VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8

Strojírenská technologie

zaměření : tváření kovů a plastických hmot

katedra tváření a plastů

STUDIUM APLIKACE TECHNOLOGIE PÁJENÍ PŘI ZPRACOVÁNÍ POHLINÍKOVANÝCH PLECHŮ

Josef KŘÍŽ

KPT - 041

vedoucí práce : Ing. Heinz N e u m a n n , VŠST Liberec

konzultant : Ing. František B e r a n , VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh

Počet stran 56

Počet příloh a tabulek 3

Počet obrázků 17

Počet výkresů ..... –

Počet modelů

nebo jiných příloh ..... –

4. června 1982

Vysoká škola: strojní a textilní

Katedra: tváření a plastů

Fakulta: strojní

Školní rok: 1981/82

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Josefa K ř í ž e

obor strojírenská technologie

Protože jste splnil..... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství a kultury o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: Studium aplikace technologie pájení při zpracování pohliníkovaných plechů

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s fyzikálními a fyzikálně-chemickými základy pájení.
2. Seznamte se s dostupnými podklady o pájení povrchově upraveným kovových materiálů.
3. Ve spolupráci s vedoucím práce navrhněte postup experimentálních prací s ohledem na dostupnost pájek a tavidel.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky s ohledem na možnost aplikace v hromadné výrobě.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

Autorské právo se řídí ustanoveními MBK pro státní závěrečné zkoušky č.j. 31 727/62-III/2 ze dne [illegible] 1962 Věstník MŠK XVI [illegible] ze dne 31.3.1962 §17 autorského zákona [illegible]

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran textu, obrázky, tabulky, grafy podle rozsahu provedených experimentálních prací

Seznam odborné literatury:

1. Ruža, V. : Pájení Praha SNTL ALFA 1978
2. ČSN 05 0040 - Názvoslovie zo spájkovania kovou
3. ČSN 05 0041 - Skušanie roztekavosti
4. ČSN 05 0044 - Skušanie mechanických vlastností spájkovaných spojov. Skušanie pevnosti v šmyku.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Heinz Neumann

Konsultanti: Ing. František Beran

Datum zadání diplomového úkolu: 1. 10. 1981 konečné zadání

Termín odevzdání diplomové práce: 4. 6. 1982

L.S.

Doc. Ing. J. Tmej CSc
Vedoucí katedry

Doc. RNDr. B. Stříž CSc
Děkan

V Liberci dne 7. 9. 19 81

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 4. června 1982.

Josef Kříž

O B S A H strana

1. Úvod 6

2. Historický a současný vývoj pájení 7

3. Charakteristika pohliníkovaného plechu typu FAL 9 - 12

3. 1 Pohliníkovaný plech - struktura hliníkového povlaku

4. Vymezení pojmu pájení - fyzikální podstata pájení 13 - 26

4. 1 Povrchové napětí

4. 2. Smáčivost

4. 3 Roztékavost

4. 5 Vzlínavost

4. 6 Velikost kapilární mezery a její vliv na chování pájky

4. 7 Metalurgické reakce při pájení

4. 8 Difuze a rozpustnost

5. Pájení povrchově upravených ocelových plechů 27 - 28

6. Pájky pro pájení hliníku 29 - 33

7. Tavidla pro pájení hliníku 34 - 35

8. Vlastnosti pájených spojů 36 - 39

8. 1 Pevnost v tahu a ve smyku pájeného spoje

8. 2 Pevnost pájených spojů při namáhání ohybem

9. PRAKTICKÁ ČÁST 40 - 44

9. 1 Postup při zkoušení pevnosti ve smyku

9. 2 Zkouška na ohyb podle Bauera

9. 3 Příprava metalografického výbrusu

10. Vyhodnocení měření 45 - 52

10. 1 Pevnost ve smyku pájeného spoje

10. 2 Pevnost v ohybu

10. 3 Metalografické vyhodnocení

11. Zhodnocení výsledků 53

12. Závěr 54

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 - Naměřené hodnoty při pájení pájkou AlSi 12, tavidlem LB 199

Příloha č. 2 - Naměřené hodnoty při pájení pájkou AlSi 12, tavidlem VÚZ 3Al

Příloha č. 3 - Naměřené hodnoty při zkoušce na ohyb

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

např.	- například
apod.	- a podobně
zákl.	- základní
t.j.	- to je
resp.	- respektive
vf.	- vysokofrekvenční
tab.	- tabulka
obr.	- obrázek
příl.	- příloha
R_m	- mez pevnosti v tahu /MPa/
R_e	- mez kluzu v tahu /MPa/
A	- tažnost /%/
F	- síla /N/
σ	-napětí /MPa/
α, ω	- úhel /°/
m	- hmotnost /kg/
t	- čas /s/
x	- dráha /m/
D	- difuzní součinitel
R	- univerzální plynová konstanta
l,s	- délkové míry /mm/
S	- plocha /mm^2/
τ	- smykové napětí /MPa/

ÚVOD

Zhruba v druhé polovině šedesátých let došlo v ČSSR k vyčerpání extenzívních zdrojů rozvoje národního hospodářství. Od té doby je pozornost jak hospodářských orgánů, tak zejména KSČ zaměřena na využívání intenzívních zdrojů, zejména zvyšováním produktivity práce a efektivnosti, hledáním nových technologií a výrobních postupů, jakož i zkvalitnění řízení. Tento trend se objevuje v dokumentech jak XV. a XVI. sjezdu KSČ, tak i v "Souboru opatření ke zdokonalení soustavy plánovitého řízení národního hospodářství po roce 1980".

Splnění závěrů 7. pětiletého plánu za této situace vyžaduje důsledné prosazení výrazného růstu intenzifikace ekonomiky, zvýšení efektivnosti a kvality veškeré práce, efektivních strukturálních změn, především na základě urychlení a maximálního využití výsledků vědeckotechnického rozvoje , prohlubování účasti ČSSR v mezinárodní socialistické dělbě práce, zejména se SSSR a zdokonalování plánovitého řízení se zvyšováním účasti pracujících.

V "Hlavních směrech hospodářského a sociálního rozvoje ČSSR na léta 1981 - 1985" je zdůrazněno, že i nadále zůstává základem rozvoje československé ekonomiky odvětví strojírenství a elektrotechniky, kde se ukládá zvýšení výroby o 33 - 35 %, z toho produktivitou práce o 30 - 32 %.

V duchu naplňování této linie je tato práce zaměřena na použití stávající technologie při zpracování nového materiálu.

2. HISTORICKÝ A SOUČASNÝ VÝZNAM PÁJENÍ

Pájení patří k nejstarším a nejrozšířenějším způsobům zpracování kovů. Tuto metodu používali již staří Egyťané dávno před n. l. a na našem území slavní šperkaři Velkomoravské říše v druhé polovině 9. století. V průmyslové výrobě se datuje rozsáhlé rozšíření a použití této metody až od roku 1930. Čekali bychom, že tak důležitý pracovní úsek bude mít v technickém výzkumu a v technické literatuře význačné místo. Ale není tomu tak, přestože v posledních desetiletích bylo uveřejněno několik základních prací z tohoto oboru a také v odborných časopisech byly popisovány nové metody pájení.

Původně převládal názor, že pájení vyžaduje manuální zručnost pracovníka. Avšak neúspěchy, které se vyskytly při zavádění pájení do výroby v důsledku nedodržení optimálních konstrukčních a technologických podmínek, způsobily jeho pomalé průmyslové uplatnění i v případech, kdy pájení bylo ze všech způsobů nejekonomičtější. Jednotlivá průmyslová odvětví a řemesla obyčejně používají jen několik málo způsobů pájení, které se dědí z generace na generaci a bývají často střeženy jako výrobní tajemství. Teprve v posledních patnácti letech se systematicky zpracovávají všechny poznatky o pájení po vědecké stránce, což umožňuje jeho spolehlivé použití ve všech oblastech průmyslové výroby.

Nejvýhodnější použití pájení je v sériové a hromadné výrobě drobných a středně velkých součástí, kde se vyžaduje vysoká produktivita práce. V úvahu přicházejí výrobky všeobecného a přesného strojírenství, elektrotechnického, chladírenského, spotřebních průmyslu a bižuterie. Výrobky jsou zhotoveny nejčastěji z tenkých plechů, profilů nebo trubek o tlouš-

ťce menší než 2 mm, dále tyčí, drátů a fólií ze železných nebo neželezných kovů.

V současné době se problematice pájení v československém průmyslu věnuje zvýšená pozornost. Je to hlavně tím, že v posledních deseti letech se podstatně změnily ekonomické podmínky (prudké zvýšení cen energie, nedostatek pracovních sil, šetření investicemi) a dochází k přehodnocování efektivnosti již zavedených technologií.

Při komplexním hodnocení možností použití pájení můžeme dojít k závěru, že použitím sice cenné suroviny, t.j. neželezných kovů, zvýšíme náklady na spojovací materiál, ale můžeme ušetřit ve větší míře již výše uvedené základní vstupní faktory. Je to otázka šetření na správném místě.

Vzhledem k tomu, že v národním hospodářství dochází každoročně k velkým ztrátám způsobeným korozí, věnuje se již delší dobu pozornost ochraně materiálů, zejména oceli, pokovováním. V poslední době se ukazuje, že jednou z nejúčinnějších metod ochrany je pokovování hliníkem. Nedořešená je však u nás otázka spojování těchto materiálů s ohledem na efektivnost.

Tato práce si neklade za cíl vyřešit daný problém (zejména pro nedostatek zkušeností, vhodných surovin, zařízení a v neposlední řadě i času), ale chce se pokusit odpovědět na otázku, jaké existují možnosti spojování pohliníkovaných plechů použitím technologie pájení.

3 . CHARAKTERISTIKA POHLINÍKOVANÉHO PLECHU TYPU FAL

Tenký plech FAL, Thyssen, je zastudena válcovaný ocelový plech, který je rekrystalizačně žíhán v průběžné peci a v jednom průchodu ponorným způsobem povlékán hliníkem. Základní plech je vyráběn jako

a) nízkouhlíkový plech,

b) plech obecné konstrukční jakosti.

Obecně se jedná o dva typy povlaků. Hliníkový povlak legovaný Si /plechy FAL 1/ a hliníkový povlak bez Si /plechy FAL 2/.

Obsah Si je 8 - 10 %, proto lze tyto plechy používat v korozním prostředí při vyšších teplotách. FAL 2 je vhodný pro konstrukce vystavené atmosférické korozi.

Výhody hliníkového povlaku:

- výrazná odolnosti vůči korozi a dekorativní vzhled,
- pevnost oceli,
- schopnost odrazu až 80 % tepelného záření,
- při teplotním namáhání plechů s hliníkovým povlakem nastává od 450 °C zřetelný nárůst nalegující vrstvy, která vznikne při aluminizačním pochodu difuzí a vyznačuje se zvýšenou odolností vůči koroznímu působení. Při příslušné teplotě namáhání dochází k prorůstání nalegující vrstvy, které je charakterizováno zbarvením povrchu a snížením schopnosti tepelného záření. Ochrana základního materiálu zůstává i při vysokých teplotách zachována.

FAL 1 lze využít na díly součástí vyráběné tvářením a používané v provozu namáhaném teplem.

FAL 2 pro konstrukce vystavené atmosférické korozi, např. součásti automobilů, izolace teplovodu apod.

Zpracování plechů FAL odpovídá obvyklým metodám zpracování ocelových tenkých plechů. Protože jde o spojení oceli a hliníku, musí se toto brát v úvahu při některých zpracovatelských pochodech. /2/

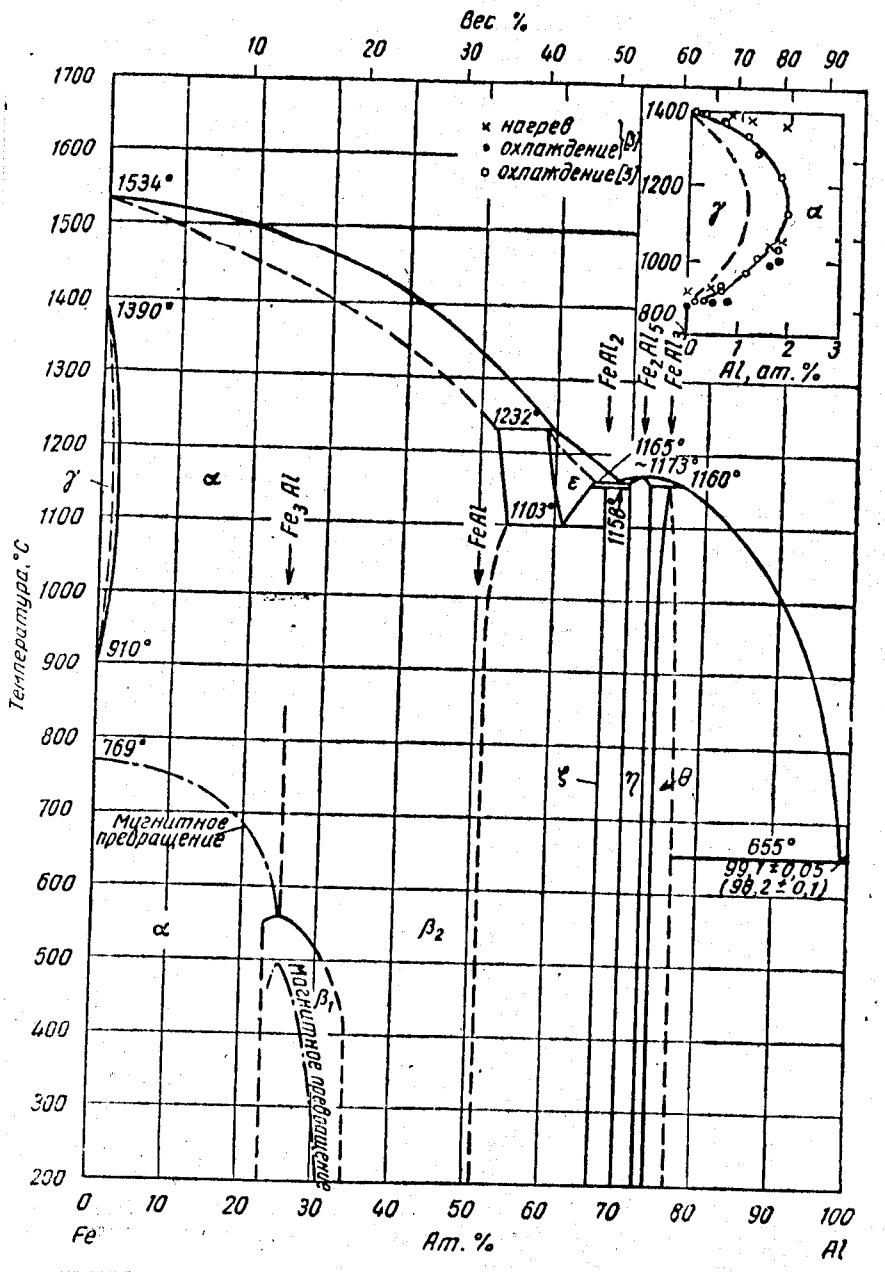
3. 1. POHLINÍKOVANÝ PLECH - STRUKTURA HLINÍKOVÉHO POVLAKU

Při pohliníkování se používá hliníkovací lázeň - 99,5 % hliníku při teplotě 700 °C. Struktura hliníkového povlaku se skládá ze tří složek. Nejblíže k oceli je vrstva směsných krystalů Al - Fe (obsahuje až 35 % Al). Pak následuje intermetalická fáze obsahující $FeAl_3$ a $FeAl_2$. Poslední vrstva je vrstva čistého Al, která ještě obsahuje $FeAl_3$ a $FeAl_2$. Někteří odborníci dokazují, že intermetalická vrstva je vlastně η fáze $FeAl_5$ (viz obr. 1). Jako spojovaní článek mezi základním kovem a povlakem je intermetalická fáze, která je kriteriem pro jakost a vlastnosti hotového výrobku. Vzhledem k tomu, že je velmi křehká, je nutno, aby její tloušťka byla minimální a rovnoměrná. Jedině tak se zabrání oprýskání. Podle zkušeností nesmí tloušťka intermetalické fáze přeshovat hodnotu 50 μm, nejvýše však 70 μm.

S ohledem na mimořádnou reakční schopnost tekutého Al, není vždy lehké dosáhnout shora uvedených podmínek. Rychlost tvorby intermetalické fáze je tak veliká, že uvedená tloušťka se vytvoří již za několik sekund. Reakce pokračuje i po vyjmutí materiálu z lázně až do teploty pod 550 °C. /3/

Růst této vrstvy je především závislý na teplotě a době ponoru. Zásadní vliv obou činitelů je patrný z obrázků 2, ze kterých je patrno, že tloušťka intermetalické fáze stoupá při konstatní teplotě s odmocninou času. Doby ponoru při hliníkování bývají menší než 10 sekund. Pro tuto technologii byl vyvinut pochod "Aludip", který umožňuje vyrobit plech

s výbornou tvářitelností.



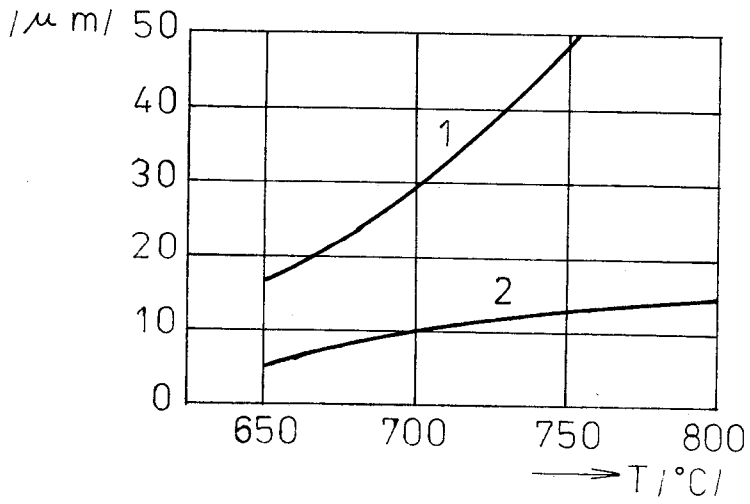
Obr. 1 Rovnovážný diagram Al - Fe

V této práci bylo použito jako základního materiálu pohliníkovaného plechu firmy Thyssen označení K 257.

Mechanické hodnoty tohoto plechu jsou :

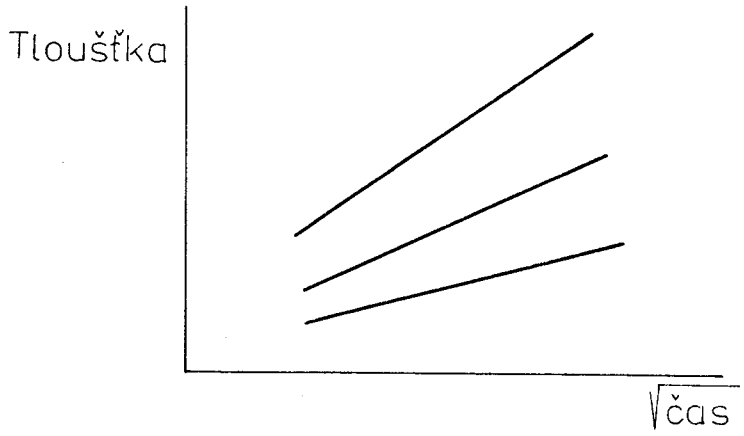
Re	263 MPa
Rm	347 MPa
A	33,3 %

Průměrná tloušťka Al povlaků je 0,044 mm. /4/



Obr. 2 a) Tloušťka intermetalické fáze v závislosti na teplotě

1 - bez Si, 2 - 5 % Si



Obr. 2 b) Tloušťka intermetalické fáze v závislosti na čase

Teplota Al : 1 - 750 °C; 2 - 725 °C; 3 - 700 °C.

4. VYMEZENÍ POJMU PÁJENÍ - FYZIKÁLNÍ PODSTATA PÁJENÍ

Pájení je způsob metalurgického spojování kovových součástí, nebo nanášení pomocí roztavené pájky, přičemž pájené plochy základních materiálů nejsou nataveny, ale jen smáčeny použitou pájkou. /5/

Důležité je jednoznačně odlišit pojmy pájení a svařování: při svařování jde o metalurgické spojení chemicky stejných nebo podobných materiálů pomocí stejných nebo podobných materiálů. Kdežto při pájení nastane metalurgické spojení tím, že pájka, která se taví při nižších teplotách než spojované součásti, tvoří spoj přitom může mít zcela jiné chemické složení než spojovaný materiál. Pájené součásti se tedy netaví, nýbrž se v pájce více nebo méně (ale vždy jen nepatrně) rozpouštějí. /6/

K pájení potřebujeme pájecí látky. Jsou to pájky, tavidla nebo kombinované pájky s tavidly.

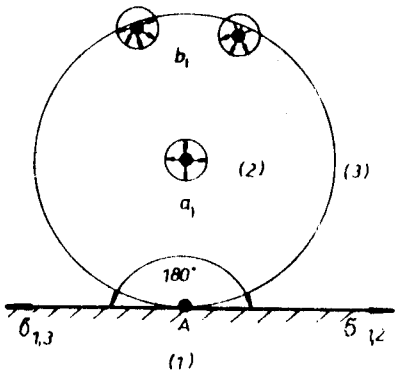
Pájkou rozumíme přídavný materiál používaný při pájení, kterého bod tavení je nižší než bod tavení základního materiálu. /5/ Tavidlo je homogenní směs tavených nebo netavených chemických sloučenin (organických i anorganických), roztok nebo pastovitá emulze látek v rozpouštědle. Úlohou tavidla je rozpouštět oxidy a především bránit jejich vzniku a tím zlepšovat smáčení základního materiálu roztavenou pájkou. /5/

První podmínkou pro vznik spájeného spoje je dobrá smáčivost základního materiálu tekutou pájkou. Povrchové atomy základního materiálu a tekuté pájky se přitom dostanou do tak malé vzdálenosti, že se vytvoří podmínky pro účinek adhezních a kohezních sil. Adhezní povrchové spojení můžeme tak považovat za zvláštní případ pájení.

Další vliv na jakost pájeného spoje má roztékavost a vzlínavost pájky, velikost kapilární mezery spoje, příprava a očištění součásti, způsob ohřevu na pájecí teplotu apod.

4. 1 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ

Povrchové napětí v kapce tekuté pájky je vysvětlováno vzájemnou přitažlivostí mezi různými částicemi tekuté pájky (obr. 3). Přitažlivé síly částic uvnitř tekuté pájky a se navzájem kompenzují. Síly, které na tyto částice působí ze všech stran, jsou stejné a jejich výslednice je rovna 0. Proto se na jejich přemístění uvnitř tekuté pájky nespotřebuje žádná práce. Na částice b, které jsou na povrchu tekuté pájky, ve spodní části působí přitažlivé síly molekul pájky, které se jich dotýkají, ale na jejich vrchní část tyto síly nepůsobí.



Obr. 3 Schematické znázornění povrchového napětí pájky
a - uvnitř tekutiny; b - na jejím povrchu;
1 - základní materiál; 2 - pájka; 3 - atmosféra.

Povrchové napětí tady vzniká tím, že molekuly na povrchu tekuté pájky b nejsou ze všech stran obklopeny jinými molekulami téhož druhu. Molekuly b jsou vtahovány molekulovými silami do vnitřku pájky a jsou pod vlivem jednosměrné přitažlivosti směřující kolmo na povrch tekuté pájky. Povrch tekuté pájky má tedy proti vnitřku přebytek energie. Nabude-

li kapka tekuté pájky dokonalého kulového tvaru, dojde ke snížení tohoto přebytku energie, protože tento tvar má v daném objemu ze všech geometrických útvarů nejmenší povrch. Vlivem povrchového napětí má tedy povrch snahu stáhnout se na nejmenší plochu. Výsledkem sil působících na povrch tekuté pájky je snaha dosáhnout co nejmenšího povrchu pájky. Tento jev nazýváme povrchovým napětím. /1/ Povrchové napětí tedy definujeme jako sílu působící kolmo na délkovou jednotku povrchu v jeho rovině.

Povrchové napětí pájek pro určitou teplotu a kapilární mezeru zjišťujeme pomocí kapilární vzlínavosti. (viz kap. 4. 5). Obecně povrchové napětí klesá s rostoucí teplotou. Kromě teploty má na velikost povrchového napětí pájky vliv také složení tavidla, redukční atmosféry, stupeň vakua, ale i malá množství povrchově aktivních prvků pájky. Porchové napětí pájky při pájení tedy ovlivňuje tedy jak smáčivost a roztékavost pájky na povrchu tuhého základního materiálu, tak i vzlínavost pájky v mezeře spoje.

4. 2 SMÁČIVOST

Smáčivost je schopnost tekuté pájky nebo tavidla přilnout k povrchu základního materiálu při určité teplotě. /5/ Při smáčení kapka tekuté pájky nabude takového tvaru, aby povrchová energie systému pájka - základní materiál - tavidlo - atmosféra (vakuum), byla minimální a mohou zde tedy působit meziatomové síly. Smáčení nastává jen tehdy, jestliže se změnou povrchového napětí při styku látek uvolní energie. Podle H. Umstättera je pro smáčivost směrodatný kmitočet tepelného kmitání atomů a molekul stýkajících se fází. Při velkých rozdílech těchto hodnot je smáčení nemožné. /6/

V místě A (obr. 4) působí na kapku pájky tři druhy sil:

F_1- přitažlivé síly atomů povrchové vrstvy tuhého materiálu a tekuté pájky - adhezní síly;

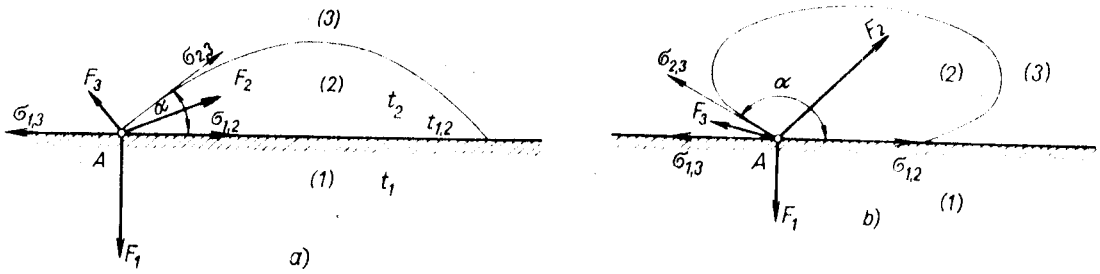
F_2- přitažlivé síly sousedních atomů v tekuté pájce - kohezní síly;

F_3- přitažlivé síly atomů plynného prostředí.

Na základě působení jednotlivých druhů sil jsou možné dva případy:

- dokonalá smáčivost; kohezní síly jsou menší než adhezní,
- nesmáčivost; kohezní síly jsou větší než adhezní.

Vliv působení povrchového napětí v místě styku tuhého základního materiálu - tekuté pájky - atmosféry na smáčivost znázorňuje obr. 4.



Obr. 4 Schematické znázornění smáčivosti

a - dobrá smáčivost; b - špatná smáčivost;

F_1- přitažlivé síly sousedních atomů základního materiálu 1;

F_2- přitažlivé síly sousedních atomů tekuté pájky 2;

F_3- přitažlivé síly sousedních atomů plynu;

α- úhel styku;

$\sigma_{1,2}$- mezipovrchové napětí mezi základním materiálem 1 a pájkou 2;

$\sigma_{1,3}$- mezipovrchové napětí mezi základním materiálem 1 a atmosférou 3;

$\sigma_{2,3}$ - mezipovrchové napětí mezi pájkou 2 a atmosferou 3.

Mírou smáčivosti je stykový úhel α, který svírá tečna povrchu pájky v místě styku se základním materiálem. Tento úhel vyhovuje rovnici

$$\sigma_{1,2} + \sigma_{2,3} \cos\alpha - \sigma_{1,3} = 0 . \qquad (1)$$

Tuto rovnici nazýváme základní rovnicí smáčení. Z této rovnice pro stykový úhel α vyplývá

$$\cos\alpha = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{1,2}}{\sigma_{2,3}} = \frac{\sigma_H}{\sigma_{2,3}} . \qquad (2)$$

Mezipovrchové napětí $\sigma_{1,3}$ podporuje roztékání pájky. Mezipovrchové napětí $\sigma_{1,2}$ naopak podporuje smršťování pájky. $\sigma_{1,3} - \sigma_{1,2}$ nazýváme adhezní napětí σ_H. Smáčení nastává, jestliže $\sigma_{1,3} > \sigma_{1,2}$, t.j. je-li $\cos\alpha > 0$, $0^\circ > \alpha < 90^\circ$. Pro kapilární pájení je nutná dokonalá smáčivost, t.j. $\alpha < 20^\circ$.

Zlepšení smáčivosti pájky se dá dosáhnout snížením hodnoty mezipovrchového napětí $\sigma_{1,2}$, $\sigma_{1,3}$ tavidlem, ochrannou atmosférou, velikostí teploty pájení nebo legujícími přísadami pájky. Příznivý vliv na smáčivost má též zvýšení mezipovrchového napětí $\sigma_{1,3}$, nebo adhezního napětí σ_H.

U materiálů s vysokou tepelnou vodivostí, například Cu, Al apod., musí být teplota pájeného povrchu před stykem s roztavenou pájkou rovna teplotě solidu pájky. Tato teplota se nazývá smáčecí teplota a je to minimální teplota pájené plochy, při které ji tekutá pájka smáčí bez toho, aby se roztekla /5/ . Tato podmínka vyhovuje nánosovému pájení.

Pro kapilární pájení je nutné i tečení pájky. Proto teplota pájeného povrchu má být nejen nad solidem, ale i nad likvidem použité pájky. /1/

Řadou pokusů bylo zjištěno, že tekutá pájka smáčí základní materiál pouze tehdy, když se vytvoří mezi některými prvky pájky a základního materiálu buď tuhý roztok, nebo intermetalické slitiny, přičemž vzájemná rozpustnost spojovaných kovů může být jen nepatrná. Pájka, která se se základním materiálem v tuhém stavu vzájemně nerozpouští, také základní materiál nesmáčí. /1/ Se stoupající vzájemnou rozpustností pájky a základního materiálu se smáčivost zlepšuje, ale roztékavost pájky se snižuje.

4. 3 ROZTÉKAVOST

Roztékavost je schopnost tekuté pájky nebo tavidla roztékat se při určité teplotě na vodorovném povrchu základního materiálu. /5/

Zkoušení roztékavosti se provádí dle /7/. Na zkoušení roztékavosti pájky se použije základní materiál a tavidlo uvedené v příslušné normě jakosti pájky. Pájení vzorků se dělá v elektrické odporové peci s normální atmosférou, s regulací teploty $\pm$ 5 ^{o}C. Použije se vzorek o rozměrech 35 x 35 x 1 mm, 1 g pájky a 0,5 g tavidla. Zkušební teplota pájení je 50 ^{o}C nad likvidem použité pájky. Zkouška se vyhodnotí měřením plochy roztečení pájky v mm^2.

4. 5 VZLÍNAVOST

Vzlínavost je schopnost tekuté pájky vyplnit při určité teplotě úzkou mezeru spoje působením kapilárních sil. /5/ Postupující čelo pájky je v důsledku povrchového napětí zakřiveno do tvaru "menisku", to je příčinou vzniku hnací kapi-

lární síly.

Zkoušení kapilarity se provádí dle /8/. Na zkoušení kapilarity se použije základní materiál a tavidlo uvedené v příslušné normě jakosti pájky. Pájení vzorků se provádí v elektrické odporové peci s normální atmosférou a s regulací teploty ± 5°C. Na zkoušku se použije vzorek složený ze dvou plechů o tloušťce 2 mm, vystřihnutých z jedné tabule. Dolní hrana jednoho plechu je opracovaná tak, aby se vytvořila mezera ve spoji. Pro cínové pájky je mezera 0,1 mm a pro hliníkové pájky 0,4 mm. Ohnutím jednoho pásu se dosáhne jeho stabilita na druhém plechu, na kterém je volně položený. Pájka o hmotnosti 0,5 g a tavidlo o hmotnosti 0,5 g ve tvaru pasty se položí na okraj jedné strany vzorku. Tento vzorek se vloží ve vodorovné poloze do vyhřáté pece. Zkušební teplota pájení je 50 °C nad likvidem pájky. Zkouška kapilarity se vyhodnotí v mm délky zatečení ve spoji.

K vzlínavosti pájky dojde i mimo kapilární mezeru a projeví se na povrchu součásti. Poněvadž roztavená pájka smáčí hladký lesklý povrch součásti obtížněji, neroztéká se pájka ihned. Jestliže je povrch součásti zdrsněn např. drátěným kartáčem, stopami po soustružení, hrubém broušení nebo pískování, šíří se pájka po roztavení z místa svého uložení dobře nejen do spoje, ale i po povrchu základního materiálu i tam, kde to není žádoucí. Šíření pájky po povrchu součásti lze omezit například těmito prostředky:

- použití hladkých či vyleštěných ploch pájených součástí,
- použití správného množství pájky pro spoj, přebytek pájky usnadňuje její šíření,
- vhodným umístěním pájky, popřípadě do skrytých vybrání,

- volbou správného času pájení,
- volbou správné pájecí teploty, zvýšená pájecí teplota usnadňuje šíření pájky,
- zmenšením obsahu redukčních složek ochranné atmosféry,
- použitím umělých překážek, jako např. past z kysličníků obtížně redukovatelných kovů,

Jestliže nebylo možno použít žádného z uvedených prostředků pro omezení šíření pájky a pájka by byla při dalším zpracování na závadu, může se z povrchu dodatečně odstranit. Toto se provádí broušením, mořením nebo elektrolyticky. Způsob je závislý na přístupnosti místa, rozsahu a množství přebytečné pájky. /9/

4. 6 VELIKOST KAPILÁRNÍ MEZERY A JEJÍ VLIV NA CHOVÁNÍ PÁJKY

Jakmile se pájka uložená v místě spoje roztaví a počne smáčet základní materiál, vniká do kapilární mezery a vzlíná. Šíře kapilární mezery je důležitým činitelem pro vzlínání roztavené pájky, a je význačným rysem procesu pájení.

Kapilární mezera je příznivá tehdy, zaplní-li pájka celou plochu spoje. Tudíž je třeba, aby kapilární mezera vyhovovala svými rozměry požadavkům zvolené pájky. Pro pájky hliníkové (slitina hliník - křemík) je používaná velikost mezery 0,15 - 0,6 mm, přičemž platí, čím delší spoj tím větší mezera. /9/ U příliš velké kapilární mezery má pájka sklon vyplňovat mezeru pouze v některých místech a výsledkem je nedokonalý popř. i netěsný spoj, jehož pevnost je také menší. Při pájení různých kovů je třeba počítat se změnou rozměrů mezery tepelnou roztažností, a proto i se změnou mezery při ohřevu na pájecí teplotu.

Velikost kapilární mezery závisí na řadě činitelů, např. :

- druh, popř. kombinace pájených materiálů. Jimi je určována velikost kapilární mezery za teploty okolí a teploty pájení. Zmenšení kapilární mezery během chladnutí součásti nezpůsobí poškození spoje, ale její zvětšování vlivem nestejnoměrné smrštivosti působí za tepla nepříznivé tahové namáhání pájky ve spoji,
- stav povrchu pájených kovů v místě spoje. Příznivější je poměrně hrubý styčný povrch kovů,
- nejvýhodnější pevnost spoje. Pevnost spojů v závislosti na kapilární mezeře není pro všechny pájky stejná,
- druh pájky. Pájkou je určována viskozita a kapilární vzlínavost pájky v tekutém stavu, povrchové napětí pájky k povrchům pájených kovů, vzájemná rozpustnost pájených kovů a pájky apod.,
- pravidelnost kapilární mezery. Jestliže se pro použitou pájku kapilární mezera příliš zmenší, pájka spojem nepronikne a naopak , je-li kapilární mezera příliš velká, pájka se v ní neudrží a mezerou proteče. /9/

4. 7 METALURGICKÉ REAKCE PŘI PÁJENÍ

Slitina, která vyplňuje pájené mezery je výsledkem spojovacího a difuzního pochodu. Podle druhu pájky a základního materiálu může na hranici jejich styku nastat některá z těchto reakcí /1/ :

- adhezní spojení /nedochází k vzájemné rozpustnosti pájky a vzájemného materiálu/,
- vzájemná difuze pájky a základního materiálu,
- rozpouštění základního materiálu použitou pájkou,

- reakce složek pájky s povrchovým oxidem základního materiálu.

Ve většině případů se vytvoří přechodové oblasti určité tloušťky, které mají jiné chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti než spojované materiály. Vlastnosti vzniklé přechodové oblasti určují užitné vlastnosti pájeného spoje.

V podstatě jsou ve spoji tyto vrstvy:

- základní materiál s nezměněným chemickým složením. U tohoto kovu může nastat přeměna krystalů buď rekrystalizací nebo překrystalizací;
- přechodová difuzní vrstva vytvořená vniknutím pájky do tuhého základního materiálu a někdy i difuzí po hranicích zrn;
- přechodová difuzní vrstva na straně pájky;
- pájka s nezměněným chemickým složením.

Všechny čtyři vrstvy nemusí být v každém pájeném spoji; někdy je lze dokonce určit jen mikroskopem. Druhá vrstva vzniká poměrně zřídka, třetí a čtvrtá vrstva se někdy neliší, a to proto, že buď difuze proběhne celou tloušťkou pájeného spoje, anebo že se třetí vrstva omezuje na tloušťku několika mřížkových parametrů. Při posuzování struktury pod mikroskopem, je třeba si připomenout, že hranice rozlišitelnosti leží při několika tisících mřížkových parametrů, takže atomy základního kovu musí za poměrně krátkou dobu pájení urazit značnou dráhu, aby i při největším zvětšení byl účinek viditelný. /6/. Charakter a jakost přechodových oblastí spojů můžeme zjistit buď mikroskopem (elektronovým, optickým) nebo spektrální mikroanalýzou apod. Při zjišťování struktury pájky nebo přechodových oblastí jsou velmi užitečné rovnovážné diagramy, jejich nevýhodou je ale to, že

poskytují pouze rovnovážný stav daný podmínkami pájení.

Užitné vlastnosti pájeného spoje výrazně ovlivňuje přítomnost intermediálních fází. Na hranici základního materiálu a pájky může vzniknout jedna nebo více těchto fází. Toto může probíhat třemi způsoby /1/ :

- částečným rozpuštěním základního materiálu v tekuté pájce s následujícím vyloučením intermediální fáze na hranici pevného základního materiálu. Primárně vyloučená fáze se může např. při peritektické reakci změnit v jiný typ,
- vzájemnou reakcí základního materiálu a tekuté pájky,
- ochlazováním pájeného spoje nebo jeho následujícím tepelným zpracováním.

Možnost vzniku intermediálních fází je závislá také na vzájemné rozpustnosti pájky a základního materiálu. Omezenou vzájemnou rozpustností pájky a základního materiálu vznikne ostře ohraničený přechod. Přechodová oblast je tím širší čím je větší jejich vzájemná rozpustnost.

4. 8 DIFUZE A ROZPUSTNOST

Spojení nemá nastat hlubokým protavením pájky a základního materiálu; pochody mají proběhnout pouze na povrchu základního materiálu a také tekutá pájka se má podílet pouze svými vnějšími vrstvami. K tomu přistupují tavidla jako další tavenina, vzduch, ochranný plyn nebo spalné plyny jako plynná fáze.

Nejčastější atomová mřížka technicky běžných kovů je krychlová, plošně středěná. Představujeme-li si atomy jako koule, které se navzájem dotýkají, pak se každý atom uvnitř čistého krystalu dotýká dvanácti sousedních atomů. Nejtěsnější vzájemné uložení atomů podmiňuje soudržnost.

Již při malých vzdálenostech kulových ploch od sebe klesají značně síly soudržnosti. Nedokonalý styk atomů je poměrně častý. Žádný krystal nemá prostorovou mřížku zcela dokonalou. Ve větší míře to platí pro mezikrystalické vrstvy, t.j. pro místa, v nichž dvě uspořádané mřížky různé orientace na sebe narážejí. Zde také nacházíme shluky cizích atomů - "mezikrystalické látky", jimiž jsou mezikrystalické vrstvy charakterizovány jakožto místa zmenšené soudržnosti. Zvláštní úloha připadá těm atomům, které tvoří povrch kovu. Zde je mřížková stavba náhle přerušena. U jemně krystalických látek je povrch hladký jen na těch místech, na nichž náhodou okrajová vrstva zrna, např. plocha krychle, souhlasí s povrchem. Jinak je mřížka terasovitě lomena.

Atomy, které leží na povrchu, nemají tedy nikdy zmíněných dvanáct styčných bodů se sousedními atomy, nýbrž je jich podle polohy atomu v plochách, hranách nebo rozích více nebo méně, např. v rozích jen 3, v plochách osmistěnu je ještě 9 spojů.

Každá z přitažlivých sil, která není vyrovnána jinou vnitřní silou, projevuje se navenek jako "afinita" v chemickém smyslu. Totéž platí v podstatě o jiných druzích mřížek. Atomy ve vrcholech mřížky nejsou v klidu, ale stále kmitají a jejich kinetická energie je dána teplotou. Tyto kmity mohou být tak velké, že atom jedné mřížky si vyměňuje místo s atomem mřížky druhé. Tento jev se nazývá samodifuze. /6/ Na přechodových vrstvách, avšak i uvnitř krystalu je ještě dosti silná.

Přiblíží-li se obě sousední fáze dostatečně blízko, splní nejdůležitější předpoklad pro reakci v přechodových vrstvách. Přitom se k jedné zúčastněné pevné fázi musí

na vzdálenost mřížky přiblížit fáze jiná, tuhá, kapalná nebo plynná. Je-li splněna ještě řada jiných podmínek, které jsou shrnuty pod názvy "afinita" a "rozpustnost", začnou pronikat zúčastněné látky - nastává difuze. /6/

Platí tu obecné zákony difuze. První Fickův zákon praví: Rychlost difuze jedné látky směrem x je úměrná změně koncentrace rovněž směrem x.

$$\frac{dm}{dt} = - D \frac{\partial c}{\partial x} \qquad (3)$$

dm - množství hmoty difundující za dobu dt,

∂c - koncentrační spád na dráze ∂x,

D - difuzní součinitel nebo-li difuzní konstanta.

Tento zákon vyjadřuje skutečnost, že tok se zmenšuje tím více, čím více se složení (pájky a základního materiálu) přibližuje homogennímu stavu. Tento zákon předpokládá, že koncentrace v daném místě je konstantní. Mění-li se koncentrace, platí druhý Fickův zákon : Časová změna koncentrace je úměrná rychlosti, kterou probíhá změna koncentrace směrem x.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \qquad (4)$$

Difuzní konstanta není závislá v tomto případě na koncentraci. Na difuzi má velký vliv teplota, jak to vyznačuje závislost difuzní konstanty D na absolutní teplotě.

$$D = A \cdot e^{-\frac{U}{RT}} \qquad (5)$$

R - plynová konstanta

A, U- materiálové konstanty

Difuzní konstanta se s teplotou značně zvyšuje.

Difuze v pájeném spoji mění chemické složení pájky a tím

i chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti základního materiálu.

Pronikání pájky na hranicích zrn základního materiálu má v některých případech za následek tzv. pájecí praskavost. Pájka se dostane mezi jednotlivá zrna základního materiálu a tím poruší jeho soudržnost.

Ruční pájení spojů s poměrně velkou mezerou podporuje zmíněnou pájecí praskavost, protože se obtížně dodržuje pájecí teplota a doba pájení. Pájecí praskavosti se dá zabránit podstatným snížením rychlosti difuze složek pájky podél hranic zrn nebo předchozím žíháním na odstranění vnitřního pnutí základního materiálu. Zmenšení rychlosti difuze se dosáhne snížením pracovní teploty a doby pájení.

5. PÁJENÍ POVRCHOVĚ UPRAVENÝCH OCELOVÝCH PLECHŮ

a) Pájení pozinkovaného ocelového plechu

Pozinkovaný ocelový plech se vyrábí převážně ponořením plechu do roztaveného zinku. V části povlaku s velkým obsahem zinku, t.j. nad 70 %, se vyskytuje několik druhů intermediálních krystalů, tavících se při různých teplotách. Tyto krystaly dále vytvářejí ve struktuře peritektické obálky. Intermediální fáze jsou křehké, a proto se musíme snažit, aby byly co nejtenší, tvoří nejvýš polovinu tloušťky celého povlaku, který měří normálně 0,1 mm. Pozinkovaný plech se často pájí cínovou pájkou, obvykle se používá pájek B - Sn 25 Pb ÷ B- Sn 30 Pb, v posledních letech také B - Sn 4 Pb; pro tuto pájku se volí nejčastěji plamen. V současné době se k pájení s úspěchem používá čistého zinku (B - Zn 98). Jako tavidlo se používá chlorid zinečnatý, k němuž se přidává větší množství salmiaku a jiných solí. /6/

b) Pájení pocínovaných plechů

Pocínovaný plech se vyrábí tak, že se ocelový plech ponoří do roztaveného cínu. Když Fe a Sn na sebe působí při teplotách, které jsou o něco vyšší než tavící teplota cínu, vzniká sloučenina $FeSn_2$, obsahující 81,5 % Sn. Tato sloučenina byla zjištěna v cínovém povlaku. Pájení pocínovaného plechu se provádí jen pomocí cínových pájek, počínaje druhem B - Sn 8 Pb, lépe však druhem B - Sn 25 Pb. Nejčastěji se používá B - Sn 30 Pb a především B - Sn 40 Pb. Většina světově vyrobeného pocínovaného plechu se zpracovává na konzervové krabice a konve. Výroba je hromadná a pájí

se na zvláštních pájecích strojích. /6/

c) Pájení poolověných a jinak plátovaných ocelí

Poolověný ocelový plech se vyrábí podobně jako pocínovaný plech. Drobné předměty se mohou poolovit pomocí "poolovovacích hmot", tyto jsou složeny z olověného prášku a tavidla. Poolověný plech se pájí jako pozinkovaný plech cínovou pájkou B - Sn 30 Pb. Lze je pájet i čistým olovem.

Ocele plátované niklem, nerezavějící ocelí, mědí, slitinami mědi a stříbra, s naválcovaným povlakem nebo plátované jiným postupem se pájí velmi zřídka. Musí-li se však pájet, použije se metod vhodných pro kovy, jimiž je ocel plátována.

d) Ocelový plech plátovaný hliníkem se však nemůže pájet tak, jako oba kovy; musí se pájet jako Al, důležité je, aby se při pájení nepoškodila hliníková vrstva. Podle jednoho staršího návrhu se má hliníková vrstva odstranit a takto odkrytá plocha se má pocínovat ponořením do roztaveného cínu, pak se může pájet cínovou pájkou. Ale tento postup nelze příliš doporučovat. /6/

6. PÁJKY PRO PÁJENÍ HLINÍKU

Jak už bylo uvedeno dříve, řadou pokusů bylo zjištěno, že tekutá pájka smáčí tuhý základní materiál pouze tehdy, když se vytvoří mezi některými prvky pájky a základního materiálu buď tuhý roztok nebo intermetalické slitiny, přičemž vzájemná rozpustnost spojovaných materiálů může být jen nepatrná. Proto v pájce na pohliníkovaný plech K 257 musí být obsaženy prvky, které tvoří s Al tuhý roztok nebo intermetalické slitiny. (viz tab. I).

Tab. I. Vztah mezi prvky základního materiálu a některými prvky pájek ve stykové oblasti spoje podle binárních rovnovážných diagramů (Metals - Handbook).

Základní materiál - pájka	Ve stykové oblasti spoje vzniknou	Dvojice prvků základ. mat. - pájka
úplná rozpustnost v tekutém stavu, částečná rozpustnost v tuhém stavu	tuhé roztoky s eutektikem + intermediál. fáze	Al - Si, Al - Be, Fe - Ti
	+ eutektická a peritektická reakce	Al - Fe, Al - Li, Al - Ni, Al - Zn, Al - Mn, Al - Ag, Al - Cu
Úplná rozpustnost v tekutém stavu, nerozpustnost v tuhém stavu	krystaly komponent s eutektikem	Al - Sn
	+ 1 nebo více intermediál. fází	Al - Sb, Fe - Si
	s peritektickou reakcí	Fe- Zn, Fe-Sb, Fe - Sn,
Částečná rozpustnost v tekutém stavu, úplná nerozpustnost v tuhém stavu		Al - Cd, Al - Pb

Základními prvky, které by měla tedy obsahovat pájka na pohliníkovaný plech, jsou dle tab. I tyto prvky: Sn, Zn, Si, Al, Ag, Sb, Cu, Cd, Pb. Špatná smáčivost a roztékavost pájky na tuhém základním materiálu se dá zlepšit přidáním malého množství legující přísady, např. Pd, Li, Ni, Mn, Be apod. Pro pájení se používá pájek s co nejmenším intervalem tavení (pokud možno eutektické složení).

Základním požadavkem kladeným na pájky pro hliník je vznik difuzních mezivrstev pájeného spoje, dobrá korozní odolnost spoje. Adhezní spoje bez difuzní oblasti můžeme považovat pro hliník a jeho slitiny za nevhodné. Každá pájka obsahuje zpravidla větší nebo menší množství některého prvku, který tvoří se základním materiálem "mezičlánek".- jde tedy o difuzní pájku.

Měkké pájky na hliník se rozdělují takto /1/ :

- pájky nízkoteplotní s teplotou pájení do 270 °C,
- pájky střednědteplotní s teplotou pájení 270 - 400 °C,
- pájky vysokoteplotní s teplotou tání 400 až 500 °C.

Základ měkkých nízkoteplotních pájek na hliník tvoří kovy s nízkou teplotou tání (Sn, Pb, Cd), přičemž pájka může obsahovat minimální množství kovů s vyšší teplotou tání.(Zn, Cu, Al atd.).

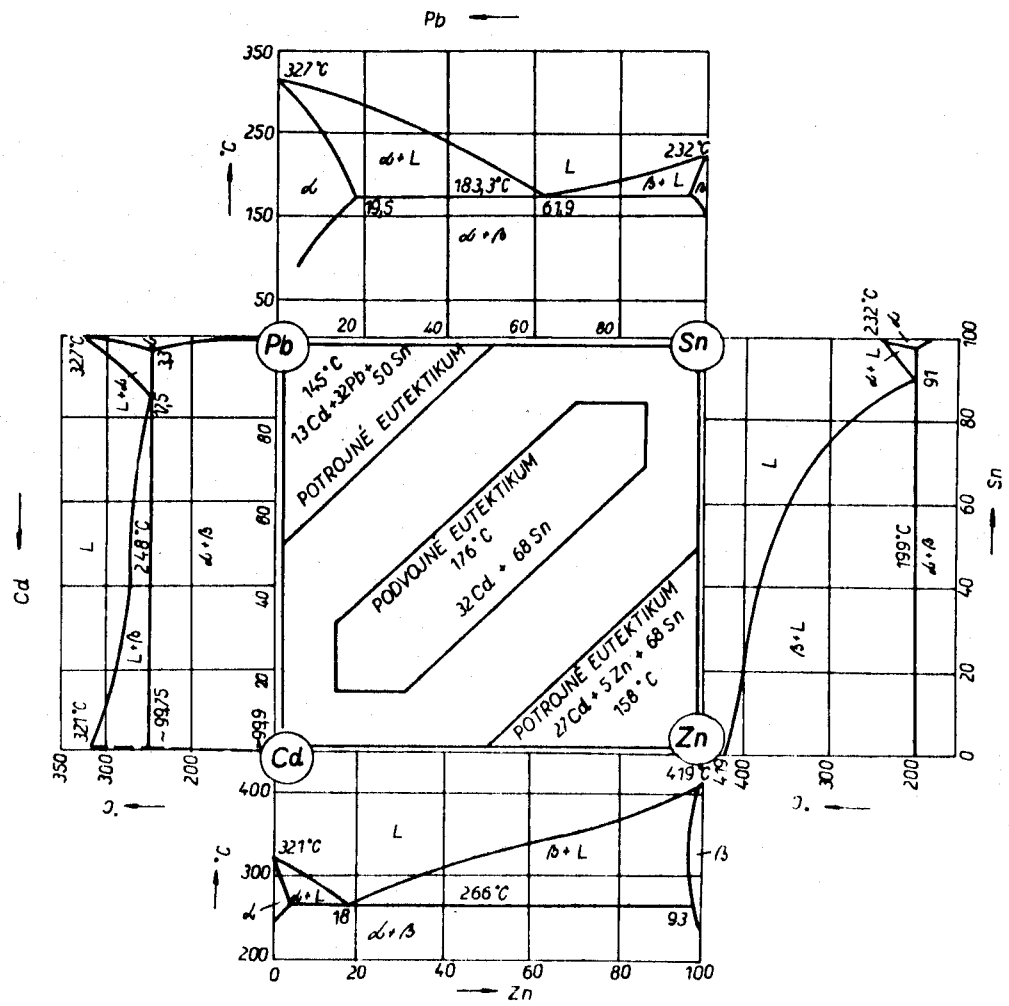
Sn - v Al se nerozpouští (viz tab. I), vzniká pouze adhezní spoj,

Cd - vzhledem k Al má stejné vlastnosti jako Sn, je tedy sám o sobě jako pájka na Al samostatně nepoužitelný,

Pb - neslučuje se s Al ani v tuhém ani tekutém stavu, nelze ho tedy použít jako pájku. To platí i o Sb,

Zn - vytváří s Al široké pásmo tuhého roztoku na straně zinku a pásmo tuhého roztoku na straně Al.

Nejčastěji používanou pájkou je B - Sn 91 Zn. Pájky Zn - Cd jsou použitelné pro pájení s organickými tavidly jen ve velmi malém rozsahu, protože eutektická slitina má teplotu tání 266 °C. (obr. 5). Z potrojných slitin se používají nejčastěji pájky Sn - Pb - Zn a Zn - Cd - Sn eutektického složení.



Obr. 5 Rovnovážné diagramy měkkých pájek

Měkké středněteplotní pájky na hliník se liší od předcházející skupiny především vyšším obsahem Zn.

Měkké vysokoteplotní pájky na hliník jsou založeny na bázi Zn, přičemž legujícími prvky jsou kovy s vyšší teplotou tání (Al, Cu, Mn, Ag). Nejčastěji se používá pájka

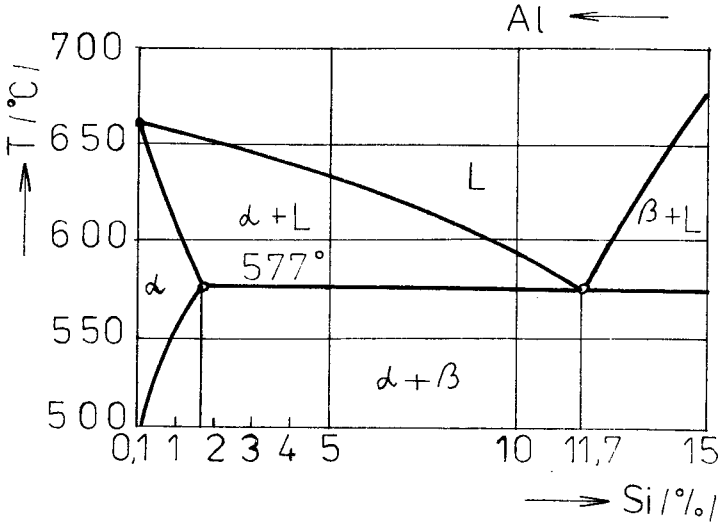
Zn - Al, tyto pájky jsou nejodolnější proti korozi.

Tab. II. Měkké a tvrdé pájky na Al

Skupina pájky	Typ pájky	Likvidus/solidus /°C/
Nízkoteplotní měkké pájky pro pájecí teploty do 280°C	Sn97-Ag Sn91-Zn Sn85-Zn10-Ag Sn79-Cd20-Ag Sn62-Zn37-Cu-Cd-Sb Sn40-Cd56-Zn Sn34-Pb63-Zn Zn16-Cd Zn21-Cd	221/221 198/198 240/210 195/177 260/210 210/264 255/170 275/266 280/266
střednětеplotní měkké pájky 280 - 400 °C	Zn30-Sn Zn35-Cd Zn63-Sn Zn41-Sn54-Al-Ag Zn38-Sn36-Cd25	320/200 327/266 340/200 360/320 300/165
Vysokoteplotní měkké pájky 400 - 500 °C	Zn90-Cd Zn95-Al Zn100 Zn95-Ag Zn69-Al30-Mn Zn91-Al-Cu Zn82-Sn	400/265 380/380 430/430 456/430 515/450 380/380 400/200
Tvrdé pájky pro pájecí teploty nad 600 °C	Al88-Si12 Al76-Si11-Sn+ + Cd10-Cu + Ni3 Al86-Si10-Cu4 Al90-Si	580/575 580/520 640/625 605/590

Tvrdé pájky pro pájení hliníku jsou založeny na bázi Al - Si, resp. Al - Cu - Si. Otázka koroze nevystupuje u spojů pájených těmito materiály do popředí, protože jde o pájky podobného chemického složení jako má základní materiál. Z rovnovážného diagramu Al - Si (obr. 6) se dá zjistit, že eutektikum vznikne při obsahu 11,7 % Si , při teplotě 577 °C. Nejvíce používanou pájkou pro hliník je v ČSSR pájka B - AlSi12.

Je vhodná pro všechny druhy pájení hliníku a jeho některých slitin se Si. Optimální velikost mezery při kapilárním pájení je 0,15 - 0,36 mm. Vzhledem k malému potenciálnímu rozdílu prvků Al - Si (0,55 až 0,50) není třeba přeceňovat nebezpečí koroze spoje.



Obr. 6 Rovnovážný diagram pájky na bázi Al - Si (podle Metals Handbook)

7. TAVIDLA PRO PÁJENÍ HLINÍKU

Tavidla pro pájení hliníku musí být silně reaktivní, neboť musí rozpouštět těžkotavitelný oxid Al_2O_3, který se tvoří na povrchu hliníku a má vysokou teplotu tavení.(2050 °C).

Tavidla pro pájení Al můžeme rozdělit do tří základních skupin:

a) Tavidla s reakční teplotou do 350 °C - jejich základní složkou je organická látka (např. trietanolamin, dietylamin), která je pojivem a zároveň má dobrou smáčivost a přilnavost k základnímu materiálu. Aktivačním činidlem jsou fluoridové a chloridové sloučeniny, např. HF, NH_4F, NH_4HF_2, fluoroboritany Na, K, NH_4, Zn, Cd atd.

V podstatě existují dvě základní složení těchto tavidel /1/:

1. Směs je složena z redukčních sloučenin, jako jsou např. trietanolamin, hydrazin a zejména jejich hydro a dihydrofluoridové sloučeniny, u kterých je redukční účinek spojen s rostoucí schopností uvolněného fluoridu (tavidla řady PHF).

2. Směs je složena z amonných solí, organických aminů vyšších mastných kyselin (stearové, palmitové, olejové apod.), u kterých dochází k rozpadu řetězce vyšších kyselin a jeho redukcí až na uhlík. Ten působí redukčně na Zn nebo na sůl a vytvoří kovový povlak.(tavidla VÚZ - P 1).

b) Tavidla s reakční teplotou do 400 °C. Tato tavidla jsou složena ze směsi chloridů, Zn, Sn, NH_4 a fluoridů alkalických kovů. Působení tavidla probíhá podle rovnic

$$3\ ZnCl_2 + Al_2O_3 \longrightarrow 2\ AlCl_3 + 3\ Zn + 3O_2$$

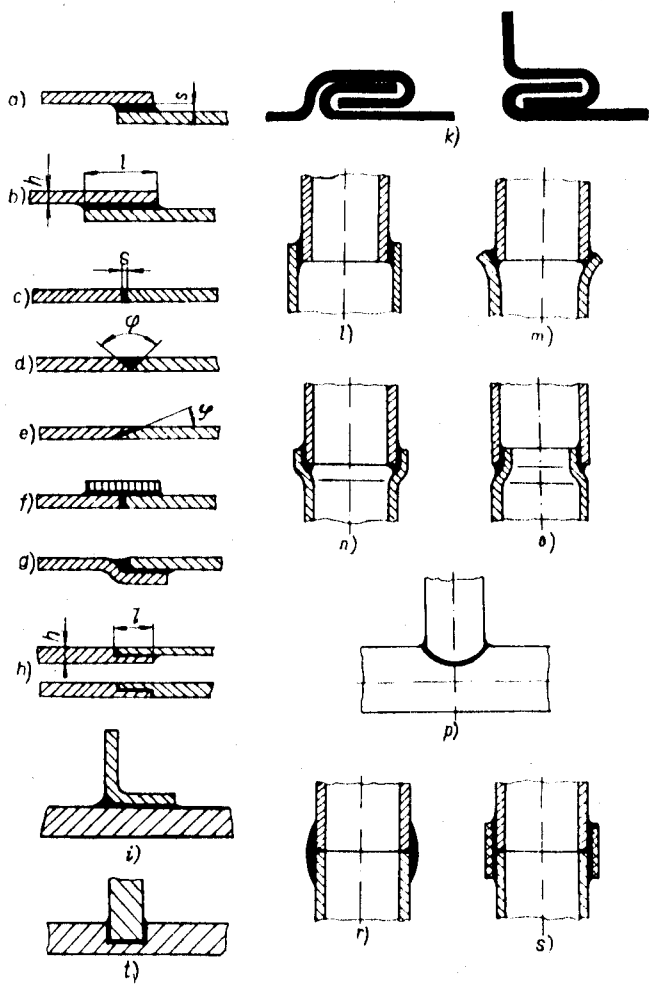
$$3SnCl_2 + Al_2O_3 \longrightarrow 2AlCl_3 + 3Sn + 3O_2$$

čímž se vytvoří kovový povlak Zn + Sn na hliníku. Tavidla nejsou vhodná pro pájení kyslíkoacetylénovým plamenem /1/.

c) Tavidla s reakční teplotou nad 400 °C - anorganická. Mají interval tání o málo nižní než pájka, přibližně 450 - 500 °C a jejich účinná teplota má být kolem 500 °C. Tavidla jsou složena z chloridů a fluoridů kovů alkalických zemin, jejichž úlohou je rozpustit Al_2O_3, přičemž chloridy snižují teploty tání. Jsou to např. VÚZ - 3Al, PLK 29, VÚZ - P 1 M. /1/

8. VLASTNOSTI PÁJENÝCH SPOJU

Pájený spoj je složen z několika částí, které mají různé mechanické a fyzikální vlastnosti. Není tedy homogenní. Vlastnosti pájeného spoje se mohou následkem teploty a vzájemných difuzních pochodů po dobu pájení měnit. Průmyslová využitelnost pájených spojů se posuzuje z hlediska mechanických vlastností, odolností proti korozi a podle toho jakou mají elektrickou vodivost.



Obr. 7. Nejčastěji používané tvary pájených spojů

s – šířka mezery spoje (tloušťka spoje); *l* – délka přeplátování; *a* – přeplátovaný spoj s vyznačenou tloušťkou spoje; *b* – přeplátovaný spoj s vyznačenou délkou přeplátování a tloušťkou základního materiálu *h*; *c* – tupý spoj; *d* – spoj V; *e* – šikmý spoj; *f* – tupý spoj s přiložkou; *g* – promáčknutý přeplátovaný spoj; *h* – přeplátovaný osazený spoj; *i* – přeplátovaný T spoj; *k* – prohýbaný spoj; *l* – vsazený spoj trubkový; *m* – kališkový spoj trubkový; *n* – hrdlový spoj trubkový vnější; *o* – hrdlový spoj trubkový vnitřní; *p* – trubkový T spoj s položenou trubkou; *r* – trubkový nánosový spoj; *s* – trubkový spoj s vnější přiložkou; *t* – vsazený T spoj

8. 1 PEVNOST V TAHU A VE SMYKU PÁJENÉHO SPOJE

a) Vliv konstrukce spoje

Mezi základní činitele patří tvar a rozměry spoje, zejména tloušťka základního materiálu a velikost mezery spoje. U tupého I a V - spoje (obr. 7 c, d), s velikostí pájené plochy (závislá na tloušťce spojovaných materiálů) lineárně klesá pevnost pájeného spoje. Důvodem je to, že pro zhotovení spoje větší tloušťky je třeba většího množství tepla, které se nerozdělí rovnoměrně a vzniká možnost výskytu většího množství chyb, ať již ve vytavené pájce nebo ve stykové ploše. Ukázalo se, že u V spoje, šikmého, jakož i u spoje zkoseného se dosáhlo největší pevnosti spoje při větším úkosu pájených ploch než u tupého I spoje. V uvedených případech se pájená plocha zvětšila více než smyková složka napětí. Naproti tomu se u osazeného spoje nezvýšila pevnost ani při větším přeplátování, protože působí nepříznivé rozdělení napětí.

Velmi důležitý u základních materiálů s vyšší pevností než má použitá pájka je vliv šířky pájené mezery. Pevnost spoje roste se zmenšující se mezerou. To je vysvětleno tím, že při namáhání pájeného spoje omezují tuhé pájené plochy základního materiálu deformaci pájky v mezeře spoje tím více, čím je mezera užší. Protože je tu potlačen efekt zúžení pájky, mění se při zatížení v místě spoje jednoosý stav napjatosti na prostorový. Materiál má při prostorové napjatosti vyšší pevnost. /1/. Pokles pevnosti spoje se zvětšující se mezerou je tím větší, čím větší je rozdíl mezí průtažnosti spojovaného materiálu a pájky. Pokles pevnosti v tahu pájeného spoje při velmi úzké mezeře spoje a při použití slitinových pájek je způsoben především ne-

dokonalostí spoje, t.j. proto, že pájené plochy nedovolují zatečení tavidla a pájky. Z uvedeného vyplývá, že optimální šířka mezery pájeného spoje je různá pro různé kombinace pájka - základní materiál - způsob pájení. Při optimální šířce mezery je pevnost spoje největší.

U přeplátovaných spojů stoupá jejich pevnost se zvětšující se délkou přeplátování. Tahové napětí ve spojovaném materiálu se zvyšuje, naproti tomu smykové napětí ve spoji klesá, a to v závislosti na tloušťce a pevnosti základního materiálu. K dosažení lomu v základním materiálu je třeba volit optimální šířku přeplátování, která je asi 2,5 - 7 x tloušťka spojovaného materiálu. Při namáhání jednostranně přeplátovaného spoje nastane v důsledku působení ohybového momentu deformace spoje a vznikne v něm kombinované namáhání. Vytvořením koutových přechodů pájky na čelních hranách přeplátovaného spoje se zvýší jeho únosnost o 10 - 30 %.

Šířka mezery v rozsahu 0,05 až 0,2 mm neovlivňuje u přeplátovaného spoje výrazně pevnost spoje ve smyku /1/.

b) Vliv technologie pájení

Mezi základní technologické činitele patří : jakost povrchu pájené plochy, výše pájecí teploty a doba pájení, tvar použité pájky, druh tavidla, způsob pájení a dodatečné zpracování.

Stoupající teplota pájení (do určité výše) zlepšuje fyzikální podmínky pro zhotovení jakostního spoje. Při značně vysokých teplotách pájení dochází nejen k přehřátí základního materiálu, ale i k intenzívnímu pohlcování plynů roztavenou pájkou. Ochrana spoje i redukční účinnost tavidla se s výškou teploty snižuje. /1/.

Pevnost pájeného spoje může ovlivnit i doba pájení. Při použití tavidla se pevnějšího spoje dosáhne při krátké době pájení. Při dlouhé době pájení nastává totiž intenzívní difuze a tím dochází k tvorbě tlustší difuzní zóny, která při tvorbě křehké intermediální fáze zhorší mechanické vlastnosti spoje. Může vzniknout i pájecí praskavost.

Pokud jde o tvar použité pájky, příznivější pevnost v tahu poskytuje pájka ve tvaru fólie než pájka ve tvaru drátu. Toto zvýšení pevnosti může být 5 - 60 % podle druhu základního materiálu. /1/

Použití oxidačního nebo redukčního plamene má proti použití neutrálního plamene za následek intenzívnější okysličování pájených ploch, popř. pohlcování plynů z plamene tekutou pájkou, což způsobuje pórovitost pájeného spoje. Proto spoje zhotovené ve vakuu nebo v redukční atmosféře, jakož i spoje zhotovené rychlým vf. ohřevem jsou všeobecně jakostnější než spoje zhotovené plamenem nebo v peci. /1/

Všechny tyto okolnosti vedou k tomu, že u přeplátovaných spojů musíme počítat s rozptylem hodnot pevnosti ve smyku ± 30 %. Přes mnohé nedostatky se však zkoušejí mnohé pájky pomocí jednostranně přeplátovaných spojů, neboť tato metoda je snadná a hodí se dobře pro kontrolu práce páječů. /6/

8. 2 PEVNOST PÁJENÝCH SPOJŮ PŘI NAMÁHÁNÍ OHYBEM

Poměrně malého úhlu ohybu se dosahuje u V spojů v důsledku nepříznivého rozložení napětí. Naproti tomu u šikmého spoje se dosahuje většího úhlu ohybu než u tupého I spoje. Pájka s obsahem Si 0,1 % podstatně snižuje deformační schopnost pájeného spoje. Podobně působí i Mn, Sn, Pb a Bi. Velmi výrazně zmenšuje úhel ohybu spoje ocelí Sb, P a Al.

9. PRAKTICKÁ ČÁST

Vzhledem k dostupnosti pájek a tavidel byla pro experimentální práce použita tvrdá pájka B - AlSi12 - 590/575 a tavidla LB 199 resp. VÚZ 3Al, FB 21-21.

Pájka B - AlSi12 - 590/575 /11/

chemické složení	:	(11,0 - 13,5) % Si, (0,3 - 0,5) % Mn zbytek Al
pracovní teplota	:	600 - 640 °C
roztékavost	:	min. 600 mm^2
kapilarita	:	min. 90 mm
Pevnost v tahu	:	60 - 65 MPa
Pevnost ve smyku	:	60 - 65 MPa
Měrná hmotnost	:	2700 kg/m^3

Tavidlo FB 21 - 21 PLK 29 (LB 199)

Bílý prášek, hydroskopický na tvrdé pájení Al hliníkovou pájkou. Použití ve formě pasty připravené smícháním prášku s vodou. Zbytky tavidla způsobují korozi spoje.

Tavidlo FB 21 - 21 (VÚZ - 3Al)

Nehydroskopické nekorozivní tavidlo. Použití ve formě pasty připravené smícháním prášku s vodou. Zbytky tavidla není nutné po pájení odstraňovat, protože často představují účinnou ochranu proti korozi.

Způsoby vyhodnocení pájeného spoje:

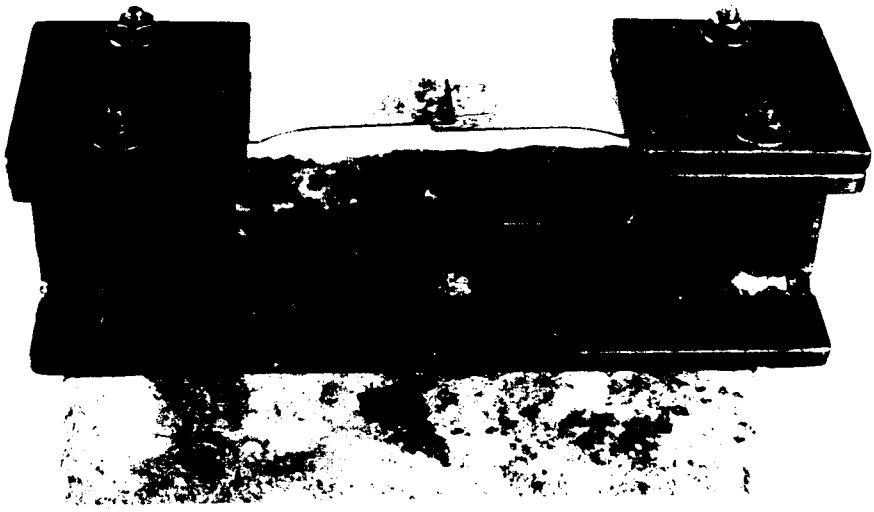
1. Zkoušení pevnosti ve smyku
2. Ohybová zkouška podle Bauera
3. Metalografické

9. 1 POSTUP PŘI ZKOUŠENÍ PEVNOSTI VE SMYKU

Při návrhu zkoušky bylo přihlédnuto k /12/.

1/ Na zkoušku pevnosti ve smyku pájených spojů bylo použito jako základního materiálu pohliníkovaného plechu K 257, pájky B - AlSi 12 a tavidel uvedených v příslušné normě jakosti pájky VÚZ 3Al, resp. LB 199 s reakční teplotou 600 °C.

2/ Pájení vzorků se provádí v přípravku ve vodorovné poloze dle obr. 8. Přípravek se skládá ze stojanu a ze dvou uchycovacích čelistí. Vzorek se uchytí k přípravku tak, že se na vyrovnání přeplátování použije distanční podložka, která odpovídá tloušťce spojovaného materiálu.



Obr. 8 Přípravek pro pájení vzorků

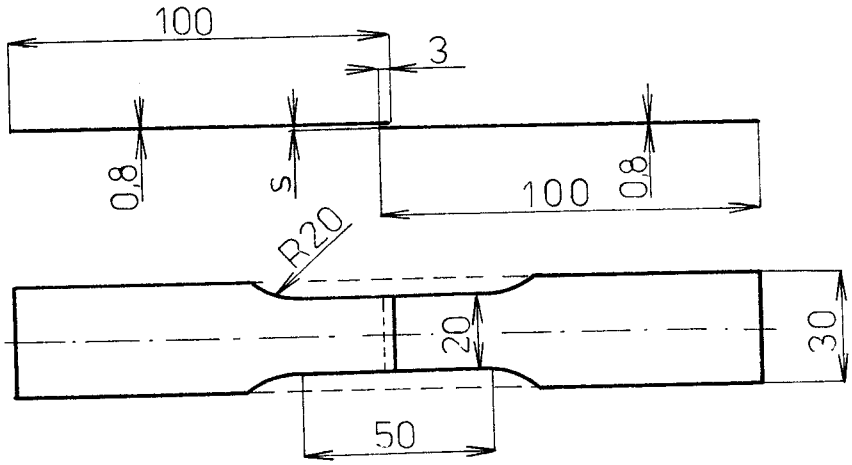
Na ohřev bylo použito ručního kyslíkoacetylénového hořáku, s nástavcem 0,5 - 1. Plamen byl měkký, mírně nauhličující, to proto, aby chvost plamene byl neutrální.

Seřízení plamene: pracovní tlak O_2 = 0,25 MPa

C_2H_2 = 0,05 MPa

Bylo použito kyslíku a acetylénu běžné jakosti.

3/ Na zkoušky bylo použito vzorků dle obr. 9. Vzorek se skládá ze dvou plechů o rozměrech 100 x 30 mm, tloušťky 0,8 mm. Obě části vzorku byly vystřiženy z jednoho plechu. Délka přeplátování byla zvolena dle doporučení /1, 6, 12/ 3 mm.



Obr. 9 Zkušební vzorek

4/ Pájené plochy byly očištěny ocelovým kartáčem a odmaštěny benzínem. Obě části byly upevněny do přípravku tak, aby bylo dosaženo požadovaného přeplátování 3 mm. Ústřižek pájky o hmotnosti přibližně 0,34 g, který byl rozklepán z drátu o průměru 3 mm na rozměry přibližně 1,3 x 5 x 20 mm, byl vložen do spoje mezi obě části přeplátování. Tavidlem byly obě tyto plochy potřeny. Pro zajištění určité mezery ve spoji, byly do spoje vloženy dva drátky v průměru 0,2 resp. 0,5 mm.

Oblast spoje pak byla ohřívána ze spodu na pracovní teplotu. Byla měřena doba pájení, která se pohybovala v rozmezí 25 - 45 s. K měření teploty bylo použito termočlánku Ni - NiCr (1200 °C = 48,2 mV, 482 Ω). Po roztavení pájky byl vzorek ještě 2 - 4 s ohříván, aby se dosáhlo co největšího zatečení pájky ve spoji. Hned po pájení byly povo-

leny šrouby přípravku, aby se zabránilo vzniku namáhání způsobených napětím při smršťování ochlazených vzorků.

Vykonání a vyhodnocení zkoušky

5/ Při zkoušení přeplátovaných pájených spojů bylo použito při upínání do čelistí trhacího stroje FM 1000 na obou koncích distanční podložky o tloušťce základního materiálu (0,8 mm).

6/ Pro vlastní zkoušku tahem platí ustanovení ČSN 42 0310. Rychlost zatěžování vyjádřená zvyšováním napětí byla 4 - 4,5 N/mm^2s. Střihová plocha je určena šířkou přeplátování 3 mm a šířkou vzorku v místě přeplátování 20 mm, byla tedy u všech vzorků rovna 60 mm^2:

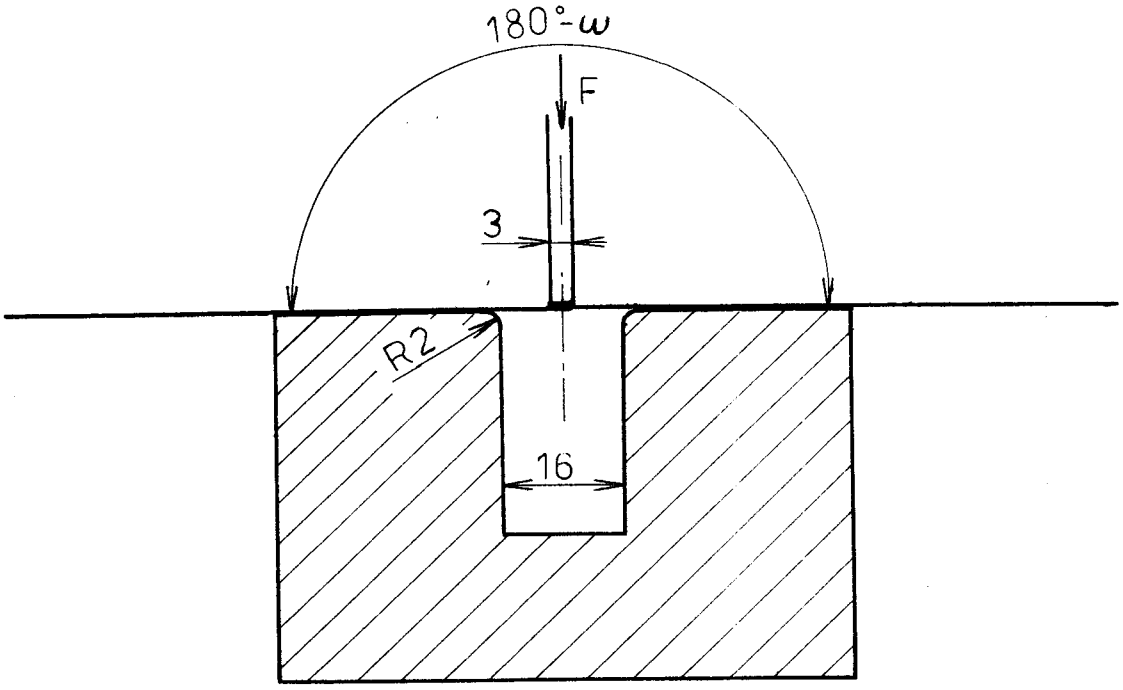
7/ Pevnost ve smyku, která se při této zkoušce vyhodnocuje, se vypočítá tak, že se maximální zatížení v /N/ dělí střihovou plochou v /mm^2/.

9. 2 ZKOUŠKA NA OHYB PODLE BAUERA /6/

Zkouška byla prováděna na pohliníkovaném plechu tloušťky 0,8 mm. Bylo použito přeplátovaného spoje, délka přeplátování 3 mm. Pájeno bylo pájkou B - AlSi 12 při použití tavidel LB 199, resp. VÚZ 3Al. Zkušební tyč rozměrů 30 x 200 mm byla přestřižena a bylo vytvořeno přeplátování. Na pájení bylo použito stejného přípravku jako u zkoušky pevnosti ve smyku. Velikost mezery byla 0,2 mm a velikost pájené plochy 90 mm^2. Čas ohřevu byl v rozmezí 24 - 40 s.

Vzorky byly ohýbány v podpěře tvaru U (obr. 10) se světlou vzdáleností ramen 16 mm a to ohybadlem z dosedací plochou širokou 3 mm. Úhel ohybu ω, při kterém se vzorek porušil byl měřen úhloměrem. Tato zkouška byla prováděna

na trhacím stroji FM 1000 s čelistmi pro zkoušku tlakem.



Obr. 10 Schéma zkoušky na ohyb podle Bauera

9. 3 PŘÍPRAVA METALOGRAFICKÉHO VÝBRUSU

Pro posouzení spojení oceli s hliníkovým povlakem a pájkou bylo použito metalografického výbrusu. Metalografický výbrus byl proveden na pájeném spoji před přetržením a na vzorku č. 54 po přetržení. Výbrusy byly leptány 1 % Nitalem.

Při přípravě výbrusu jsem se dopustil několika chyb:

- pórovitý dentakryl, při leptání došlo k vytečení Nitalu z těchto pórů a došlo k nerovnoměrnému naleptání vzorku,
- vzorky nebyly dokonale vyleštěny, zejména v oblasti pájky zůstaly rýhy.

10. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

10. 1 PEVNOST VE SMYKU PÁJENÉHO SPOJE

a) Pájení pohliníkovaného plechu K 257 pájkou B - AlSi 12, tavidlo LB 199 FB 21-21

- přeplátovaný spoj, délka přeplátování l = 3 mm, šířka mezery spoje s = 0,2 mm (obr. 7 a, b),
- zkušební tyč (obr. 8), plocha smyku S = 60 mm^2,
- čas ohřevu 25 - 39 sekund,
- zatížení jednotlivých tyčí na mezi pevnosti ve smyku F_{max} viz příloha č. 1,
- pevnost ve smyku :

  u prvního měření, vzorky č. 14 - 20 (příloha č. 1) bylo dosaženo průměrné hodnoty $\bar{\tau}_{max\ 1}$ = 31,23 MPa, střední směrodatná odchylka (uvažujeme-li normální rozdělení) byla σ_1= 5,8 MPa,

  u druhého měření, vzorky č. 59 - 63 (příloha č. 1) bylo dosaženo průměrné hodnoty $\bar{\tau}_{max\ 2}$ = 37,2 MPa, střední směrodatná odchylka byla σ_2 = 8,5 MPa .

  Celkově u obou měření bylo dosaženo $\bar{\tau}_{max}$ = 34,21 MPa, střední směrodatná odchylka σ = 7,2 MPA.
- všechny vzorky se porušily v místě přeplátování,
- v lomové ploše byly vidět dutiny, ve kterých jsou zbytky tavidla. Celá plocha smyku nebyla dokonale vyplněna pájkou. Zbytky tavidla se nedají ze spoje odstranit a ve spojení s atmosférou způsobují korozi. Jednou z příčin vzniku těchto dutin může být obsah vody v tavidle. Tato voda se při ohřevu na pájecí teplotu odpařuje a způsobuje vznik bublin, které pájka nemůže vyplnit. Toto dokazuje druhé měření, u kterého bylo použito hustějšího tavidla. Na lomových

plochách u vzorků druhého měření bylo vidět menší množství těchto chyb, a také $\bar{\tau}_{max\ 2}$ byla o 8,0 MPa větší než $\bar{\tau}_{max\ 1}$.

Vzhled lomových ploch je vidět na obr. 11. Zde jsou zobrazeny lomové plochy vzorků s největší a nejmenší pevností ve smyku.

Obr. 11 Lomové plochy vzorků č. 19, 17 , 63, 62
první měření: č. 19 (35,6 MPa), č. 17 (13,16 MPa),
druhé měření: č. 63 (48,6 MPa), č. 62 (27 MPa).

U měření s větší kapilární mezerou s = 0,5 mm bylo dosaženo průměrné hodnoty $\bar{\tau}_{max}$ = 25,6 MPa, σ = 8,07 Mpa (příl. 1). Také zde bylo vidět dutiny v lomových plochách spoje. Navíc u některých vzorků došlo k vytečení pájky ze spoje.

b) Pájení pohliníkovaného plechu K 257 pájkou B - AlSi 12, tavidlo VÚZ 3Al 21 - 21

- přeplátovaný spoj, délka přeplátování l = 3 mm, šířka mezery spoje s = 0,2 mm (obr. 7 a, b),
- zkušební tyč (obr. 8), plocha smyku S = 60 mm^2,
- čas ohřevu 25 - 45 sekund,
- zatížení jednotlivých tyčí na mezi pevnosti ve smyku F_{max} viz příloha č. 2,
- pevnost ve smyku :

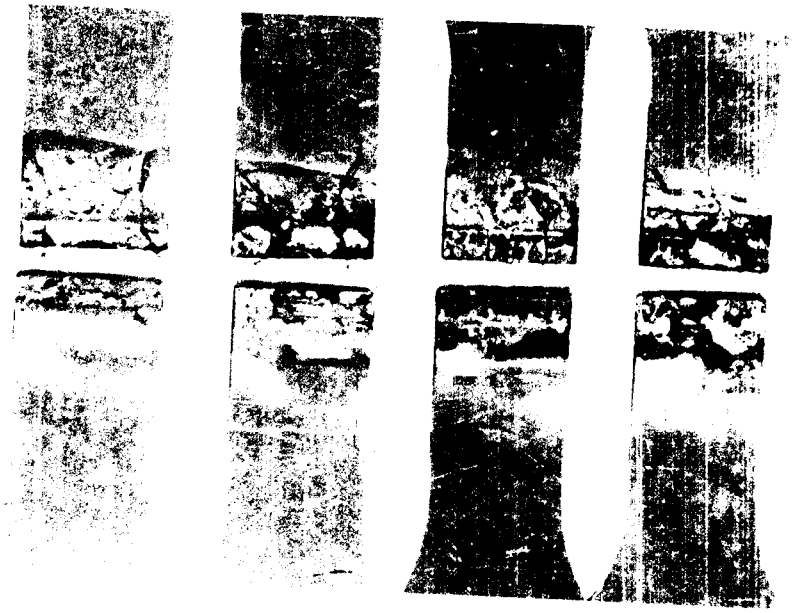
  u prvního měření, vzorky č. 40 - 44 (příl. č. 2) bylo dosaženo průměrné hodnoty $\bar{\tau}_{max\ 1}$ = 35,46 MPa, σ_1 = 7,8 MPa,

  u druhého měření , vzorky č. 54 - 58 (příl. č. 2) bylo dosaženo průměrné hodnoty $\bar{\tau}_{max\ 2}$ = 36,06 MPa, σ_2 = 6,5 MPa.

  Celkově u obou měření bylo dosaženo $\bar{\tau}_{max}$ = 35,8 MPa, σ = 6,7 MPa.
- všechny vzorky se porušily v místě přeplátování,
- v lomové ploše jsou patrná nevyplněná místa pájkou, ve kterých je tavidlo. Plocha smyku není dokonale vyplněna pájkou. Zbytky tavidla nezpůsobují korozi. Vzhled lomových ploch je vidět na obr. 12. Zde jsou zobrazeny lomové plochy vzorků s největší a nejmenší pevností ve smysku.

U vzorku č. 54, který měl druhou nejvyšší hodnotu pevnosti ve smyku (38,8 MPa) byl proveden metalografický výbrus.

U vzorků s kapilární mezerou s = 0,5 mm docházelo k vytečení pájky ze spoje a vzorky se po vyjmutí z přípravku porušily.



Obr. 12 - Lomové plochy vzorků č. 41, 44, 58, 57,
první měření: č. 41 (44 MPa), č. 44 (13,3 MPa),
druhé měření: č. 58 (45,6 MPa), č. 57 (28,2 MPa).

10. 2 PEVNOST V OHYBU

- přeplátovaný spoj l = 3 mm, s = 0,2 mm,
- plocha smyku S = 90 mm^2,
- čas ohřevu 24 - 40 sekund.

Při pájení pájkou AlSi 12 a tavidly LB 199, resp. VÚZ 3Al byly získány stejné výsledky. Úhel ohnutí ω se pohyboval od 2 do 5° viz příloha č. 3. Spoj se porušil v místě přeplátování. Síla potřebná na porušení vzorků:

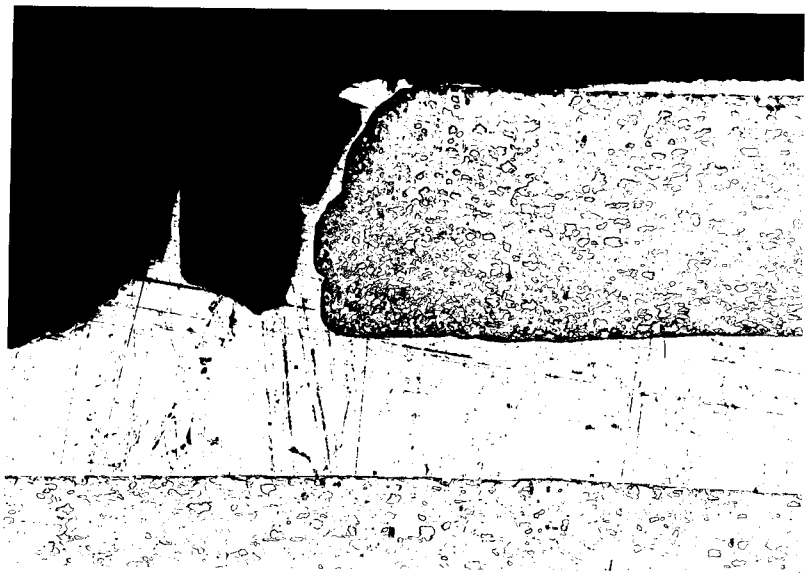
tavidlo LB 199	200 - 360 N,
VÚZ 3Al	180 - 200 N,

vzhled lomové plochy byl stejný jako u zkoušky pevnosti ve smyku. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 3.

10. 3 METALOGRAFICKÉ VYHODNOCENÍ

Pro zhotovení metalografického výbrusu bylo použito pohliníkovaného plechu K 257, pájky B - AlSi 12 a tavidla VÚZ 3 Al. Bylo použito přeplátovaného spoje, jako v předchozích případech, před a po porušení. Ze vzorků po porušení byl vybrán vzorek č. 54 (38,8 MPa). Metalografické výbrusy byly naleptány 1 % Nitalem.

Na obr. 13 je 50x zvětšený výbrus oblasti konce přeplátování neporušeného spoje. Zde je zřejmá dutina v pájce a mezi hliníkovým povlakem a ocelí je poměrně ostré rozhraní.



50 x 1 % Nital

Obr. 13 Konec přeplátování neporušeného spoje

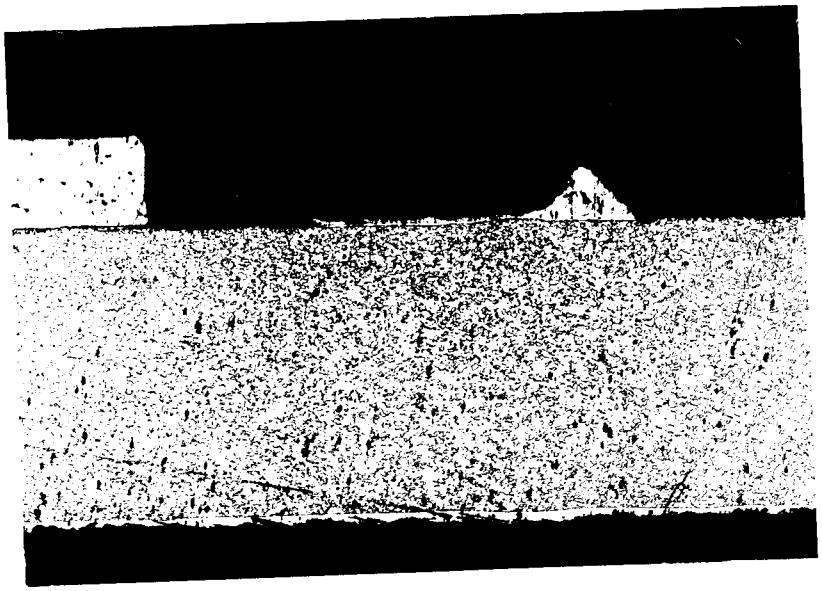
Obr. 14 ukazuje spoj mezi pájkou, hliníkovým povlakem a ocelí (zvětšeno 500x). Zde je možno sledovat poměrně ostré rozhraní mezi hliníkovým povlakem a rekrystalizačně žíhanou strukturou oceli. Mezi pájkou a hliníkovým povlakem zřejmě nastalo difuzní spojení.

500x 1 % Nital

Obr. 14 Přechodová oblast

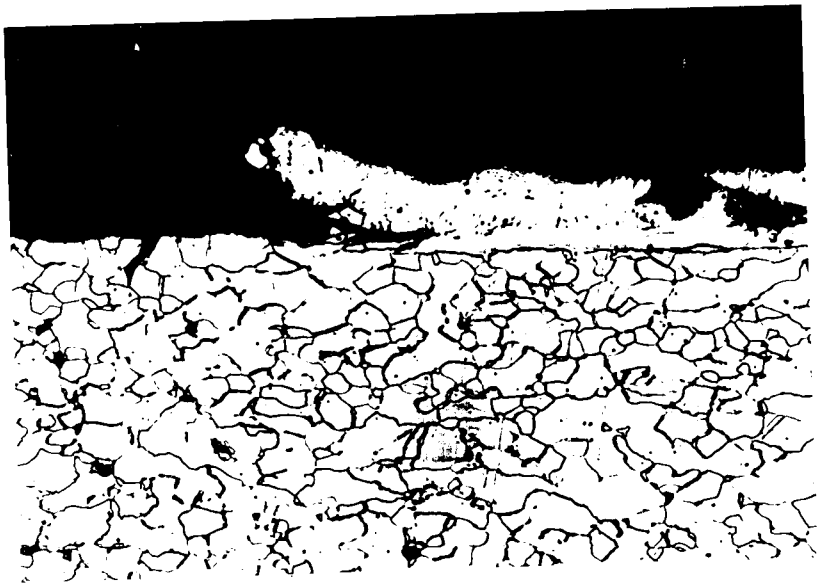
Na obr. 15 je oblast konce vzorku po přetržení (500x). Je patrné, že porušení může nastat na třech místech. Mezi ocelí a hliníkovým povlakem, toto může být způsobeno nedokonalým spojením oceli s hliníkovým povlakem, nevzniká zde difuzní přechodová oblast, ale jen adhezní spojení při naválcování Al na ocelový plech. Mezi pájkou a Al povlakem, v některých místech není difuzní vrstva dosti únosná. V pájce v důsledku její hrubé dendritické struktury.

Na obr. 16 je 500x zvětšena oblast porušení mezi ocelí a Al povlakem, mezi pájkou a Al povlakem a porušení uvnitř pájky - detail z obrázku 15.



50x 1 % Nital

Obr. 15 Oblast konce vzorku po přetržení



500 x 1 % Nital

Obr. 16 Místo porušení spoje - detail obr. 15

Na obr. 17 je oblast poruchy v pájce na vzorku po porušení. Bubliny ve spoji zřejmě obsahují zbytky tavidla.

200x 1 % Nital

Obr. 17 Porucha v pájce

11. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Hodnoty ve smyku pájeného spoje zhotovéného touto technologií jsou dosti nízké, dosahují jen asi 2/3 hodnoty pevnosti ve smyku pájky B - AlSi 12. Ve spoji vzniká poměrně dost vad, zejména nezatečním pájky a vznikem bublin ve spoji. V důsledku toho je pevnost ve smyku dosti nízká a dochází zde k velkému rozptylu hodnot.

Pevnost v ohybu tohoto spoje je také dosti nízká a spoj je křehký. Nízká deformační schopnost spoje je způsobena jednak použitou pájkou (Si i Al výrazně snižují deformační schopnost), jednak ostrým přechodem mezi ocelí a povlakem.

Domnívám se, že mechanické vlastnosti tohoto pájeného spoje by se částečně daly zlepšit tepelným zpracováním spoje, které by odstranilo dendritickou strukturu pájky. Zlepšení spojení oceli s Al povlakem by se dalo dosáhnout zvýšením pájecí teploty, ale je nutno brát ohled na vznik křehké intermetalické fáze. Množství vad ve spoji by se dalo snížit snížením obsahu vody v tavidle (tavidlo ve formě husté pasty), volbou jiného způsobu ohřevu. Použití plamene způsobuje pohlcování plynů z plamene tekutou pájkou, což způsobuje vady ve spoji. Proto se domnívám, že spoje zhotovené v redukční atmosféře, ve vakuu nebo použitím vf ohřevu , mohou snížit počet těchto vad a spoje by byly jakostnější. Odstranění křehkosti pájky (Al-Si) by bylo možné přidáním legujících prvků do této pájky.(např. Sn, Cu, Ni, Li, Be).

12. ZÁVĚR

Ze všech zjištěných výsledků jednoznačně vyplývá, že pájený spoj pohliníkovaných plechů K 257 pájkou B - AlSi 12 - 590/575 a tavidly LB 199, resp. VÚZ 3Al FB 21 - 21, uvedenou technologií nevyhovuje požadavkům kladeným na tento spoj v hromadné výrobě. Protože u těchto spojů bylo dosaženo nízkých hodnot mechanických vlastností, které nedosahují ani mechanických vlastností použité pájky a hodnoty mechanických vlastností mají poměrně velký rozptyl. Tuto technologii lze doporučit maximálně při pájení výrobků, u nichž není kladen důraz na vyšší pevnost spoje.

Závěrem bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. H. Neumannovi a konzultantovi Ing. F. Beranovi za cenné rady, informace a veškerou pomoc při řešení daného úkolu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

/1/ Ruža, V. : Pájení. SNTL Praha 1978

/2/ Horák, J.: Diplomová práce V 172/1981 - S

/3/ VÚHŽ - INFORMETAL : Vědeckotechnické informace pro hutní průmysl

/4/ Houska, M.: Diplomová práce V 175/1981 - S

/5/ ČSN 05 0040. Názvoslovie zo spájkovania kovou. 1969

/6/ Lader, E. : Příručka pájení. SNTL Praha 1958

/7/ ČSN 05 0041. Zkušanie roztekavosti. 1970

/8/ ČSN 05 0042. Zkušanie kapilarity. 1970

/9/ Slánský, A. - Wollmann, J. : Kapilární pájení. SNTL Praha 1962

/10/ Hansen, M. i Anderko, K. : Struktury dvojnych splavov. Moskva 1962

/11/ ČSN 05 5690. Tvrdá pájka B - AlSi 12 - 590/575 1975

/12/ ČSN 05 0044. Zkoušení mechanických vlastností pájených spojů, zkouška pevnosti ve smyku. 1970

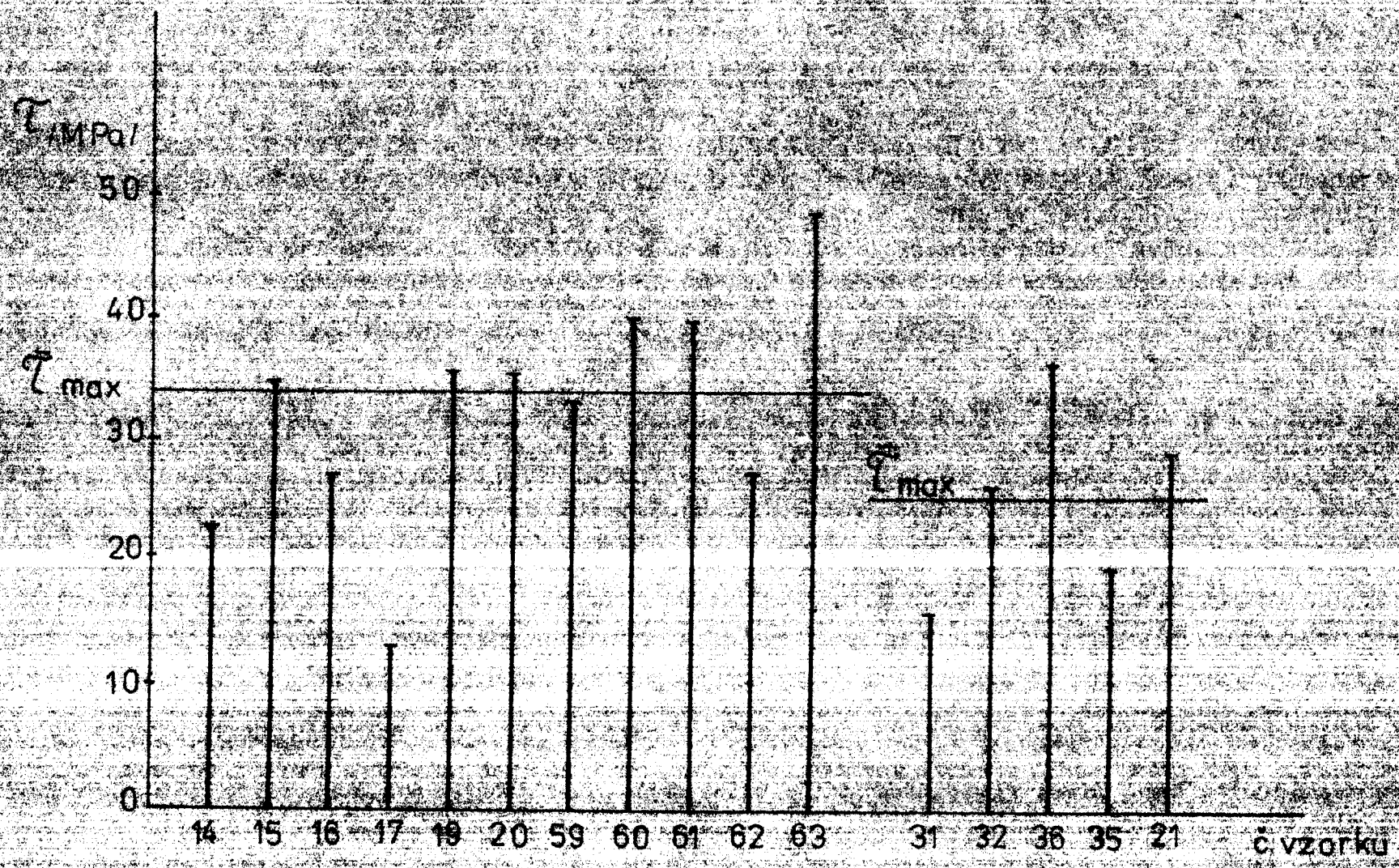
/13/ Adamka, J.: Spájkovanie plameňom. Bratislava 1976

/14/ ČSN 05 5650. Tvrdé spájky. Technické dodacie predpisy. 1975

Příloha č. 1 - Naměřené hodnoty při pájení pájkou AlSi 12, tavidlem LB 199 FB 21 - 21

Číslo vzorku	velikost mezery s/mm/	hmotnost pájky /g/	čas ohřevu /s/	teplota pájení /°C/	maximální síla zatížení F_{max}/N/	pevnost ve smyku τ /MPa/	Čas zatěžování /s/	rychlost zatěžování /MPa s^{-1}/
14	0,2	0,36	30	630	1380	23,00	7	3,28
15	0,2	0,37	32	610	2090	34,83	10	3,48
16	0,25	0,36	39	620	1630	27,16	8	3,39
17	0,4	0,36	37	600	790	13,16	6	2,19
19	0,25	0,35	36	630	2140	35,66	10	3,56
20	0,25	0,35	36	620	2130	35,50	9	3,94
59	0,2	0,33	29	620	1820	33,33	7	4,33
60	0,2	0,32	29	620	2400	40,00	10	4,00
61	0,2	0,31	35	640	2380	39,66	10	3,96
62	0,2	0,31	37	640	1640	27,33	6	4,55
63	0,25	0,31	35	630	2920	48,66	11	4,42
31	0,45	0,33	45	630	960	16,00	7	2,28
32	0,55	0,35	37	650	1590	26,50	8	3,31
36	0,55	0,33	43	640	2190	36,50	10	3,84
35	0,45	0,33	40	625	1180	19,66	8	2,62
21	0,5	0,33	39	635	1790	29,33	7,5	3,9

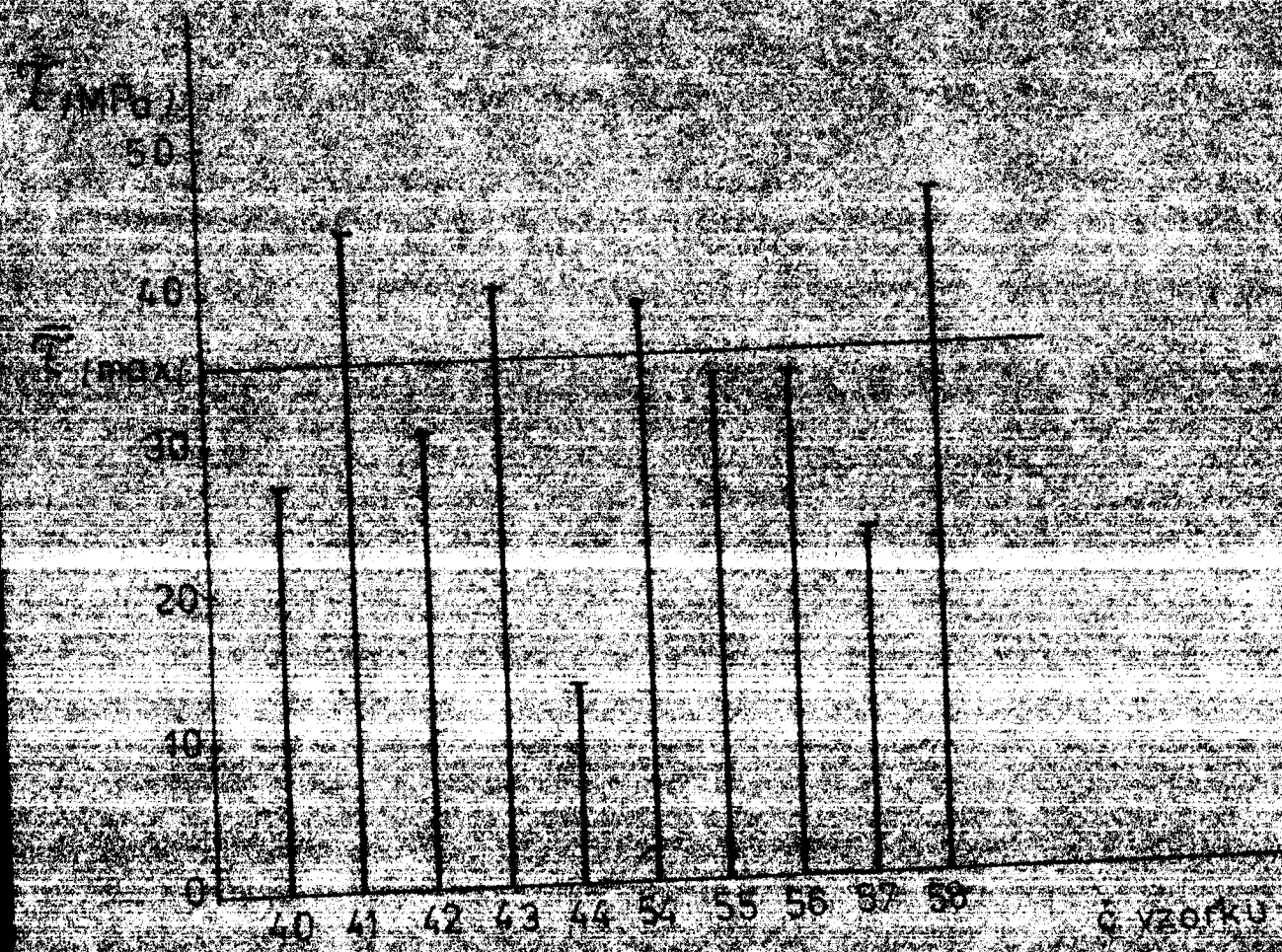
GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ NAMĚŘ. HODNOT - PŘÍL. 1



Příloha č. 2 - Naměřené hodnoty při pájení pájkou AlSi 12, tavidlem VÚZ 3 Al FB 21 - 21

Číslo vzorku	velikost mezery s/mm/	hmotnost pájky /g/	čas ohřevu /s/	teplota pájení /°C/	maximální síla zatížení F_{max}/N/	pevnost ve smyku τ /MPa/	čas zatěžování /s/	rychlost zatěžování /MPa s^{-1}/
40	0,30	0,336	29	640	1640	27,33	8	3,4
41	0,20	0,336	25	640	2640	44,00	10	4,63
42	0,35	0,323	28	660	1830	30,50	8	3,96
43	0,20	0,323	20	660	2400	40,00	10	4,21
44	0,50	0,340	26	640	800	13,33	4	3,33
54	0,2	0,320	45	630	2330	38,83	11	3,53
55	0,2	0,330	43	630	2030	33,83	8	4,22
56	0,2	0,330	29	640	2030	33,83	8	4,22
57	0,2	0,330	28	620	1690	28,16	6	4,69
58	0,2	0,330	30	640	2740	45,66	11	4,15

GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ NAMĚŘ. HODNOT - PŘÍL. 2



Příloha č. 3 - Naměřené hodnoty při zkoušce na ohyb, při pájení pájkou AlSi 12, tavidlem LB 199

VÚZ 3A1

LB 199 Číslo vzorku	čas ohřevu /s/	teplota pájení /°C/	velikost mezery s/mm/	velikost plochy smyku /S/mm/	maximální zatěžující síla F_{max} /N/	úhel ohnutí ω /°/	hmotnost pájky /g/
1	24	600	0,2	90	200	3	0,43
2	27	620	0,2	90	350	5	0,42
3	28	630	0,2	90	320	4	0,42
4	27	610	0,2	90	260	3	0,43
5	29	610	0,2	90	360	4	0,42
VÚZ 3A1							
6	32	620	0,2	90	210	4	0,43
7	34	600	0,2	90	190	3	0,43
8	35	640	0,2	90	170	2	0,42
9	34	610	0,2	90	200	3	0,42
10	40	600	0,2	90	180	3	0,42