odpaření [cm<sup>2</sup>]

R – univerzální plynová konstanta [-]

p – tlak par při teplotě T [K]

d) Síla na boční stěny v dutině

$$F_4 = \frac{p}{760} \times 10^6 \times \frac{\pi}{4} \times D_c^2 \quad (2.46)$$

F<sub>4</sub> – síla na boční stěny [N]

p – tlak nasycené páry [Pa]

D<sub>c</sub> – střední průměr dutiny [cm]

e) Síla vznikající z povrchového napětí

$$F_5 = \pi \times D \times \sigma \quad (2.47)$$

F<sub>5</sub> - Síla vznikající z povrchového napětí [N]

σ – hustota kovu [g.cm<sup>-3</sup>]

f) Gravitační síla

$$F_6 = m_0 \times g \quad (2.48)$$

F<sub>6</sub> - gravitační síla [N]

m<sub>0</sub> - hmota roztaveného kovu [g]

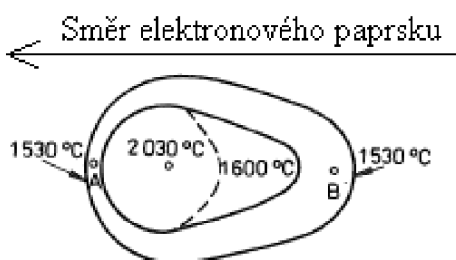
g – gravitační zrychlení [cm.s<sup>-2</sup>]

g) Hydrostatická síla tekutého kovu

$$F_7 = \rho \times g \times h \left( \frac{\pi}{4} \right) \times D^2 \quad (2.49)$$

h – hloubka protavení [cm]

Tato silová analýza byla provedena při nepohybujícím se svazku elektronů. Síly sami o sobě nemůžou vyvolat přemístění kovů, z tohoto důvodu vzniká důležitý úkol, a to tyto síly najít. Síly poté vyvolají pohyb roztaveného kovu v kapiláře z oblasti tavení do oblastí krystalizace. Při svařování vzniká rozdílná teplota v místě svaru, tj. teplo je rozloženo okolo paprsku. Při pohybu paprsku se na předním místě dosahuje až o několik stovek stupňů celsia vyšší hodnoty, než za paprskem. To může zapříčinit narušení termodynamické rovnováhy, které je vyvolané rozdílným rozložením teplot v místě svaru. Jak nám ostatně dokazuje obrázek 2.41



Obr. 2.41 Nesymetrické rozložení teploty v kapiláře [1]

Povrchové napětí na svarové ploše je závislé na teplotě. Pokud bude teplota roztaveného kovu větší, zmenší se síla povrchové napětí. Stejným způsob se mění i napětí v materiálu od bodu k bodu. Napětí v kapiláře způsobuje přemísťování taveniny z místa s menším povrchovým napětím k místu, kde toto napětí je větší. Znamená to tedy přemísťování roztaveného kovu na stranu poklesu teploty.

Při svařování se pohybuje součástka, nikoli však elektronové zařízení a to z důvodu složitosti. Součástka se může pohybovat lineárně, tak může být i otáčena. Především jedná-li se o rotační součásti, písty apod. Pro získání požadované kvality spoje, opakovatelnosti v hromadné výrobě při svařování elektronovým paprskem, musíme znát podrobné informace geometrii paprsku. Toho se dosáhne při odzkoušení interakce mezi paprskem elektronů a základním materiálem svařované součásti. Tyto poznatky, resp. parametry je možno přenést na jiné svařovací zařízení pro lepší poznatky elektronového paprsku. Právě proto mohou být svařovací stroje vybaveny mikroprocesorovým měřícím zařízením, které nám umožňuje získání těchto důležitých hodnot. Přemísťování kovů v okolo kapiláry uvnitř svařovaného materiálu je poměrně složité a závisí mimo jiné na parametrech svařování, vlastnostmi kovů apod.

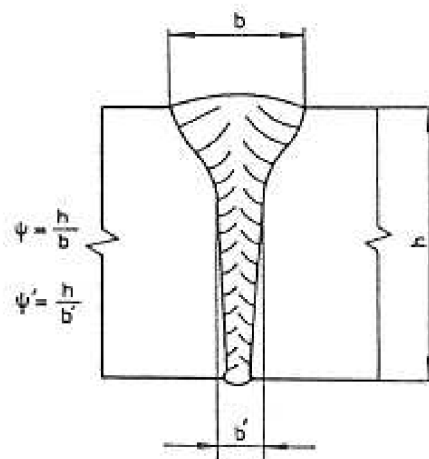


Podle energetických hodnot při svařování, je možno výpočtem určit hloubku závaru. V praxi se tato výpočetní technika ale moc nepoužívá. Používá se experimentální metoda na zkušebních vzorcích. Tyto vzorky jsou určeny pro nastavení vstupních hodnot svařovacího zařízení a pro zjištění průvaru spoje. Jak nám ukazuje obrázek obrázek 2.5 poměr hloubky  $h$  ku šířce závaru  $b$ , který se dá vyjádřit součinitelem svaru.

$$\Psi = \frac{h}{b} \quad (2.51)$$

$$\Psi' = \frac{h}{b'} \quad (2.52)$$

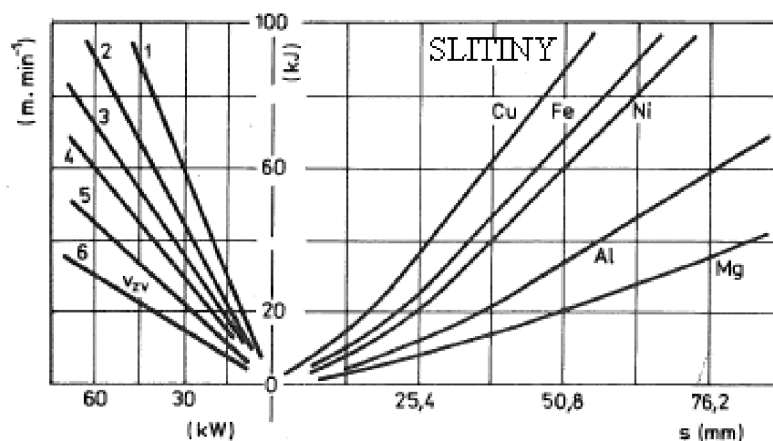
$\psi$  – součinitel tvaru svaru



Obr. 2.5 Tvar svaru [10]

Elektrony mají svoji největší hustotu v místě osy elektronového paprsku a tato poloha paprsku má také vliv na šířku a tloušťku závaru. Pro správné nastavení ohniska svazku elektronů na základní materiál se používá zaostřovací cívka v elektronovém děle, kde se reguluje proud. Vysoké hodnoty  $\psi$  nám umožňují velmi úzký svar spolu s malou tepelně ovlivněnou oblastí, malými deformacemi v místě svaru. Je však nutnost dbát na přesné vedení elektronového paprsku na oblast svařovaného spoje. V okamžiku, kdy by dráha paprsku nebyla přesně vedená po trajektorii spoje, by mohlo dojít k neprovaření materiálu a v tom případě ke vzniku zmetků.

Je zde taky jeden aspekt, nad kterým se musíme pozastavit. A to při velmi vysokém součiniteli tvaru spoje hrozí větší nebezpečí vzniku pórů a plynových bublin uvnitř a na povrchu svarového spoje.



Obr. 2.51 Závislost energie na hloubce průvaru vybraných materiálů a vliv výkonu elektronového paprsku a energie na rychlost svařování [1]

Nyní se budeme věnovat už jen hliníku a jeho slitinám. Probereme jeho základní parametry, chemické složení a vhodnost k elektronovému svařování.

Všechny slitiny hliníku patří kromě ocelí k nejvíce vhodným a nejvíce používaným kovovým konstrukčním materiálům. Zpracovává se z rudy zvané bauxit. Dnes už je vývoj hliníku dá se říct ukončen, protože celá jeho základní řada je už celosvětově unifikována. Hliník a jeho slitina se používají především díky jeho nízké měrné hmotnosti a poměrně dobré pevnosti. Některé druhy hliníku jsou schopny obstát v zátěžovém testu skoro stejně dobře jako oceli, popřípadě jsou i lepší. Slitiny hliníku velmi dobře odolávají klimatickým podmínkám, korozi a látkám kyselé povahy, avšak pouze za nepřítomnosti mědi ve slitině. Naopak při působení alkalických kovů je odolnost malá. Je vhodný pro většinu technologických opracování a zpracování. Počínaje tvářením a konče svařováním. Mají velmi dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Vyrábí se ve všech možných tvarech (dráty, tyče, apod.) Nevýhodou hliníku je jejich nízká tvrdost a poměrně snadná deformace obrobene plochy. Velmi obtížně se obrábí a leští. Na slitinách hliníku se také může tvořit elektrochemická koroze, jsou-li ve vodivém kontaktu s jinými kovy.

Hliník technické čistoty, což je cca. 99% hliník se z 60% zpracovává na plechy. Jiným druhem výrobků z hutí jsou tyče a dráty různých průměrů. Tento hliník má velmi malou pevnost v tahu. Ve stavu měkkém je  $R_m$  kolem 70 MPa a tváření za studena, což je tvrdý stav se tato hodnota zvětší na hodnotu kolem 130 MPa. Tato hodnota se nedá srovnávat s kovy anebo ocelí, kde je tato hodnota podstatně větší. Hliník je hojně používán v elektrotechnickém, potravinářském, chemickém průmyslu.

Slitiny hliníku dělíme do skupin podle způsobu zpracování. Dle ČSN ke dni 1. 1. 1995 bylo registrováno 18 slitin pro tváření a 16 slitin určených pro odlitky. Jiné dělení slitin hliníku je možno provádět podle tepelného zpracování neboli vytvrzování.

- **Slitiny hliníku pro tváření**

Nazývají se také nízkopevnostní slitiny s dobrou odolností proti korozi. Jsou tady slitiny Al-Mg a Al-Mn, které neobsahují měď. Z toho důvodu mají dobrou korozivní odolnost, ale také zde není možnost tuto slitinu žádným způsobem tepelně vytvrdit. Je vhodná ke svařování, tváření s dobrou lomovou houževnatostí. Slitiny, ve kterých je víc, jak 6 hmotnostních procent hořčíku mají sklon ke korozi na hranicích zrn. Pokud budeme potřebovat zvýšit pevnost slitiny Al-Mg, budeme muset tuto slitinu tvářet zastudena. Hodnota  $R_m$  bude maximálně 420 MPa. Slitiny Al-Mg-Si jdou vytvrdit pomocí tepelného zpracování až na hodnotu  $R_m$  350 MPa. Používají se především v letectví, architektuře a jsou velmi dobře svařitelné a tvárné. Tyto slitiny jsou znázorněny v tabulce tabulce 2.

- **Slitiny s větší pevností a menší korozivzdorností**

Jedná se o slitiny Al-Cu-Mg, které jsou nejvíce používané. Jsou to především duraly, které mají po vytvrzení velmi dobrou pevnost  $R_m$  až 530 MPa. Tyto duraly mají velkou škálu použití v technickém průmyslu. Pro lepší korozivzdornost je povrch potažen tenkou vrstvou hliníku. Dále do této skupiny patří slitiny Al-Cu-Mg-Ni, Al-Cu-Si-Mn, AlCu8FeSi a jiné.

- **Slitiny hliníku pro odlitky**

Tyto slitiny hliníku jsou určeny pro tlakové lití anebo odlévání do kovových forem. Mechanické hodnoty zaostávají za hodnotami při tváření. Jejich pevnost v tahu  $R_m$  je okolo 250 MPa. Rozděluje je na skupiny podle slitinových bází:

*Binární siluminy*- podeutektické (pod 11,7 hm. % Si)  
eutektické (kolem 11,7 hm. % Si) -  
nadeutektické (od 11,7 hm. %Si do 24 hm. % Si)

Eutektikum, které se ve slitině vyskytuje mezi 40 – 70 hm. %, dává těmto siluminům vysokou zabíhavost, ale také zmenšuje lineární smrštění a sklon tvorbě trhlin, které se tvoří za tepla, ale také, což je velká výhoda, snižuje vznik mikropórovitosti. Tyto siluminy Al-Si mají dobrou korozivzdornost.

*Speciální siluminy*- tyto siluminy jsou obohaceny hořčíkem a mědí, což má za následek zlepšení pevnostní charakteristiky. Z těchto siluminů jsou odlévány složité a tenkostěnné odlitky. Součásti jako písty, hlavy válců, řemenice, pouzdra apod.

Tab. 2 Slitiny hliníku pro tváření [11]

Označení	ČSN		Označení	EN		$R_m$ [MPa]
		Číslo			Číslo	
AlMg2		42 4412	AlMg2		AW-5051	140 – 255
AlMg3		42 4413	AlMg3		AW-5754	170 – 280
AlMg5		42 4415	AlMg5		AW-5019	200 – 420
AlMgSi1Mn		42 4400	AlSi1MgMn(A)		AW-6082A	270 – 330
AlMgSi		42 4401	AlMgSi		AW-6060	130 – 280
AlMn1		42 4432	AlMn1		AW-3103	130 – 220
AlCu4Mg		42 4201	–		–	180 – 430
plátovaný		42 4251	–		–	260 – 390
AlCu4Mg1		42 4203	AlCu4Mg1		AW-2024	210 – 530
plátovaný		42 4253	–		–	390 – 430
AlCu4Mg1Mn		42 4250	–		–	180 – 360
AlCu2Mg		42 4204	AlCu2Mg		~AW-2117	300
AlCu2Mg2Ni		42 4218	~AlCu2Mg1,5Ni		~AW-2618A	190 – 420
AlCu2SiMn		42 4206	–		–	200 – 410
AlCu4BiPb		42 4254	–		–	370
AlCu8FeSi		42 4261	–		–	260 – 320
AlSi12Ni1Mg		42 4237	–		–	160 – 320
AlZn6Mg2Cu		42 4222	~AlZn5.5MgCu		~AW-7075	200 – 580

### 3 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

V této kapitole se budeme zabývat rozбором současného stavu pístu. A to od výchozího materiálu, technologii výroby a svařovacím procesem. Po svařování součásti probíhají ještě další operace k dokončení pístu, avšak my se jimi nebudeme zatěžovat, protože už tyto operace nemají vliv na svarový spoj. Účelem této kapitoly je přiblížit všechny možné nevyhovující aspekty, které zapříčiňují nevyhovující současný stav svarového spoje svařovaného elektronovým paprskem. Protože se doposud nenašla žádná příčina vady svaru, budeme v každém kroku technologického postupu výroby hledat anomálii nebo odlišnou hodnotu od standardu, co by mohlo mít za následek negativní dopad na svarový spoj. Tyto výsledky budou zpracovány v odstavci č. 4.

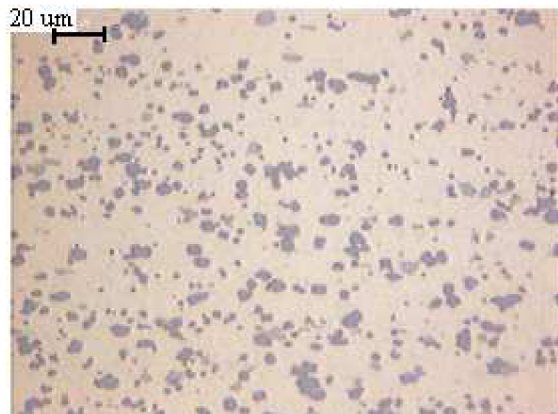
Budou zde uvedeny informace, obrázky a parametry z interních spisů a výzkumných zpráv společnosti Valeo. Na jejich přání nebudou zveřejněny určité specifické hodnoty a informace. Z tohoto důvodu budeme brát jejich hodnoty za pravdivé a skutečné při další analýze.

#### 3.1 MATERIÁL SOUČÁSTI [12]

Materiál určený k výrobě pístu do kompresoru je dodáván od firmy Kovosvit mas. Jedná se o slitinu hliník – křemík, AS62F (IMPOL) s tepelným zpracováním. Jedná se o dvě součásti s firemním označením Bridge (můstek) - vpravo a Piston (Píst) - vlevo na fotografii, které jsou znázorněny na obrázku 3.1. Obrázek odpovídá stavu, který je dodáván dodavatelem. Další zpracování těchto polotovarů bude uvedeno v odstavci 3.2. Struktura materiálu od dodavatele by měla podle interních směrnic a standardů vypadat jako na obrázku 3.2.



Obr. 3.1 Píst (vlevo) a můstek (vpravo)



Obr. 3.2 Mikrostruktura slitiny (zvětšení cca 500x) [13]

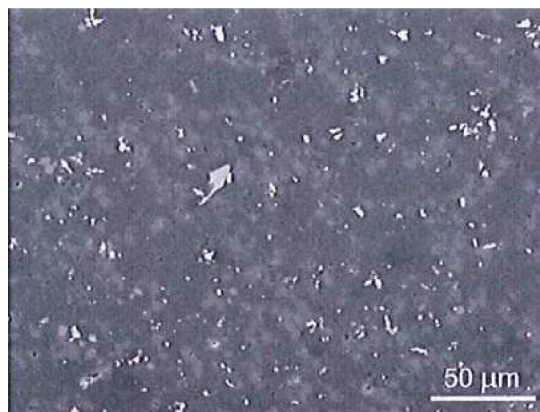
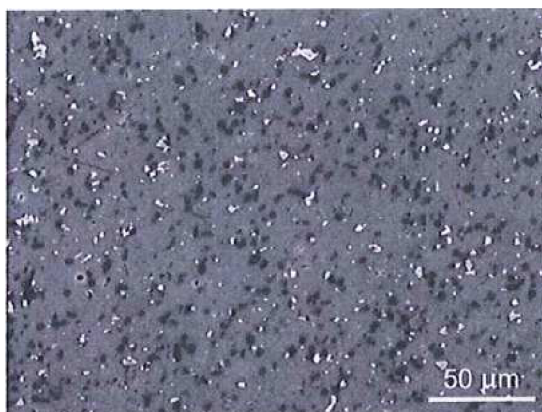


Mikrostruktura slitin Al-Si na odlitky je obvykle tvořena částicemi křemíku uloženými v relativně měkké matici tvořené eutektikem Al-Si, což vede k tomu, že tyto slitiny jsou obecně hůře obrobitelné. Velikost a tvar částic křemíku má vliv na obrobitelnost a je ovlivňována přítomností dalších minoritních příměsí (Fe, Ni) a způsobem odlévání (do formy nebo písku), významnou roli hraje rychlost chladnutí. Za přítomnosti velkých a ostrohranných částic Si je možno očekávat sníženou obrobitelnost.

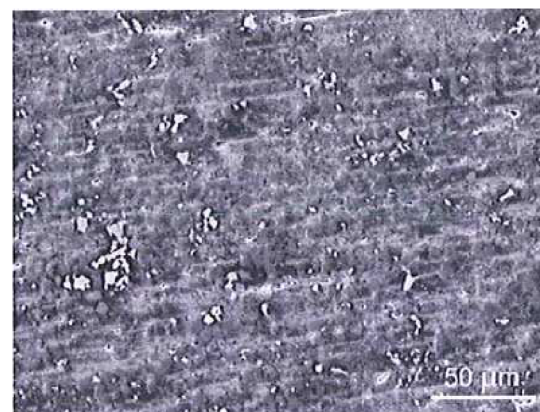
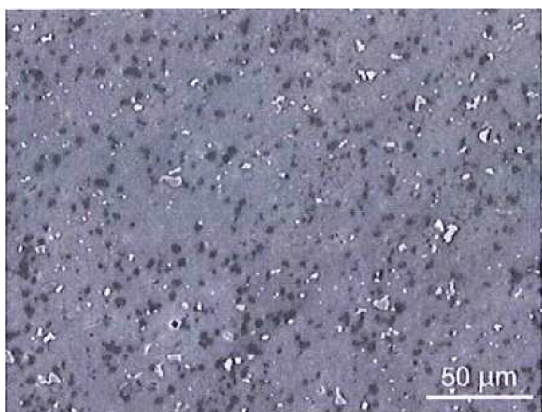
Přítomnost Cu zvyšuje pevnost slitiny a umožňuje její precipitační vytvrzování tvorbou jemných částic  $Al_2Cu$  při tepelném zpracování. Slitiny mají potom vyšší pevnost, ale současně je snížena obrobitelnost slitiny.

Minoritní legury, v tomto případě Fe, Ni a Mg, se mohou projevit tvorbou intermetalických fází např. typu  $Al_3Fe$ ,  $Al_3Ni$ ,  $Al_5FeSi$ ,  $Cu_2Mg_8Si_6Al_5$ ,  $(FeNi)_3Si_2Al_5$  nebo dalších. Intermetalické fáze jsou obecně velmi tvrdé a uloženy v relativně měkké matici Al-Si eutektika mohou snižovat obrobitelnost slitiny. Zvláště pokud jsou velké (desítky mikrometrů) a mají ostrohranný tvar.

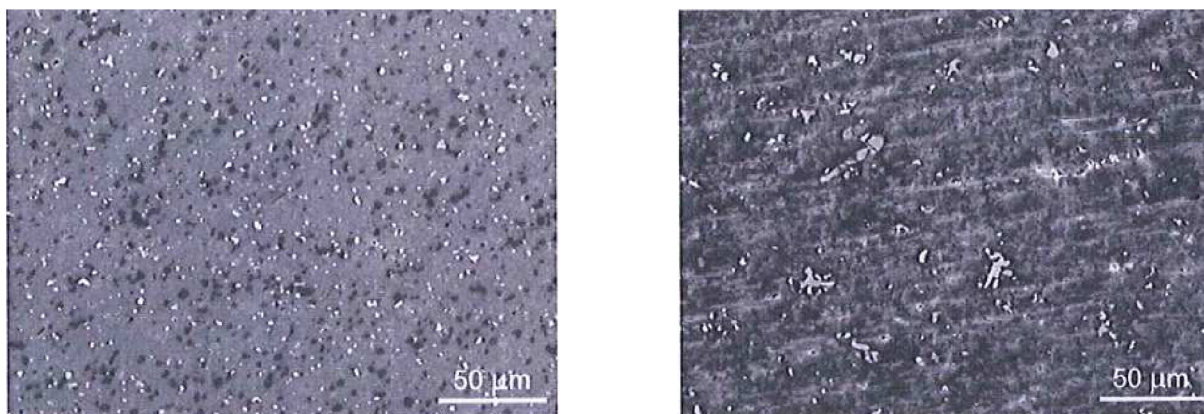
Na obrázcích 3.11 a, b, c jsou snímky odlitků zpracované výzkumným ústavem. Tyto snímky měli dokázat shodnost chemického složení odlitků od firmy Kovošvit mas se standardem Valeo. Snímky jsou ze tří náhodných míst. Tmavé útvary v šedé matici jsou precipitáty Si, světlé útvary jsou intermetalické fáze. Ze snímku je patrné, že mikrostruktura v oblasti Můstku odpovídá mikrostruktuře daného standardu. Mikrostruktura na horní ploše pístu už tomuto standardu neodpovídá. Vyskytují se zde shluky relativně velkých intermetalických fází a množství staženin uspořádaných v řádcích.



Obr. 3.11a První vzorek odlitku se zvětšením 500x (vlevo Můstek a vpravo Písta) [12]



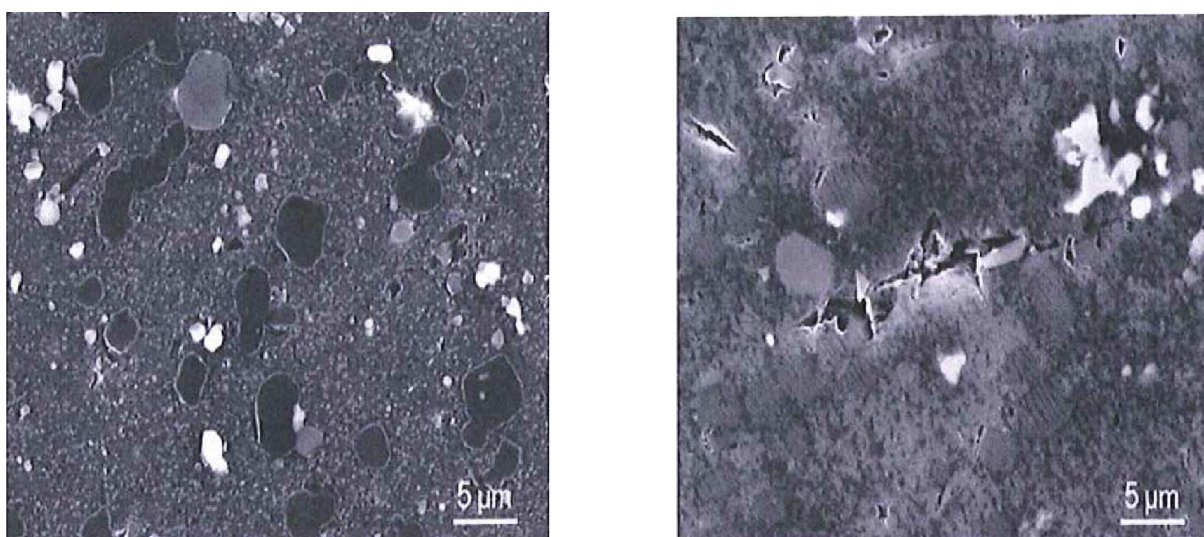
Obr. 3.11b Druhý vzorek odlitku se zvětšením 500x (vlevo Můstek a vpravo Písta) [12]



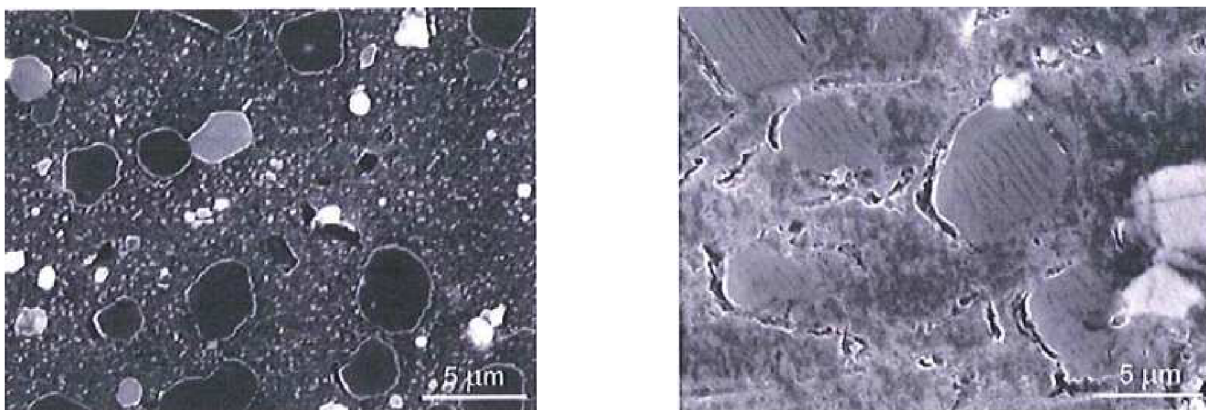
Obr. 3.11c Třetí vzorek odlitku se zvětšením 500x (vlevo Můstek a vpravo Píst) [12]

Posouzení jemné struktury materiálu znázorňuje obr. 3.12, 3.13, kde jsou detailní snímky mikrostruktury při zvětšení 3000x a 5000x. Mikrostruktura Můstku odpovídá správné mikrostruktuře odlitků z tohoto materiálu. Je tvořena oválnými precipitáty primárního křemíku (tmavé částice), které mají velikost 2 – 4 µm a intermetalickými fázemi (šedé a bílé částice) uloženými v matrici tuhého roztoku Al-Si, která je zpevněna jemnými precipitáty vytvrzující fáze Al<sub>2</sub>Cu (velmi malé bílé částice) vyvolanými tepelnými zpracováními.

Mikrostruktura v oblasti Pístu neodpovídá správné mikrostruktuře, jak uvádí standard. Jsou v ni tvořeny staženiny, shluky intermetalických fází a výrazně většími precipitáty křemíku o velikosti 4 - 8 µm s částečnými prasklinami na rozhraní s matricí a matricí tvořenou eutektikem. Precipitáty, které mají za následek zpevňující fázi Al<sub>2</sub>Cu zde nebyly nalezeny.



Obr. 3.12 Mikrostruktura odlitku se zvětšením 3000x (Můstek vpravo, Píst vlevo) [12]



Obr. 3.13 Mikrostruktura odlitku se zvětšením 5000x (Můstek vpravo, Píst vlevo) [12]

### 3.2 TECHNOLOGIE VÝROBY PÍSTU

Jak už bylo zmíněno, tak základní polotovary jsou dodávány dodavatelskou firmou Kovosvit Mas. Dodávají nám dva základní druhy součástí. Značení dle firmy Valeo bridge (můstek) a piston (píst), které jsou již znázorněny na obr. 3.1. Můstek se vyrábí zápusťovým kovááním za tepla a píst je tažen za studena. Tedy pod rekrystalizační teplotou. Výkresová dokumentace těchto součástí je uvedena v příloze č. 1. Tyto polotovary jsou dále zpracovány, než nastane proces svařování svazkem elektronů.

Nejprve začneme stručným procesem zpracování pístu a můstku před svařováním. Na obráběcím centru jsou obráběny vnitřní a vnější plochy pístu. Na můstkách je to obdobně, jsou obrobena na požadovaný tvar s přesností dostatečně velkou, aby mezera mezi pístem a můstkem byla co nejmenší. Kvalita obrobenej plochy musí dosahovat požadované drsnosti pro elektronové svařování, tato hodnota dosahuje  $R_a$  1,6 – 3,2  $\mu\text{m}$ . Tyto obráběcí operace jsou tvořeny na stroji Takamaz X 150 a řezná kapalina pro odvod tepla je Cimstar 41V s koncentrací 4 – 5 %. Po obrobení dosedacích ploch můstku s pístu je nutno provést očištění obrobku. Čištění se provádí ve dvou na sobě závislých pračkách. První z nich je Ecoclean Jeto 84 W od firmy Dürr a hned po ni následuje Compact 600 též od firmy Dürr. Kde teplota dosahuje minimální hodnoty 55 °C. Po důsledném očištění obrobků jsou tyto obrobky naloženy na paletky a pomocí manipulátoru a zautomatizovaném provozu jsou posouvány do pracovní komory svářečky, kde samotný svar trvá přibližně 2 sekundy. Poté vyjede z pracovního prostředí a pomocí dopravníku je dopravena na místo kontroly svaru. Tato kontrola svaru bude podrobněji popsána v následující kapitole. Po svaření polotovarů jsou dále zpracovány na požadované rozměry, drsnosti a další speciální specifikace. Před samotným poteflonováním se povrch součásti zdrsňuje působením vnějších částic, abychom dosáhli lepší přilnavosti při nástřiku teflonu. Při této operaci vycházejí právě na povrch bubliny uvnitř svarového spoje, který je narušen interakcí vnějších součástí při zdrsnění povrchu. Součásti s defektem se stáhnou z výroby. Poté následuje proces nástřik teflonu na součást, abychom dosáhli lepšího tření v komoře pístu kompresoru. Ani tento proces není konečný a následují další operace na obráběcích strojích, aby píst dostal finální podobu. Celý tento proces od polotovaru po konečnou podobu pístu, je schematicky znázorněn na obrázku 3.14.



Obr. 3.14a Polotovary od firmy Kovosvit



Obr. 3.14b Obrobené plochy před svařováním



Obr. 3.14c Svařená součást



Obr. 3.14d Finální píst potažený vrstvou teflonu

### 3.3 ELEKTRONOVÁ SVÁŘEČKA A JEJÍ PARAMETRY

Firma Valeo disponuje dvěma elektronovými svářečkami. Každá z nich má dvě elektronová děla, které svařují zároveň oba konce pístů. První dělo a jeho elektronový parsek je kolmý na svarovou plochu a druhé elektronové dělo je sklopeno o 45°. Jako katoda je zde wolframové vlákno, na které je přivedeno vstupní napětí. Celkové parametry od vstupního napětí, urychlovací proud, čas svařování a jiné důležité vstupní parametry nebudou zveřejněny na úkor společnosti Valeo. Celý proces svařování je plně automatizován. Obrobky, které jsou vyprané před svařováním, jsou pomocí manipulátorů dávány do přípravku, který je pomocí pásového dopravníku dopraví do pracovní komory svářečky. Tam je obrobek uchycen na obou čelech a stlačen. Díky tomuto procesu je vymezena vůle při svařování a hodnota vzdálenosti těchto ploch se blíží k nule. Na obrázku 3.31 je znázorněna pracovní komora svářečky. Součást, obrobené plochy před svařováním a její svarový spoj můžeme vidět na obrázku 3.14c.

Vakuum, které je zapotřebí při svařovacím cyklu, je opatřeno pomocí difúzních vývěv. Toto zařízení je dostatečně výkonné na odčerpání vzduchu z pracovní komory a vytvoření vakua. Proces tvorby v pracovní komoře je rozdělen na dvě části. Na předkomoru, kde se vyčerpá velké množství vzduchu a na hlavní pracovní komoru. V této komoře se musí vyčerpát zbývající plyny, avšak tento proces je velice rychlý, díky využití předkomor a plně automatizaci. Předkomora má tvar tubusu o přibližném průměru 15 cm a délky 30 cm.



Obr. 3.31 Pracovní komora svářečky



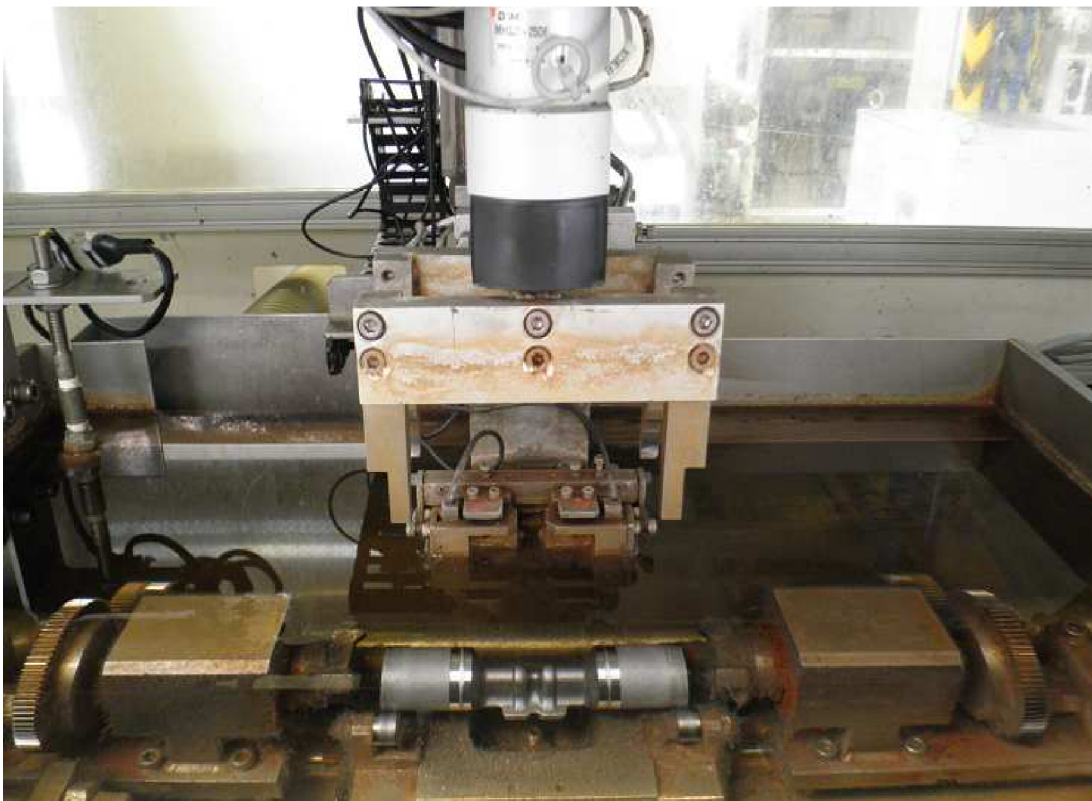
Obr. 3.32 Difúzní vývěva

### 3.4 KONTROLA SVAROVÉHO SPOJE

Každý svařený kus, postupuje pomocí pásového dopravníku na kontrolu svaru. Na této kontrole závisí následný proces součásti. Pokud se ve svarovém spoji objeví bublina, neprovařený kořen a jiný defekt, který může způsobit deformaci součásti v dalším zpracování nebo používání, je tato součást vyřazena z pracovního cyklu a označena jako zmetková. Zkoušení samotného svaru se provádí nedestruktivní zkouškou. Jedná se o metodu ultrazvukovou, kde kontrolovaná součást je ponořena do vodní lázně a několika ultrazvukovými paprsky zkoumána dokonalost svaru a posléze vyhodnocena pomocí počítače.

Během výroby jsou namátkově vybrány kusy, na kterých se provádí další zkouška houževnatosti svaru. Jedná se o destruktivní zkoušku, při které se určuje houževnatost svaru a jeho tahová síla. Hodnoty, kterých by tato zkouška měla dosahovat, jsou jen pro interní použití.

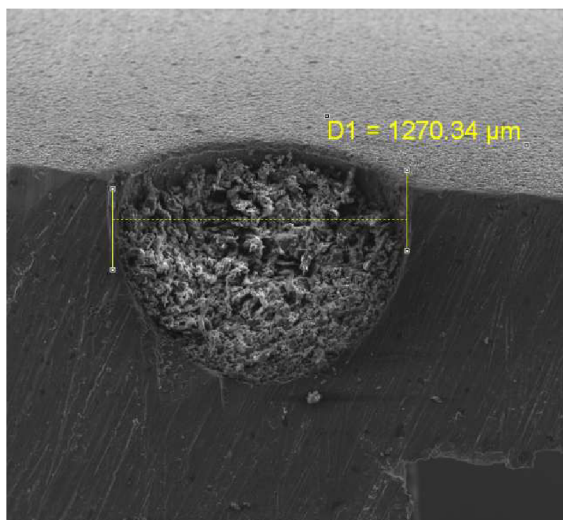
V podstatě je tato zkouška vysoce předimenzována a není to primární faktor vady materiálu, jako bubliny, které vznikají při svařování. Tento proces kontroly svarového spoje ať už nedestruktivní ultrazvukovou zkouškou anebo destruktivním zjištěním pevnosti v tahu jsou velice náročné, obsáhlé a pro naše zadání už nejsou tak podstatné. Naší snahou je dosáhnout lepších vlastností svarového spoje bez vad a defektů.



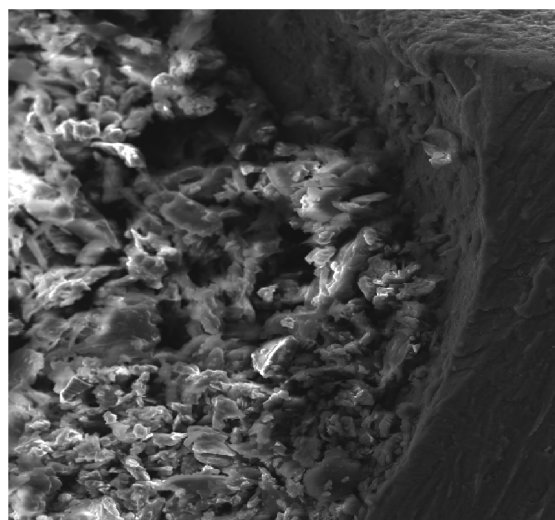
Obr. 3.41 Zařízení pro ultrazvukové zkoušení svarového spoje

## 4 POPIS PROBLÉMU

Hlavním a také nejzávažnějším problémem, kterým se zde budeme zabírat je nevyhovující svarový spoj odlitků pístu do kompresoru osobních automobilů, který je hlavní součástí klimatizace. Tento defekt vzniká ve svarovém spoji, který je vykonán elektronovou svářečkou. Jedná se o vady typu bublin ve svarovém spoji, nedokonalému provaření materiálu a ploch, ke kterým se elektronový paprsek nedostal a vzniká tam nesvařené místo. Místo a tvar svaru je patrný na obrázku 3.14 c. Na Ústavu fyzikálního inženýrství VUT v Brně jsme provedli několik snímků za pomoci elektronového mikroskopu Vega Tescan a optického mikroskopu byly dokumentovány defekty svarového spoje. Bylo nám také umožněno provést metodu LIBS (Laser Inducer Breakdown Spectroscopy) na vzorku pístu s vadou ve formě bubliny. Tato metoda nám odhalí chemické složení materiálu dané součásti před svarem, v místě svaru a za svarem. Výsledná data jsou velice rozsáhlá a bylo by potřeba více času na jejich podrobné zpracování. Na obrázcích 4.1, 4.11 jsou snímky z elektronového mikroskopu, který měl urychlovací napětí 30 kV.



Obr. 4.1 Řez bublinou ve svaru



Obr. 4.11 Detail hrany bubliny

Snímek zachycuje řez vadou na povrchu svarového spoje. Jedná se o bublinu, která má průměr přibližně 1,2 mm. Uvnitř bubliny můžeme ještě vidět nečistoty, které vznikly při svařování a rozříznutí bubliny pomocí pásové pily. Detail hrany bubliny je znázorněn na obrázku 4.11. Tyto vady ve formě bublin jsou asi nejčastějším problémem ve svarovém spoji. Vady typu neprovařeného konce svarového spoje nejsou tak časté. Tyto bubliny mají rozdílný průměr. Od malých průměrů v řádech desetin milimetru až po hodnoty 1,5 mm. Při řešení polohy nejčastějšího místa výskytu trhlin v obvodovém svarovém spoji, nám posloužily hodnoty poskytnuté společností Valeo, která již dříve tento problém řešila. Avšak, nebylo nalezeno žádné místo, které by se lišilo počtem vad v daném sektoru od jiného. Všechny hodnoty jsou přibližně stejné a proto, se jimi nebudeme zabývat. Sektory ve kterém se dělala statistika výskytu defektů svarového spoje, byla rozdělena do 8 míst (po 45°) na čele pístu. Vady nejsou vždy jen na povrchu, ale jsou ukryty i ve svarovém spoji, které pak vyjdou na povrch až po zdrsnění povrchu. Naruší se povrchová struktura materiálu a odhalí nám skryté díry, které byly ukryty pod povrchem. Za první čtvrtletí roku 2011 bylo z celkového množství 2 500 000 ks detekováno 3 500 ks, které měli po svařovacím procesu defekt a byly tak vyloučeny z výrobního procesu. Více fotek, obsahující vadu svarového spoje na pístu jsou v příloze č. 3.

## 5 NÁVRH NA ZLEPŠENÍ

Za vady vzniklé při svařování elektronovým paprskem stojí více aspektů. Podíváme-li se na základní materiál, což jsou odlitky od firmy Kovosvit, a jeho chemické složení dvou základních svařovaných součástí pístu a můstku, viz obrázek 3.1. Bylo zde provedeno několik výzkumných zpráv a rozborů chemického složení pro společnost Valeo. Valeo si nepřeje zveřejnění těchto výsledků, ale hodnoty, které jsou v interních standardech pro chemické složení odlitků, se liší pouze minimálně od hodnot z výzkumných zpráv. Z tohoto důvodu bychom mohli vyloučit jako primární problém vzniku vad, materiál odlitků. Jeho složení je doposud vyhovující. Námí provedená metoda LIBS (Laser Inducer Breakdown Spectroscopy) nám určuje všechny prvky, které jsou obsaženy v této slitině. V této metodě se laserový paprsek střetne se základním materiálem a odpaří v daném místě atomy chemických prvků, které jsou posléze vyhodnoceny počítačem. Pomocí LIBS je možno určit všechny prvky, které základní materiál obsahuje. Jako výsledkem jsou různé vlnové délky, které má každý materiál odlišné. Pomocí těchto délek, je možno s převodní tabulkou určit, o jaké materiály se jedná. Není zde možnost zjistit hmotnostní podíl prvku, pouze zda se v základním materiálu vyskytuje. Výsledky jsou stále zpracovávány a budou poskytnuty společnosti Valeo.

Jako dalším možným nevyhovujícím aspektem pro tvorbu bublin a trhlin ve svarovém spoji může být nečistota na povrchu svařovaného materiálu. Protože před svařováním jsou odlitky obráběny a chlazeny pomocí řezné kapaliny, je nutno tyto plochy důkladně očistit. To se provádí pomocí dvou praček, které by měly odstranit všechny povrchové mastnoty.

Pokud je toto praní součástí nevyhovující a na jejím povrchu jsou zbytky řezné kapaliny ukryté třeba v pórech odlitků, můžou se tyto mastnoty při interakci s elektronovým paprskem proměnit v bubliny plynů, které se nedokážou dostat z materiálu před jeho ztuhnutím. To má za následek vznik bublin uvnitř svarového spoje.

Vakuum a jeho hodnota může negativně ovlivnit šířku svarového spoje a protavení materiálu. Pokud by byla hodnota vakua velmi malá, vzniká problém při fokusaci svazku elektronů. Tento paprsek je ovlivňován okolní atmosférou a není zaostřen. Jeho průměr, který dopadá na základní materiál je větší. To má za následek tavení většího množství materiálu než je nezbytně nutné a vzniku více plynů, které negativně působí na svarový spoj. V našem případě toto nebude hlavní problém. Hodnota vakua se zdá být optimální.

Jedním z hlavních problémů vzniku bublin je z našeho pohledu špatné nastavení vstupních dat. Většinou za tvorbu bublin ve svarovém spoji mohou plyny v čele s vodíkem. Vodík by nám ve svarovém spoji vytvořil bubliny a póry v rádech mikrometrů a ne v našem případě rozměry okolo 1 mm. Vznikala by primárně mikropórovitost na povrchu svarového spoje. Jako dalším důkazem je vznik vad neurčitého tvaru, které jsou spíše způsobeny špatnými hodnotami ve svařovacím programu. Jako další parametr, který by mohl za nekvalitní svar, je šířka svaru. Tuto šířku lze pomocí magnetických čoček fokusovat na minimální vzdálenost. Nyní je tato hodnota, čili šířka svaru 2 mm a to na hloubku svaru, která je něco kolem 3 mm velmi vysoká hodnota. Optimální hodnota by na tuto hloubku svaru byla kolem 0,8 mm. Velká šířka svaru má za následek velké množství protaveného materiálu a větší počet vypařeného materiálu. Z tohoto důvodu je možnost vzniku staženin, bublin uvnitř svarového spoje. Proto je podle nás zvolena jako primární chyba vzniku defektů ve svarovém spoji špatná vstupní data. Svařovací proces by chtělo zpomalit a snížit vstupní hodnoty. Přesné hodnoty nejsou známy. V praxi se vstupní hodnoty volí podle zkoušek, nikoli dle výpočtů.



## 6 ZÁVĚR

Pro zadavatele, společnost Valeo, byla vytvořena bakalářská práce na téma elektronové svařování součásti ze slitiny hliníku. Jejím hlavním cílem bylo prozkoumat vady svarového spoje, analýzu současněho stavu a návrhu na zlepšení. Vady byly zkoumány na elektronovém mikroskopu Vega Tescan a materiálové složení bylo zjištěno pomocí metody LIBS. Tyto zmiňované metody byly provedeny na Ústavu fyzikálního inženýrství na VUT v Brně. Další potřebné informace byly poskytnuty firmou Valeo a konzultace stavu a návrhu na zlepšení probíhala s vedoucím bakalářské práce. Veškeré analýzy a výsledky byly konzultovány a jako hlavním problémem svarového spoje byla stanovena špatná vstupní data pro svařovací proces. Všechna potřebná data budou předána a vysvětlena společnosti Valeo. Problematika tohoto svařovacího procesu je velice rozsáhlá a provedení správné korekce je časově náročné, neboť se jedná i o vady skryté v materiálu a jejich detekce může být obtížná.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvárania*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1989. 384 s. ISBN 80-05-00097-9
2. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľství STU, 2009. 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6
3. KUČERA, Jan. *Teorie svařování – část 1*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1994. 206 s.
4. *Valeohumpolec.cz* [online]. 31.12.2005 [cit. 2011-04-10]. Valeo Compressors. Dostupné z WWW: <<http://www.valeohumpolec.cz/index.php?a=obsah/cs/8.php&nid=8>>.
5. ASM Handbook. *Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6*. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3.
6. ŽÁK, Jan a Miroslav NOVÁK. *Teorie svařování*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988. 142 s.
7. Wehnelt cylinder. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 21 May 2006 , last modified on 18 January 2011 [cit. 2011-04-15]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Wehnelt\\_cylinder](http://en.wikipedia.org/wiki/Wehnelt_cylinder)>.
8. *Labinfo.cz* [online]. 2005 - 2007 [cit. 2011-05-10]. Laboratorní přístroje a zařízení. Dostupné z WWW: <<http://www.labinfo.cz/slevy/laboratorni-pristroje/zlevnene-laboratorni-pristroje/664047-vyveva-olejova-rotacni-bl-8-p.html>>.
9. *Maneko.cz* [online]. 2005-2007 [cit. 2011-05-10]. Difuzní olejová pumpa PDP 100. Dostupné z WWW: <<http://www.maneko.cz/difuzni-olejova-pumpa-pdp-100/>>.
10. AMBROŽ, Oldřich, Jaroslav KUBÍČEK a Bohumil KANDUS. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
11. PTÁČEK, Luďek a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
12. RNDr. Milan Svoboda, CSc., Výzkumná zpráva, *Analýza mikrostruktury odlitku pístu z hliníkové slitiny*, 2009. 7 s.
13. Valeo Compressor Knowledge standard program, *Microscopic examination of compressor parts*. [b.m.]: [b.n.], 2008. 35 s.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
A	Plocha odpaření	[cm <sup>2</sup> ]
ČSN	Česká státní norma	[-]
D <sub>c</sub>	Střední průměr dutiny	[cm]
F <sub>1</sub>	Síla tlaku elektronového děla	[N]
F <sub>2</sub>	Elektromagnetická síla vznikající od proudu paprsku	[N]
F <sub>3</sub>	Síla reakce par kovu	[N]
F <sub>4</sub>	Síla na boční stěny	[N]
F <sub>6</sub>	Gravitační síla	[N]
F <sub>5</sub>	Síla vznikající z povrchového napětí	[N]
G	Rychlost odpaření	[g.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
I	Intenzita proudu v paprsku	[A]
MPa	1 MPa = 10 <sup>6</sup> Pa	[MPa]
N	Newton	[N]
R	Univerzální plynová konstanta	[-]
Ra	Drsnost povrchu	[μm]
R <sub>m</sub>	Pevnost v tahu	[MPa]
U	Napětí	[V]
b	Šířka svaru	[cm]
cm	1 cm = 10 <sup>-2</sup> m	[cm]
g	1 g = 10 <sup>-3</sup> kg	[g]
g	Gravitační zrychlení	[cm.s <sup>-2</sup> ]
h	Hloubka protavení	[cm]
kV	1 kV = 10 <sup>3</sup> V	[kV]
m	Množství par kovu za jednotku času	[g.s <sup>-1</sup> ]
mm	1 mm = 10 <sup>-3</sup> m	[mm]
m <sub>0</sub>	Hmotnost roztaveného kovu	[g]
p	Tlak nasycené páry	[K]
r <sub>0</sub>	Rádus paprsku	[cm]
v	Rychlost molekul vypařujícího se kovu	[cm.s <sup>-1</sup> ]
s	1 s = 1/60 minuty	[s]
σ	Hustota kovu	[g.cm <sup>-3</sup> ]
ψ	Součinitel tvaru svaru	[-]

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č. 1 – Výkres pístu 2D

Příloha č.2 – Fotky z optického mikroskopu (v místě bubliny a v místě nárazu atomů v metodě LIBS)

Příloha č.3 – Vady svarového spoje