

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojírenství inženýrství  
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Technologie pájení heterogenních pájených spojů

Autor: **Václav VÁCHAL**

Vedoucí práce: **Ing. Čejková Petra, IWE**

Akademický rok 2018/2019

### **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

**ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE**

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Váchal	<b>Jméno</b> Václav	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Čejková, IWE	<b>Jméno</b> Petra	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Technologie pájení heterogenních pájených spojů		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	66	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	66	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tématem této bakalářské práce je návrh tvrdého pájení heterogenního spoje (slnutý karbid – ocel) elektrickým obloukem v ochranné atmosféře, praktické provedení pájeného spoje a jeho ozkoušení. V teoretické části najdeme informace o technologii pájení, technologii svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře inertního plynu a o materiálech, které byly v experimentu použity. Cílem práce je vytvoření kvalitního pájeného spoje dvou materiálů s odlišnými vlastnostmi.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Tvrdé pájení, pájka, elektrický oblouk, argon, slnuté karbidy, nástrojová ocel

**SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET**

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Váchal	<b>Name</b> Václav	
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy”		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Čejková, IWE	<b>Name</b> Petra	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Brazing of heterogeneous joints		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

**NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)**

<b>TOTALLY</b>	66	<b>TEXT PART</b>	66	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The topic of this bachelor thesis is the design of the hard spine of the heterogeneous joint (cemented carbide - steel). In the theoretical part we find information about brazing and technology of electric arc welding in inert gas protective atmospheres. The aim of this work is to create a quality soldered joint of two materials with different properties.
<b>KEY WORDS</b>	Brazing, solder, electric arc, argon, cemented carbides, tool steel

## Obsah

Úvod .....	9
1 Technologie pájení .....	10
1.1 Historie pájení.....	12
1.2 Parametry pájení .....	13
1.2.1 Povrchové napětí .....	13
1.2.2 Smáčivost .....	15
1.2.3 Roztékavost .....	16
1.2.4 Vzlínavost.....	17
1.2.5 Metalurgické reakce při pájení .....	18
1.3 Pájky .....	20
1.3.1 Měkké pájky .....	21
1.3.2 Tvrdé pájky .....	22
1.4 Tavidla .....	24
1.5 Metody pájení .....	24
1.6 Destruktivní a nedestruktivní zkoušky pájeného spoje .....	25
1.6.1 Nedestruktivní zkoušky pájených kovů .....	25
1.6.2 Destruktivní zkoušení pájených spojů.....	25
1.7 Porovnání pájení a svařování.....	27
2 Technologie svařování metodou TIG .....	28
2.1 Princip svařování .....	29
2.2 Ochranné plyny.....	30
2.3 Technika svařování.....	31
2.4 Výhody a nevýhody TIG svařování.....	32
2.5 Parametry svařování .....	32
3 Slinuté karbidy a jejich využití.....	33
3.1 Dělení slinutých karbidů.....	33
3.2 Vlastnosti slinutých karbidů .....	35
3.2.1 Tepelná vodivost .....	35
3.2.2 Tvrdost .....	36
3.2.3 Pevnost .....	37
3.2.4 Modul pružnosti .....	37

3.2.5	Lomová houževnatost .....	37
3.3	Chemická degradace .....	38
3.3.1	Koroze .....	38
3.3.2	Oxidace .....	38
3.3.3	Naleptávání .....	38
4	Oceli třídy 19 .....	38
4.1	Vlastnosti .....	39
4.1.1	Houževnatost .....	39
4.1.2	Tvrdość a pevnost .....	39
4.1.3	Prokalitelnost a kalitelnost .....	39
4.1.4	Odolnost proti otěru .....	39
5	Ocel ČSN 41 2050 .....	39
5.1	Vlastnosti .....	40
6	Úvod do experimentální části .....	40
6.1	Pájecí pracoviště .....	40
7	Experiment číslo 1 .....	41
7.1	Příprava vzorků .....	41
7.2	Vlastní provedení experimentu .....	42
7.3	Vyhodnocení experimentální části 1 .....	45
8	Experiment číslo 2 .....	50
8.1	Příprava vzorků .....	51
8.2	Vlastní provedení experimentu .....	51
8.3	Vyhodnocení experimentální části 2 .....	55
	Závěr .....	63
	Seznam literatury .....	64
	Seznam tabulek .....	65
	Seznam obrázků .....	65

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí své bakalářské práce Ing. Petře Čejkové za trpělivost, poskytnutí odborného dohledu a cenných rad. Poděkování za ochotu patří také firmě HOFMEISTER s.r.o. za rozříznutí a svářecímu technologovi Josefu Kadlecovi, který pájel veškeré vzorky.

## Seznam použitých zkratk a jednotek

TIG - Tungsten Inert Gas (z němčiny, metoda svařování)

ZM – základní materiál

WPS – Welding Procedure Specification

SK – slinutý karbid

WC – karbid wolframu

HCR – Hardness Rockwell (stupnice tvrdosti)

HB – Hardness Brinell (stupnice tvrdosti dle Brinella)

IIW – International Institut of Welding

Ms – jiné označení pro mosazné pájky

WPS - Welding Procedure Specification

B – Brazing

S - Soldering

AC – Alternating Current – Střídavý proud

DC – Direct Current stejnosměrný proud

PB – Označení polohy při spojování materiálů

WC20 – Označení a druh wolframové elektrody

RTG – Rentgenové záření

PBPS – Preliminary Brazing Procedure Specification

$p_k$  – kapilární tlak [Pa]

$p_s$  – hydrostatický tlak sloupce pájky [Pa]

$D$  – difúzní součinitel [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]

$h$  – vzlínavost [m]

$k_{ic}$  – lomová houževnatost [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]

$Q_v$  – jednotka průtoku plynu [L/min]

A – tažnost [%]

Z – kontrakce [%]



## Úvod

Bakalářská práce pojedná o snaze vytvořit kvalitní spoj z dvou heterogenních materiálů a to konkrétně slinutého karbidu a nástrojové oceli. Spojení bude probíhat roztavením tvrdé pájky za pomoci elektrického oblouku, který se běžně používá při svařování. Z toho také vyplývá obsah teoretické části, která se bude zabývat technologií pájení, svařovací metodou za pomoci elektrického oblouku (TIG) a výhodami a nevýhodami použití pájení. Okrajově zde budou zmíněny také nástrojové oceli a slinuté karbidy, zejména jejich specifické vlastnosti a využití.

Slinuté karbidy, přesněji břitové destičky ze slinutých karbidů, nacházejí ve strojírenském průmyslu stále větší využití. Tyto destičky se dělí do dvou skupin, vyměnitelných a nevyměnitelných. Zatímco vyměnitelné destičky se k upínací ploše upevňují mechanicky, nevyměnitelné destičky se musí spojovat s upínací plochou technologiemi, jako je např. svařování, pájení nebo lepení. Svařování slinutých karbidů nepřípadá v úvahu, protože, slinutý karbid díky jeho chemickému složení není svařitelný.

Při lepení nedochází k tepelnému ovlivnění spojovaných materiálů, ale spoje nedosahují tak velkých pevností, takže jako nejvýhodnější technologie se jeví pájení, které lze, na rozdíl od svařování použít a spoje dosahují větších pevností než v případě použití technologie lepení. Pájení slinutých karbidů se používalo již v 50. letech 20. století, kdy se destičky ze slinutého karbidu spojovaly například sendvičovou pájkou nebo pájkou a technologií pájení v ochranné atmosféře argonu, která se používá dodnes. Technologie pájení metodou TIG ale není ozkoušená, a tak na několika experimentech budeme ověřovat, zda by tato metoda šla také použít jako alternativní metoda pro spojování slinutých karbidů.

Vytvořené spoje se budou hodnotit jak vizuální a prozařovací zkouškou, tak i zkouškou destruktivní a to konkrétně metalografickou.

Cílem práce je vytvoření heterogenního spoje ocel- slinutý karbid pomocí pájky a technologie TIG.

## 1 Technologie pájení

Pájení představuje jednu z několika metod, pomocí kterých lze spojovat pevné materiály. Tyto metody mohou být klasifikovány jako:

- mechanické spojování,
- lepení,
- tvrdé a měkké pájení,
- svařování,
- spojování v pevném stavu.

Mechanické spojování (Mechanical fastening na obr. 1) zahrnuje upínání součástí bez tavení spojovaných ploch. Ke spojování se často, ale ne vždy používají spojovací prvky, jako jsou šrouby a nýty. Při lisování jsou součástky spojeny mechanickou deformací. V praxi se často užívá v případech, kdy není výhodné jednotlivé součásti spojovat nebo když nechceme, aby došlo k tepelnému ovlivnění materiálu.

Adhezivní lepení (Adhesive bonding na obr. 1) zahrnuje použití polymerního materiálu, často obsahujícího různé přísady, ke „slepení“ materiálů dohromady. Tento způsob zahrnuje chemickou reakci, která může jednoduše zahrnovat pouhé působení lepidla na vzduchu, které vede k vytvoření vazby mezi vytvrzeným adhezivem a příslušnými složkami. Stykové plochy zůstávají neporušeny (netaví se).

U tvrdého a měkkého pájení (Soldering and brazing na obr. 1) se ke spojení materiálů využívá pájecí slitiny (pájky), která má za úkol zajistit metalurgické vazby mezi základními materiály a pájky, a to s využitím tavidla či ochranné atmosféry nebo bez nich. V tomto procesu jsou původní povrchy „erodovány“ v důsledku reakce mezi pájkou a pevnými složkami, avšak rozsah této „eroze“ (ovlivnění materiálu) je obvykle jen na mikroskopické úrovni

(100  $\mu\text{m}$  – 4 000  $\mu\text{m}$ ).

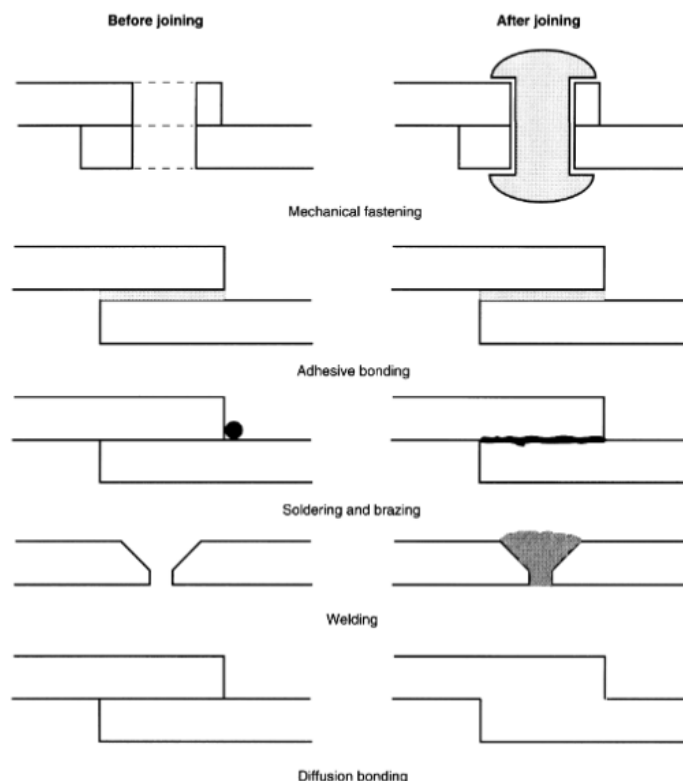
Svařování (Welding) zahrnuje spojování povrchů materiálů, které se taví za vysokých teplot a jsou specificky směřovány ke spoji. Tepelné zdroje používané k tavení jsou např. plazmové oblouky, elektronové paprsky, lasery, elektrický proud, odpor atd. Při svařování může být použit přídavný tavný materiál, který má podobné chemické složení. Přídavný materiál se používá v případě, kdy je mezera mezi svary moc široká. V takové situaci je přídavný materiál vybrán tak, aby měl nižší teplotu tání, než mají spojované součásti a zajistilo se jeho úplné roztavení.

Termín spojování v pevné fázi zahrnuje velmi širokou škálu spojovacích procesů. Dva extrémní jsou tlakové svařování a difúzní lepení (diffusion bonding na obr. 1). Tlakové svařování v nejjednodušším případě zahrnuje pouze fyzické deformování dvou dosedacích ploch, které narušují jakékoliv zasahující povrchové plochy a umožňují přímý kontakt kovu s kovem. Čisté difúzní spojování vyžaduje pouze kontakt dvou stykových ploch a následné zahřátí sestavy, dokud nejsou dutiny na rozhraní odstraněny difúzí.

Tlakové svařování dosahuje obvykle nejlepší jakosti, pokud jsou součásti ohřívány (např. třecím svařováním) a proces difúzního spojování se dá obvykle velmi urychlit aplikací tlaku nebo mechanického míchání (např. termosonické kuličkové a klínové spojení), tak aby došlo k působení tlaku v místě stykové oblasti.

Spojování v pevném stavu je samo o sobě předmětem, zcela odlišným od pájení, které se naopak spoléhá na spojování kovů v kapalném stavu. Avšak s vývojem procesu difúzního

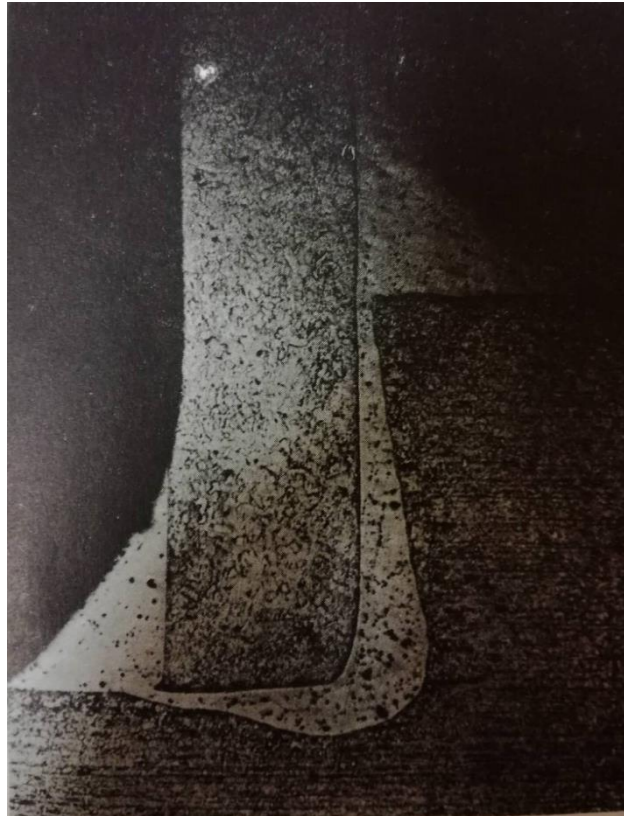
pájení, které je složením obou metod, je třeba vzít v úvahu i spojení v pevném stavu, zejména difúzní vazby.



Obr. 1 Hlavní metody spojování strojírenských materiálů, dostupné z [4]

Pájení je obecně proces metalurgického spojování součástí roztavenou pájecí slitinou, tzv. pájkou. Pájené plochy nejsou taveny, ale pouze smáčeny, což může být realizováno díky nižší teplotě tavení pájecí slitiny, než jakou má základní materiál. Pájením vznikne nerozebíratelný spoj, který funguje na principu styku povrchových atomů základního materiálu a tekuté pájky v dostatečné vzdálenosti, aby vznikly podmínky pro účinek adhezních a kohézních sil. Pájení nachází uplatnění hlavně v oblastech strojírenství a v elektrotechnickém průmyslu, dále pak v průmyslu spotřebním a bižuterii. Od pájeného spoje lze požadovat některé věci, které by svařovaný spoj splňovat nemohl, jako je například úhledný povrchový vzhled spoje, velká rozměrová přesnost součástí i po pájení, vznik menšího vnitřního pnutí a menší strukturní změnu materiálu. K dalším věcem, které se od pájených spojů v některých případech vyžadují je těsnost, elektrická vodivost, korozivzdornost, nebo mechanická pevnost při namáhání.

Pájené spoje mohou být realizovány buď pomocí měkké pájky, které mají teplotu tání do 450 °C nebo pájky tvrdé s teplotou tání nad 450 °C. Měkké pájky tvoří nejčastěji slitiny těžkých kovů, které se taví při nízkých teplotách například Sn, Pb, Cd, Sb. U tvrdých pájek jsou pak hlavními složkami běžné nebo drahé kovy na bázi Cu, Ag, mosazu nebo jejich různých kombinací. [1,4]



*Obr. 2 Makrosnímek ocelového spoje, který byl zhotoven pájením v průběžné peci s redukční atmosférou pájkou E-Cu. Pájka bylo vložena pouze z jedné strany spoje (zvětšení 32krát), převzato z [1].*

## 1.1 Historie pájení

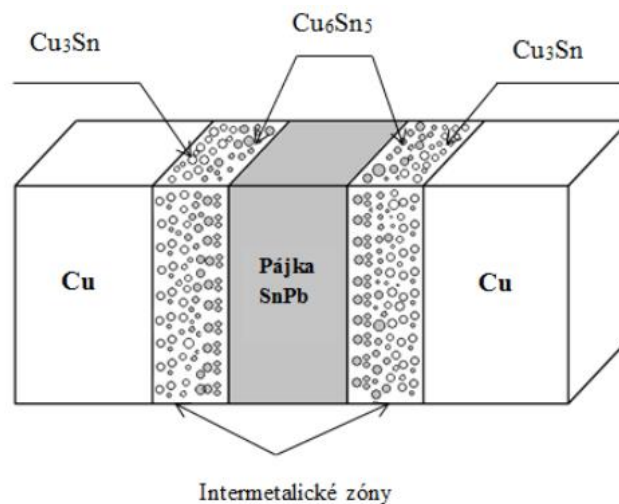
Slovo pájení pochází latinského slova *solidare*, které v překladu znamená dávat dohromady.

Pájení je jedním z nejstarších způsobů spojování za tepla. Tuto metodu již používali staří Egypťané a Sumerové v Uru dávno před naším letopočtem (zhruba 3000 let před n. l.), kteří užívali technologii pájení ke spojování zlatých předmětů tvrdým pájením, dále pak při opravách a výrobě mečů a nádob. Technologie měkkého pájení se začala využívat až přibližně 2000 let před naším letopočtem, kdy pomocí cínové pájky pájeli například olovněné vodovodní trubky. Na našem území využívali pájení v druhé polovině devátého století šperkaři Velkomoravské říše. Výrazné rozšíření pájení zejména v průmyslové výrobě, se datuje až od roku 1930. Zavádění pájení do průmyslové výroby mělo zprvu značné neúspěchy, z důvodu nedodržení optimálních technologických a konstrukčních podmínek. Lidé totiž původně byli toho názoru, že pájení vyžaduje jen manuální zručnost dělníka. To způsobilo, že se pájení nepoužívalo ani v případech, kdy bylo ze všech způsobů nejvýhodnější a rozvíjelo se v průmyslu velmi pomalu. Zvrat přišel v šedesátých letech devatenáctého století, kdy se začaly systematicky zpracovávat všechny poznatky o pájení, což poté umožnilo jeho spolehlivé využití ve všech oblastech průmyslové výroby a pájení se tak mohlo plně rozvíjet. [1],[2],[3]

Vedle pájení se také vyvíjela další technologie spojování materiálů, kterou je svařování. Rozdíl mezi oběma technologiemi spočívá v tom, že u svařování dochází k tavení základního materiálu a svarový spoj vzniká působením tepla a tlaku na materiál.

## 1.2 Parametry pájení

Kvalita pájených spojů značně závisí na kombinaci pájecí slitiny, rozměrů spojů tavidla a základního materiálu, čistotě a stavech povrchu součástí, způsobu ohřevu a ochlazování, a také na podmínkách zpracování, kterými je myšleno vhodná volba prostředí pro pájení. Z tohoto důvodu je dobré chápat metalurgické a fyzikální změny, které doprovázejí průběh výroby pájených spojů a jsou tak zásadní pro vytvoření spolehlivého pájeného spoje. Protože pájené plochy nejsou nataveny, ale jen smáčeny použitou pájkou, je tudíž nutné zajistit dobrou smáčivost. Povrchové atomy základního materiálu a tekuté pájky se dostanou do tak malé vzdálenosti, že se vytvoří podmínky pro účinek adhezních a kohezních sil. (adheze = přilnavost a koheze = soudržnost. Při tomto jevu často dochází k vzájemné difúzi a rozpouštění některých prvků spojovaných materiálů. V mezerách větších než 0,5 mm nastává tečení pájky v mezeře spoje všemi směry vlivem kapilárního tlaku. [4,1]

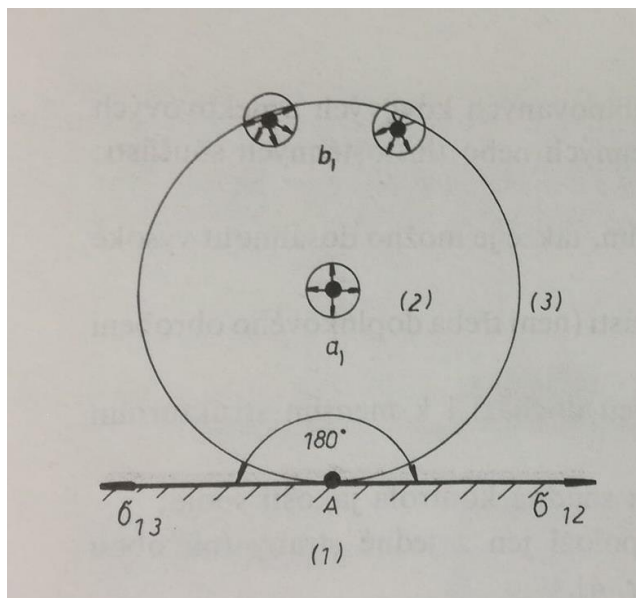


Obr. 3 Schéma pájeného spoje, které se skládá ze čtyř oblastí: 1. základní materiál s nezměněným chemickým složením, popř. se strukturálními změnami po ohřevu (Cu). 2. Přechodové oblasti na straně ZM ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ). 3. Přechodová oblast na straně pájky ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ). 4. Pájka ve vytaveném stavu (SnPb), dostupné z [5]

### 1.2.1 Povrchové napětí

Důležitou úlohu při pájení má povrchové napětí, které působí v dotykových plochách mezi základním materiálem, pájkou a tavidlem. Jedná se o efekt, při kterém se povrch kapaliny (tekuté pájky) chová jako elastická folie, která se snaží dosáhnout kulového tvaru, což je tvar, který má při daném objemu ze všech geometrických útvarů nejmenší plochu a má nejnižší energii. To znamená, že se povrch kapaliny snaží dosáhnout stavu s nejnižší energií. Obecně platí, že se vzrůstajícím povrchovým napětím je kapička kapaliny „kulatější“ tzn., že při daném objemu má menší plochu. Důvodem, proč nemají kapky kapaliny tvar dokonalé koule, jsou vnější síly, které kapky deformují.

Vznik povrchového napětí lze vysvětlit vzájemnou přitažlivostí, která existuje mezi molekulami tekutiny (obr. 4). Přitažlivé síly částic uvnitř tekutiny ( $a$ ) se vyrovnají a k jejich přemístění uvnitř kapaliny není potřeba žádné práce, protože výslednice sil, které na ně působí ze všech stran, se rovná nule. Jinak je tomu u molekul ( $b$ ), které jsou na povrchu tekutiny. Na jejich spodní část působí přitažlivé síly molekul tekutiny, které se jich dotýkají, ale na jejich část vrchní tyto síly nepůsobí.



Obr. 4 Schématické znázornění povrchového napětí kapaliny,  $a$  – uvnitř kapaliny;  $b$  – na povrchu; 1 – základní materiál; 2 – kapalina; 3 – atmosféra; dostupné z [1]

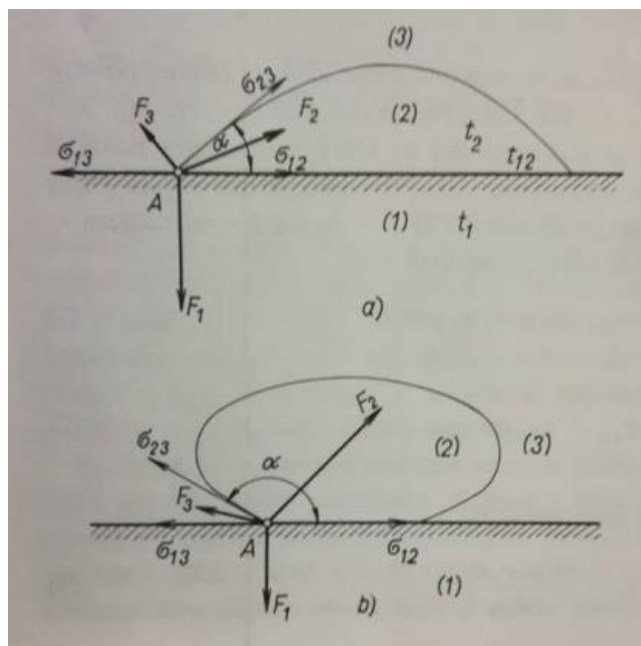
Snaha tekutin zaujímat nejmenší povrch je tedy výsledkem sil působících na jejich povrch. Tomuto jevu říkáme povrchové napětí. Jednotkou povrchového napětí, které je definováno jako síla působící kolmo na délkovou jednotku povrchu v jeho rovině je  $N.m^{-1}$  protože hodnoty povrchového napětí dosahují nižších hodnot, používá se jednotka menší  $mN.m^{-1}$  ( $1 mN.m^{-1} = 0,001 N.m^{-1}$ ). Povrchové napětí pájek pro určitou teplotu zjišťujeme metodou kapilární vzlínivosti. V tabulce 1 jsou uvedeny některé hodnoty povrchového napětí některých kovů a pájek. Ve většině případů platí, že s rostoucí teplotou klesá hodnota povrchového napětí. U čisté mědi je tomu však naopak. Na velikost povrchového napětí pájky má dále vliv také druh tavidla, redukční atmosféra, stupeň vakua, a také i malá množství povrchově aktivních prvků pájky. Při pájení povrchové napětí ovlivňuje jak smáčivost a roztékavost na povrchu základního materiálu, tak i kapilární vzlínavost v mezeře spoje. [1,4,6]

Materiál	Teplota [°C]	$\sigma$ [mN.m <sup>-1</sup> ]	Materiál	Teplota [°C]	$\sigma$ [mN.m <sup>-1</sup> ]
Grafit	-	27	Ag72Cu	800	960
Cín	240	350	Ag44Cu	910	1040
Olovo	320	463	Měď	1145	1100
	350	440		1200	1160
	650	426			
	850	409			
Hliník	670	915			
Stříbro	995	920			
	1100	910			

Tab. 1 Hodnoty povrchového napětí –  $\sigma$  různých kovů a slitin, dostupné z [1]

### 1.2.2 Smáčivost

Smáčivost definujeme jako schopnost tekuté pájky přilnout k čistému povrchu základního materiálu při pracovní teplotě. Při smáčení základního materiálu (dále ZM) pájkou má kapka pájky takový tvar, při kterém je povrchová energie minimální a mohou tedy působit meziatomové síly.



Obr. 5 Schématické znázornění smáčivosti: a – smáčivost dobrá, b – smáčivost špatná;  $F_1$  – přitažlivé síly sousedících atomů ZM 1 a tekuté pájky 2;  $F_2$  – přitažlivé síly sousedících atomů tekuté pájky 2;  $F_3$  – přitažlivé síly sousedících atomů plynu 3;  $\alpha$  – stykový úhel;  $\sigma_{12}$  – mezipovrchové napětí mezi ZM 1 a pájkou 2;  $\sigma_{13}$  – mezipovrch. napětí mezi ZM 1 a atmosférou 3;  $\sigma_{23}$  – mezipovrch. napětí mezi pájkou 2 a atmosférou 3, dostupné z [1]

V bodě A z obr. 5 působí tři skupiny sil. První skupinou jsou přitažlivé síly atomů ZM a tekuté pájky ( $F_1$ ), které můžeme nazvat také silami adhezními. Druhé jsou síly kohezní  $F_2$  tvořené přitažlivými silami sousedících atomů v tekuté pájce a poslední skupinou jsou přitažlivé

síly atomů plynů. Působením těchto sil mohou nastat dva případy. Když jsou síly kohézní ( $F_2$ ) menší než adhezní, nastává dokonalá smáčivost a naopak když jsou síly kohezní větší než adhezní, tak se jedná o nesmáčivost.

Smáčivost je hodnocena velikostí stykového úhlu  $\alpha$ , který svírá tečna povrchu pájky s povrchem ZM (obr. 5). Při smáčení má kapka tvar, při kterém je povrchová energie systému ZM - 1 – pájka – 2 atmosféra – 3, minimální. Z toho vyplývá i základní rovnice smáčení:

$$\sigma_{12} + \sigma_{23} * \cos(\alpha) - \sigma_{13} = 0. \quad (1)$$

Ze které lze snadno vyjádřit stykový úhel smáčení:

$$\cos(\alpha) = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{12}}{\sigma_{23}} \Rightarrow \alpha = \arccos\left(\frac{\sigma_{13} - \sigma_{12}}{\sigma_{23}}\right). \quad (2)$$

Podle velikosti stykového úhlu  $\alpha$  rozeznáváme různé stupně smáčení:

- Pro úhel  $\alpha = 0^\circ$  nastává úplná nebo dokonalá smáčivost.
- Při  $\alpha < 20^\circ$  je smáčivost velmi dobrá (vhodná pro kapilární pájení).
- Při  $\alpha = 20^\circ$  až  $90^\circ$  nastává smáčivost dobrá (používaná při pájení nánosovém).
- Při  $\alpha > 90^\circ$  je smáčivost špatná (pájka je nevhodná pro jakýkoliv způsob pájení).

Snížit hodnotu smáčivosti pájky lze například snížením hodnoty mezipovrchového napětí, kterého lze dosáhnout vhodným legováním pájky, ZM a optimálními podmínkami pájení. Vliv má také kvalita pájené plochy, kde bylo zjištěno, že deformace povrchové vrstvy, která vzniká např. při třískovém obrábění nebo tažení zlepšuje smáčivost pájky. Nevhodné jsou povrchy leštěné. Důležitou podmínkou pájení je také teplota, při které k tavení dochází. Zejména u materiálů s vysokou tepelnou vodivostí, jako je např. Cu, Al je nutné, aby teplota ještě před stykem s roztavenou pájkou byla rovna minimálně teplotě solidu pájky. U materiálu se špatnou vodivostí (korozi vzdorná ocel) postačí minimální teplota pájeného povrchu asi o 25 % nižší, než je solidus pájky.

Minimální teplotu pájeného povrchu nazýváme smáčecí teplotou, kdy pájka povrch smáčí, aniž by se roztekla. Tohoto jevu se využívá především při nánosovém pájení. Při kapilárním pájení má být teplota pájeného povrchu nejen nad solidem, ale často i nad likvidem použité pájky. Smáčení je stejné jako roztékavost děj nevratný, tudíž není možné po smáčení a roztečení pájky opět vytvořit výchozí stav, protože ztuhlá pájka je spojena pevně se ZM v důsledku vzájemné rozpustnosti a difúze. Zpravidla se přitom mění i chemické složení pájky (obr. 4) [1].

### 1.2.3 Roztékavost

Roztékavost je schopnost tekuté pájky roztéci se při určité teplotě po povrchu materiálu. Je hodnocena velikostí smáčené plochy v  $mm^2$  při konstantních podmínkách. Pomocí této metody se porovnává např. vhodnost různých druhů pájek a ZM. [1]



#### 1.2.4 Vzlínavost

Vzlínavost je schopnost tekuté pájky působením kapilárních sil vyplnit při pracovní teplotě úzkou mezeru spoje. Kapilární síly lze vypočítat podle Laplaceova vztahu jako sílu vztahenou na jednotku plochy mezi dvěma rovnoběžnými plochami:

$$p_k = -\sigma_H \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [Pa], \quad (3)$$

kde  $r_1$  a  $r_2$  hlavní poloměry křivosti povrchu tekuté pájky,  
 $\sigma_H$  - adhezní napětí.

Kapilární vzlínavost pro svislý pájený spoj lze vyjádřit z rovnice, která udává rovnovážný stav, kdy dojde k vyrovnání hydrostatického tlaku sloupce pájky s kapilárním tlakem. Platí rovnice:

$$p_k + p_s = -\frac{2 \cdot \sigma_H \cdot \cos \alpha}{s} + \rho \cdot g \cdot h = 0 \quad [Pa], \quad (4)$$

kde:

$\rho$  – je hustota pájky při teplotě pájení [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],

$h$  – vzlínavost pájky [m],

$p_s$  – hydrostatický tlak sloupce pájky [Pa],

$s$  – šířka mezery [m],

$\alpha$  – stykový úhel [ $^\circ$ ],

$\sigma_H$  – je adhezní napětí [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ].

Z rovnice (4) pak už jen vyjádříme vzlínavost  $h$ :

$$h = \frac{2 \cdot \sigma_H \cdot \cos \alpha}{s \cdot \rho \cdot g} \quad [m]. \quad (5)$$

Z rovnice (5) vidíme, že kapilární vzlínavost je závislá na velikosti mezery spoje, povrchovém napětí pájky, druhu pájky a mírně i na hmotnosti.

Kapilární vzlínavost  $h$  pro spájený spoj vodorovný vypočteme z rovnice:

$$h = \frac{\sigma_H \cdot s \cdot \tau}{6 \cdot \eta} \quad (6)$$

kde:

$\sigma_H$  je opět síla adhezní napětí,

$s$  – šířka mezery [m],

$\tau$  – doba potřebná pro zatečení pájky do délky  $h$  [s],

$\eta$  – dynamická viskozita pájky [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ].

Z rovnice (6) vyplývá, že vzlínavost u vodorovného spoje je závislá na fyzikálních vlastnostech pájky (hlavně na adhezním napětí a dynamické viskozitě), šířce mezery spoje a době tečení pájky. [1,8]

### 1.2.5 Metalurgické reakce při pájení

Tuhý základní materiál a tekutá pájka jsou během procesu pájení určitou dobu ve vzájemném styku. Tato doba závisí na druhu ohřevu a pohybuje se v rozmezí několika sekund až minut. Podle druhu pájky a ZM může na hranici jejich styku nastat některá z těchto metalurgických reakcí:

- adhezní spojení,
- difúze,
- rozpouštění ZM pájkou,
- reakce složek pájky s povrchovým oxidem ZM.

Adhezním spojováním rozumíme takový případ, při kterém se pájka ani ZM vzájemně nerozpouští, jako je tomu např. u kombinací Pb – Fe, Pb – Cu, Ag – Fe, Ag - Cr atd. Adhezní spojení nachází využití v takových případech spojování, kdy nedochází ke změně chemického složení spojovaných materiálů, např. u výroby Si – diod. Adhezní spoj má dobrou elektrickou vodivost, ale bohužel vlivem nemísitelnosti spoje menší pevnost ve smyku a ohybu.

V ostatních případech, kterých se využívá více, dochází při pájení ke vzniku přechodové oblasti, které mají jiné chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti než spojované materiály. Takovýto pájený spoj se nejčastěji skládá ze čtyř oblastí. Na obr. 4 se jedná konkrétně o tyto oblasti:

1. ZM s nezměněným chemickým složením, popř. se strukturálními změnami po ohřevu (Cu).
2. Přechodová oblast na straně ZM ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ).
3. Přechodová oblast na straně pájky ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ).
4. Pájka ve vytaveném stavu (SnPb).

Vzájemná difúze mezi prvky ZM a pájky nastává tehdy, jsou-li přemístěny jejich atomy. Pro přemísťování atomů je důležitá heterogenita složení. Směr pohybu je dán gradientem koncentrace. Pro gradient koncentrace rovnoběžný s osou  $x$ , platí, že tok prvku A (tj.  $I_A$ ) v čase  $t$  a ve směru  $x$  jednotkovou plochou kolmou na tento směr je dán rovnicí:

$$I_A = -D_A \cdot \left( -\frac{\delta c_A}{\delta x} \right), (7)$$

kde:  $C_A$  – je koncentrace prvku A,

$D_A$  – jeho součinitel difúze.

Rovnici (7) odpovídá tvaru rovnice prvního Fickova zákona, který dokazuje skutečnost, že difúzní tok se zmenšuje tím více, čím více se složení pájky a ZM blíží k homogennímu stavu. [1,9]

Pomocí základních rovnic difúze (I. a II. Fickův zákon) byla zjištěna závislost difúze  $D$  na teplotě  $T$ :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{k \cdot T}\right), (8)$$

kde:  $D_0$  – je frekvenční faktor,

$Q$  – aktivační energie difúze,

$k$  – Boltzmannova konstanta.

Na difúzi mají dále také vliv poruchy struktury, gradient teploty a aktivity apod. Některé hodnoty součinitele difúze  $D$  jsou uvedeny v následující tabulce.

Základní materiál	Difundující prvek	Teplota [°C]	$D$ [cm <sup>2</sup> /s]
Sn	Cu	160	$9,4 \cdot 10^{-13}$
Cu	Ni	800	$3,5 \cdot 10^{-10}$
Cu	Ni	840	$3,6 \cdot 10^{-10}$
Cu – Zn	Ni	840	$7 \cdot 10^{-10}$
Cu – P	Zn	700	$2 \cdot 10^{-10}$
Cu	Zn	800	$4,5 \cdot 10^{-10}$
Cu	Zn	840	$3 \cdot 10^{-9}$

Tab. 2 Hodnoty difúzního součinitele  $D$  pro různé kombinace, dostupné z [1]

Hloubka difúze  $x$  lze vyjádřit z druhého Fickova zákona jako závislost součinitele difúze  $D$  a času  $t$ . Platí rovnice:

$$x^2 = 2 \cdot D \cdot t \quad (9)$$

Uvedené úvahy platí pouze pro difúzi v čistých kovech, protože difúze ve vícesložkových slitinách je jev velmi složitý.

Při difúzi pájky do ZM nastává současně i jeho rozpouštění v tekuté pájce. Rozpouštění probíhá tak, že atomy ze stykové plochy ZM přejdou do tekuté pájky. Snížení teploty tavení na stykové ploše ZM nastává důsledkem změny chemického složení, které je způsobeno vzájemnou difúzí ZM a pájky. Tok atomů ZM do tekuté pájky probíhá buď difúzí za statických podmínek, nebo prouděním za dynamických podmínek. V případě tečení pájky mezerou spoje nastává největší rozpouštění ZM v místě uložení pájky- na počátku roztavení je největší a poté se snižuje (viz obr. 1). Kinematika rozpouštění se řídí podle stádia, které má nejmenší rychlost přechodu atomů. Kinematiku rozpouštění tuhé fáze zformuloval A. N. Šukarev pomocí vztahu:

$$\frac{dQ}{dt} = K \cdot (C_0 - C) \cdot S, \quad (10)$$

kde:  $\frac{dQ}{dt}$  – je množství látky, které se rozpustí za jednotu času,

$S$  – povrch rozpuštěného ZM,

$C_0$  – koncentrace nasyceného tuhého roztoku,

$C$  – skutečná koncentrace tuhého roztoku v daném okamžiku,

K – konstanta rychlosti rozpouštění.

Pro austenitickou ocel se konstanta K pro pájku Ni – Si – B a teplotu pájení 1 130 až 1 200 °C pohybuje v rozmezí  $K = 1,4 - 2,5 \cdot 10^{-4}$  cm/s. Na vzájemnou rozpustnost má vliv druh ZM, pájky a podmínky pájení. Protože rozpouštění je ve většině případů jev nežádoucí, jako např. u spojování tenkostěnných materiálů, u pájení povlakovaných materiálu, polovodičů a supravodičů (kvůli změně chemických a elektrických vlastností), se musí rozpustnosti snižovat. Snižování rozpustnosti ZM v tekuté pájce je pak možné dosáhnout několika způsoby:

- použitím co nejnižší teploty pájení,
- co nejkratší doby pájení,
- minimálního množství pájky,
- legováním pájky. [1,10]

Vlivem difúze do ZM a jeho rozpouštění v tekuté pájce dochází ke změně chemického složení a změně fyzikálních a mechanických vlastností v místě spoje oproti výchozímu stavu. Tím dochází i k ovlivnění jak charakteru, tak i kinetiky krystalizace pájky v době vzniku pevné vazby mezi atomy ZM a tekuté pájky v místě spoje. Pro krystalizaci pájky v místě spoje platí obdobné zákonitosti, jaké existují pro odlévání. Kromě toho se vyznačuje některými zvláštnostmi, které je možno charakterizovat takto:

- výrazná likvidace pájky,
- aktivní vzájemné působení roztavené pájky a pevného ZM,
- řídicí vliv ZM,
- závislost charakteru krystalizace na množství roztavené pájky.

Díky podpoře pevného ZM, který usnadňuje krystalizaci pájky, se dokáže zárodky pevné fáze pájky vytvořit při malých stupních podchlazení a přesycení. Z Pjušminova energetického rozboru vyplývá, že práce, která je potřebná na vytvoření zárodku pájky na povrchu ZM je vždy menší než v objemu taveniny. Velikost potřebné práce na vytvoření zárodku ovlivňuje úhel stykového smáčení. Při dokonalé smáčivosti povrchu ( $\alpha=0^\circ$ ) bude práce na vytvoření zárodku minimální. V opačném případě, při špatné smáčivosti, ZM nemá vliv na vznik krystalizačních zárodků. [1]

### 1.3 Pájky

Pájka je přídavný materiál používaný při pájení, který vyplňuje mezeru mezi materiály a spojuje je.

Značení pájek, stejně tak jako přídavných materiálů pro svařování, bylo přizpůsobeno mezinárodnímu značení podle IIW (International Institut of Welding). Značení pájek se skládá ze tří znaků:

- První znak je písmeno (např. B), které značí, že se jedná o přídavný materiál pro tvrdé pájení (angl. Brazing).
- Druhý znak udává chemické složení hlavních legovacích přísad pájky, přičemž číslo za prvkem udává jeho průměrný obsah v %.
- Třetí znak udává hodnoty likvidu a solidu pájky.

Takže například pájka označena dle ČSN jako  $B - Sn50Pb - 215/185$  značí, že se jedná o pájky pro tvrdé pájení (B), která se skládá primárně z prvků cínu (Sn) a olova (Pb), přičemž průměrný obsah olova v pájce je 50 %, hodnota likvidu této pájky je 215 °C a hodnota solidu 185 °C.

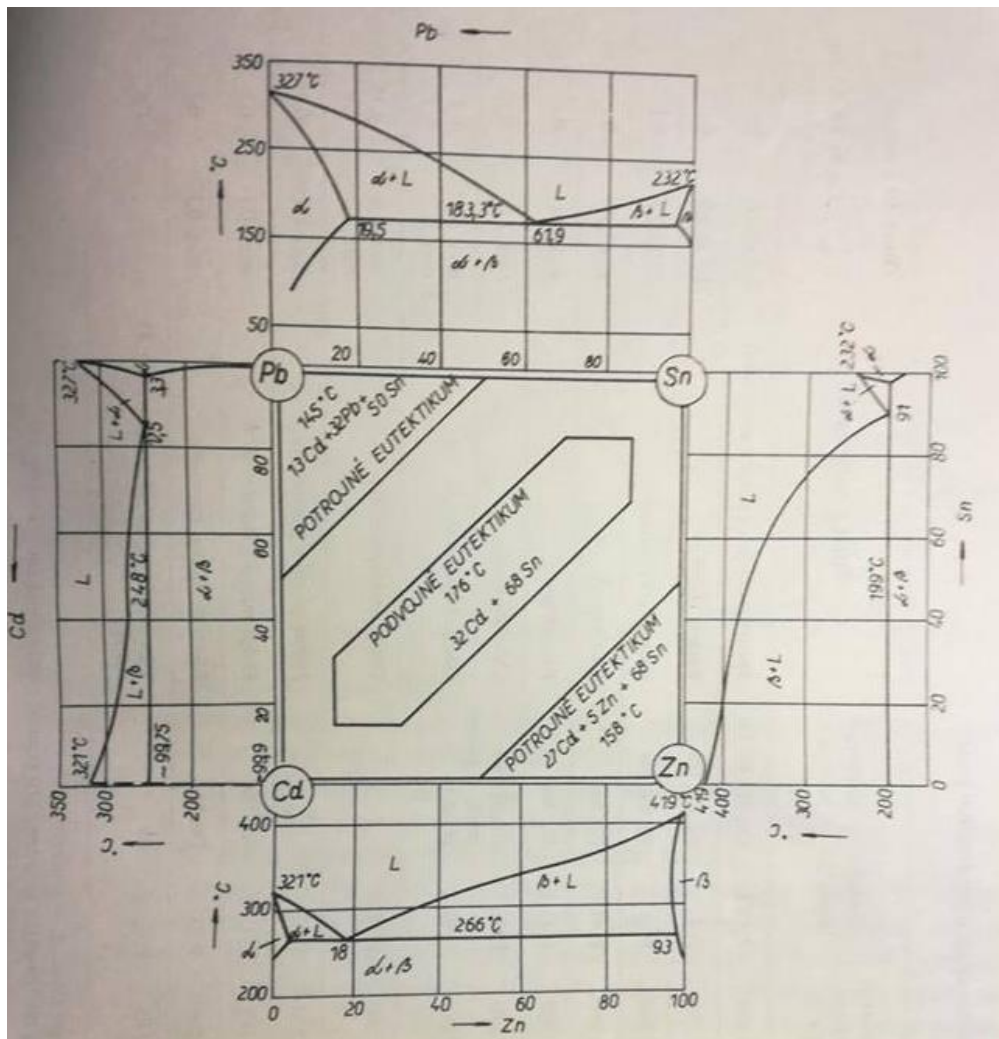
„Vlastnosti pájek se poté posuzují z několika hledisek:

- Teplota tání pájky musí být vždy nižší než teplota spojovaných materiálů.
- Pájka nemusí mít stejné, ani podobné chemické složení se spojovaným materiálem jako je tomu u svařovacích drátů.
- Pro kapilární pájení je důležité, aby pájka měla dobrou pájitelnost (smáčivost, roztékavost, vzlínavost). Pro pájení nánosové postačuje pouze dobrá smáčivost.
- Je kladen vysoký požadavek na čistotu surovin pro výrobu pájek, protože nečistoty v pájce obsažené výrazně zhoršují deformační vlastnosti a korozní odolnost pájeného spoje.
- Povrch ZM a pájky by měl mít určitou rozpustnost a schopnost difúze a neměl by se ZM tvořit křehké intermediární fáze. Tento faktor však závisí i na kombinaci ZM- pájka, teplotě i době pájení.
- Je také vhodné, když má pájka při pracovní teplotě malé povrchové napětí a nízkou viskozitu.
- Aby bylo zabráněno možné pozdější korozi, je vhodnější pájka, jejíž prvky mají malý rozdíl elektrochemického potenciál se styku s použitým ZM.
- Pájky musí mít nejen dobré mechanické vlastnosti (pevnost ve styku, v tahu, tažnost, tvrdost) samy o sobě, ale musí mít zvláště schopnost vytvářet pevné spoje. To je závislé na chemickém složení pájky a jakosti difúzní oblasti spoje.
- Vysokou tažnost, dobré pájecí vlastnosti, ale nižší pevnost mají kovy čisté. Eutektické pájky mají obdobné vlastnosti jako čisté kovy. Jsou ovšem tvrdší, pevnější a křehčí.
- Méně pevné, ale tažnější pájky jsou vhodné pro spoje, které jsou namáhány chvilkovým extrémním namáháním, protože chvilkové extrémní napětí by mohlo způsobit u křehkého spoje tvorbu trhlin.
- Z technologických důvodů se vyžaduje vhodný výrobní tvar pájky, který se volí podle několika kritérií, jako např. pro které ZM je pájka určena, a jak je konstruován spoj, která z pájecích technologií je k dispozici, způsob namáhaného spoje, hospodárnost výroby.“  
[1]

Pájky se všeobecně dělí podle teplot tavení, a to na měkké (solder), u kterých dochází u tavení při teplotách nižší než 450 °C a pájky tvrdé (brazé), které se taví nad touto teplotou.

### 1.3.1 Měkké pájky

Měkké pájky jsou charakteristické především nízkou pracovní teplotou a malou pevností. Využívají se tedy ve spojích, které nejsou pevnostně a tepelně namáhány. Skládají se ze slitin těžkých kovů, jako např. Sn, Pb, Cd, Sb a Bi, které se taví při nízkých teplotách. Používání olovnatých pájek bylo značně sníženo, kvůli jejich škodlivým karcinogenním účinkům. Do skupin měkkých pájek patří pájky cínové a speciální (pájky pro potravinářský a chladírenský průmysl, pro pájení skla, pro elektroniku a elektrotechniku).



Obr. 6 Rovnovážné diagramy měkkých pájek na bázi Pb-Sn, Sn-Zn, Zn-Cd, Cd – Pb; tvorba potrojného a podvojného eutektika uvedené kombinace prvků (podle Metals Handbook), dostupné z [1]

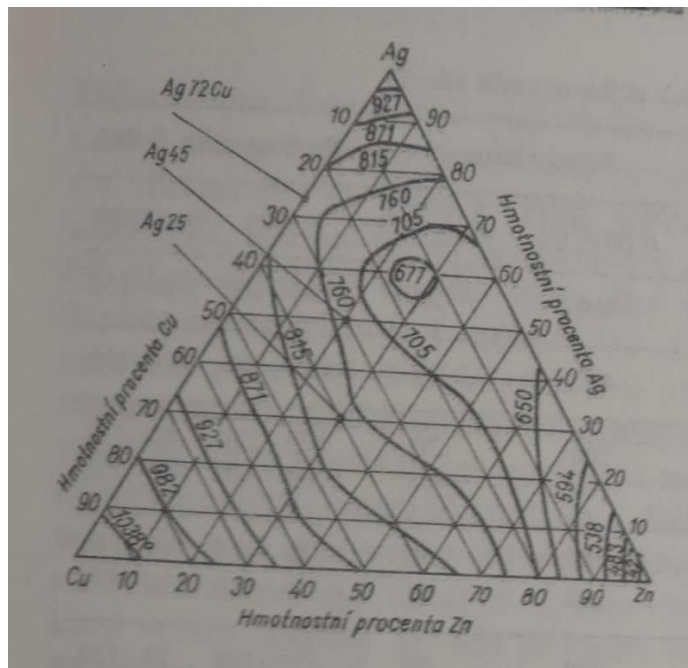
### 1.3.2 Tvrdé pájky

Tvrdé pájky jsou charakteristické pro své využití u spojů s provozní teplotou nad 20 °C, kde jsou vystaveny vyššímu mechanickému namáhání nebo pracuje-li pájená součást za zvýšených teplot. Hlavními složkami pro tvrdé pájky jsou drahé nebo běžné kovy, jako např. kovy na bázi mědi, stříbra, mosazu, niklu, železa, palladia nebo jejich různých kombinací.

Tvrdé pájky na bázi mědi jsou vhodné pro spojování železných i neželezných kovů s teplotou tání nad 1 000 °C.

Mosazné pájky jsou slitiny obsahující zinek a měď. Na obr. 8 je znázorněn rovnovážný diagram Cu-Zn. Pájka s obsahem mědi okolo 60 % má pracovní teplotu okolo 900 °C. S klesajícím obsahem mědi jsou pájky sice levnější, ale mají nižší teplotu tání a dávají poměrně křehké spoje. To je způsobeno složením struktury, která se skládá s fází  $\beta$ , resp.  $\gamma$ . Kvalita mosazných pájek závisí na obsahu zinku, který má být nižší než 40 %. Zinek má totiž tu





Obr. 8 Rovnovážný diagram slitiny Ag-Cu-Zn, dostupné z [1]

Pájky na bázi niklu jsou pro svoji odolnost proti korozi, oxidaci, atd. vhodné pro žárovečné a žárovzdorné pájky, které se používají pro pájení žárovečných, žárovzdorných a korozivzdorných ocelí a slitin. Tyto pájky mají dobré pájecí vlastnosti a nedostatečnou tvářitelnost, takže se mohou vyrábět pouze třemi způsoby a to ve formě prachu (zrnění 0,1 až 0,3mm), pasty, kde je prach smíchán s organickým pojidlem (aceton, ethylalkohol) nebo ve formě tenké folie, která je nanese na lepenku pomocí lepidla. Výhodou těchto pájek je také jejich cena, která je podstatně nižší, než u pájek Ag. [1]

#### 1.4 Tavidla

Mají za úkol zlepšit smáčivost pájeného spoje a viskozitu, rozpouštět v maximální míře a co nejrychleji oxidy základního materiálu a pájky ještě před pájením. Zbytky tavidla musí být snadno odstranitelné po vychladnutí spoje. Tavidla lze rozdělit podle způsobu pájení na tavidla pro měkké pájení (chlorid zinečnatý, kalafuna, kyselina solná) a tavidla pro tvrdé pájení (borax, kyselina boritá). [1,4]

#### 1.5 Metody pájení

Na vzájemné spojování kovů pájením se používají různé metody, které se od sebe liší především způsobem a rychlostí ohřevu pájeného místa. Důležitou úlohu mají také investiční a provozní náklady, potřeba pracovního prostoru a možnost mechanizace a automatizace pracovního pochodu pájení. Existuje mnoho způsobů pájení, jako např. v peci, v solné lázni, páječkou, plamenem, v kovové lázni, s odporem, indukční, ve vakuu, reakční, ponorem, ultrazvukem, horkým vzduchem, atd. Dále pak lze použít i kombinaci pájky a svařovací



metody, jako tomu bude v experimentální části bakalářské práce, kde bude břitová destička ze slinutého karbidu pájena k materiálu z rychlořezné oceli za pomoci metody TIG. [1,4]

## 1.6 Destruktivní a nedestruktivní zkoušky pájeného spoje

K zjišťování kvality a vlastností pájených spojů se používá různých druhů zkoušek. Ty se dělí všeobecně na nedestruktivní a destruktivní zkoušky pájených spojů

### 1.6.1 Nedestruktivní zkoušky pájených kovů

Jednotlivé postupy těchto zkoušek pro pájené spoje jsou popsány v normě ČSN EN 1279 Tvrdé pájení – Nedestruktivní zkoušky pájených spojů. Mezi nedestruktivní zkoušky patří vizuální kontrola, kontrola ultrazvukem, prozářením, kapilární metodou, zkouškou těsnosti.

U vizuální kontroly se spoje kontrolují na přítomnost vad a na tvar. Při kontrole se musí brát v úvahu odstranění zbytků tavidla, minimální velikost vady, spojitost koutových spojů, propadlé koutové spoje, nadbytek pájky, eroze povrchu a vzhled povrchu koutového spoje.

Kontrola ultrazvukem a její jednotlivé techniky jsou uvedeny v normě EN 583 – 1 až 3. Ke kontrolování spojů dochází pomocí impulzové odrazové nebo průchodové techniky. Ultrazvukem se nejčastěji kontrolují vady jako například: neúplné zatečení do kapilárních mezer, jemné a velké póry nebo vměstky tavidla, podélné a příčné trhliny, neúplné smáčení povrchů základního materiálu.

Ke zjišťování otevřených vad vycházejících na povrchu, se používá kapilární metoda. Pomocí této metody lze sledovat vady jako je pórovitost, neúplné zatečení nebo nedostatečná smáčivost. Kapilární metoda je jednoduchá, a tak se u pájených spojů používá. Její postupy, pravidla a metody jsou popsány v normě EN 571 – 1.

Další metodou, která je založena na principu vystavení pájené soustavy vyššímu zatěžování, než kterému bude vystavena po dobu své životnosti za předpokladu, že nevzniknou trvalé deformace, je ověřovací zkoušení. Zkoušení se provádí různými metodami. Volba metody závisí na tvaru zkušebních vzorků, které se mohou zatěžovat tahem, tlakem, hydrostaticky, pneumaticky, zkrutem, tepelnými šoky nebo opakovanými tepelnými změnami.

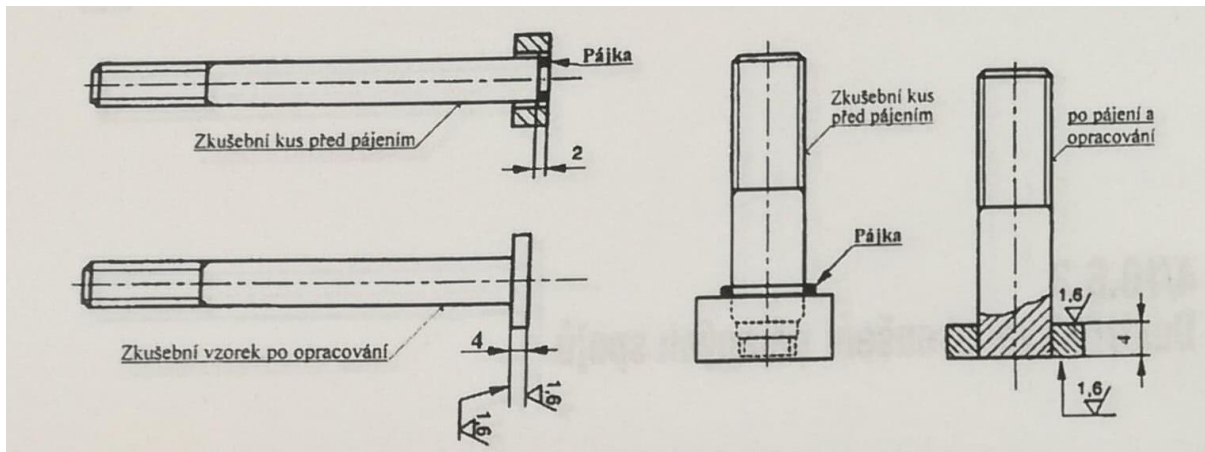
Termografické zkoušení pájených spojů se provádí v celé délce spoje. Sleduje se tepelné rozložení na spoji a zjišťuje nespojené oblasti. Zkoušení se provádí technikou infračerveného zobrazení. [16], [19]

### 1.6.2 Destruktivní zkoušení pájených spojů

Potupy destruktivního zkoušení pájených spojů a typy zkušebních vzorků potřebných pro provádění zkoušek jsou popsány v normě ČSN EN 12797. Volba vhodné zkoušky závisí na požadavcích, které jsou na pájený spoj kladeny.

Norma neobsahuje doporučení pro počet zkušebních vzorků, nekomentuje kritéria přípustnosti vad pro jednotlivé zkoušky, ani nepopisuje příčiny vad nebo jejich vliv na jakost spoje a na procesech omezujících jeho životnost. Mezi destruktivní zkoušky patří zkouška smykem, tahem, tvrdosti, lámavosti, odlupovací zkouška a metalografická kontrola.

Při zkoušce smykem je vzorek vystaven mechanickému namáhání ve smyku do lomu, přičemž se stanoví jeho mechanické vlastnosti. Postupy a popis zkoušky je popsán v normě ČSN EN ISN 5187 a výsledky se uvádějí v protokolu o zkoušce.



Obr. 9 Zkušební vzorky pro zkoušku smykem, dostupné z [16]

Podobný postup jako u smyku, ale s mechanickým namáháním v tahu do lomu se nazývá zkouška tahem. Stanovují se tak další mechanické vlastnosti (pevnost v tahu). Zkouška je popsána v normě ISO 5187.

Zkouškou, kterou kontrolujeme jakost makro, ev. mikrostruktury pájeného spoje se jmenuje metalografická kontrola. Při této kontrole je důležitá příprava zkušebních vzorků. Vzorky se vhodně rozříznou, brousí a leští, přičemž nesmí dojít ke změně struktury spoje a pozorovaná plocha musí být bez rýh, děr a skvrn.

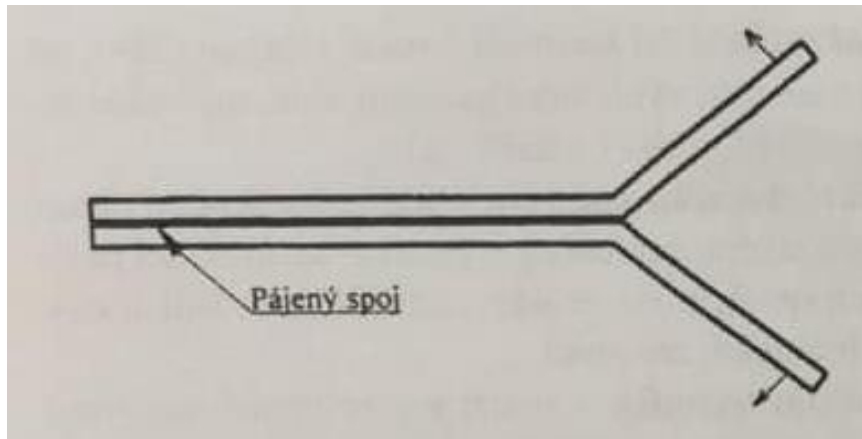
Při makroskopické zkoušce pozorujeme vzorky při malém zvětšení (25x) a vyhodnocuje se zatečení, zanesení vměstky, pórovitost, trhliny, a další vady.

Makroskopická kontrola se provádí na mikroskopu a pozoruje se struktura pájených ploch, eroze, reakce základní kov – pájka, jevy na hranicích zrn apod. Výsledky o zkoušce se uvádí do protokolu o zkoušce.

Pokud chceme zjistit metalurgický stav základních materiálů nebo difuzní charakteristiku, tak použijeme zkoušku tvrdosti, při které se provádí vtisk na povrchu zkušebního vzorku, jehož velikost ve spojení s použitým zatížením dává tvrdost povrchové vrstvy. Tvrdost se měří v oblasti pájky a v blízké oblasti základního materiálu.

Zkouška makrotvrdosti se může provádět třemi metodami, a to podle Vickerse (dle EN ISO 6507 – 1), Brinella (ČSN EN ISO 6506 – 1) nebo Rockwella (dle ČSN EN ISO 6508 – 1). U zkoušky mikrotvrdosti se dělají buď podle Vickerse (EN ISO 6507 -1) nebo Knoop (ISO 4545).

Odlupovací zkouška – části pájeného spoje jsou navzájem rozpojeny pro stanovení jakosti vizuální kontrolou. Princip zkoušky spočívá v upnutí jedné strany vzorku do svěráku a odloupení druhé, a poté se oddělené plochy vizuálně vyhodnotí podle normy EN 12799. Stanovuje se kvalita vazby, přítomnost nespájených ploch, dutin a vměstku tavidla ve spoji. Pokud se použije trhací stroj, mohou se získat i zajímavé informace z velikosti síly potřebné k odlupování.



Obr. 10 Zkušební vzorek pro odlupovací zkoušku, dostupné z [16]

Další zajímavou zkouškou, která může poskytnout určité hodnocení schopnosti deformace pájeného spoje během jeho životnosti je zkouška lámavosti. Zkouška se provádí tak, že pájený spoj je namáhán (deformuje se) na ohyb a z toho se určí tažnost a odolnost vůči vzniku trhlin v pájeném spoji, tepelně ovlivněné oblasti a pájené oblasti. Zkouška se provádí podle normy ISO 7438, podle které se deformuje buď volným ohybem nebo řízenou zkouškou lámavosti kolem vhodného, předem stanoveného poloměru. Výsledky zkoušky se zapisují do zkušebního protokolu. [16]

## 1.7 Porovnání pájení a svařování

- a) Z hlediska pájecí/svařovací teploty;

Při tavném svařování musíme dosáhnout takové svařovací teploty, která je nad teplotou tání základního a přídavného materiálu. Naopak u pájení dochází k tavení pouze přídavného materiálu a základní materiál je pouze ohřát na teplotu, které je nižší než je jeho teplota tavení. U měkkého pájení se tato pájecí teplota pohybuje v rozmezí od 50 až 450 °C, u tvrdého je to pak 600 až 1 200 °C, takže pájení má technicko-ekonomické výhody.

- b) Kombinace základního a přídavného materiálu;

U svařování mají základní a přídavné materiály prakticky stejné chemické složení, kdežto u pájení nikoli. Z toho plynoucí nevýhodou pájeného spoje je jeho nižší pevnost a mechanická výdrž.

- c) Časový průběh při svařování a pájení;

Svařovací pochod vyžaduje vysokou koncentraci tepelné energie do úzké oblasti, kde dochází k místnímu tavení spojovaných materiálů. Zrychlení svařovací rychlosti lze nejčastěji dosáhnout zvýšením odtavovacího výkonu.

U pájení toto neplatí, protože je důležité hlavně vytvořit správné podmínky pro tečení pájky v místě spoje.

- d) Tepelné zdroje;

U svařování se používá především elektrický oblouk s vysokou koncentrací tepelné energie do úzkého spoje, ale používá se i mnoho jiných různých tepelných zdrojů. Pájení

nevyžaduje tak velké pracovní teploty jako svařování. Oblast spoje musí být rovnoměrně ohřata na pracovní teplotu. Tepelné zdroje pro ohřev jsou různé a podle nich je určována technologie pájení. Technologické podmínky pro pájení jsou univerzálnější než pro svařování. Určitý rozdíl v pájení vzniká při tvrdém a měkkém pájení, kdy vzniká určitý rozdíl zejména u doby pájení.

e) Pracovní kvalifikace, zručnost dělníka;

Při svařování je potřeba se řídit určitými pravidly a postupy, přičemž např. vedení elektrody při ručním obloukovém svařování vyžaduje velkou manuální zručnost svářeče.

U pájení tyto požadavky nepřípadají v úvahu, proto zručnost pájecích pracovníků může být nižší a tím se dají snížit i mzdové náklady. Přesto se dosáhne vysoké reprodukovatelnosti pájení a kontrola jakosti je také snadnější.

f) Vlastnosti svařovaných/pájených spojů;

Hotový svařovaný spoj můžeme z hlediska chemického složení materiálu považovat za homogenní. Materiál svaru má buď stejnou, nebo větší pevnost než ZM. Stejnou nebo přibližnou můžeme považovat i odolnost proti korozi. Nevýhodou je vznik velkého vnitřního pnutí, smršťování a deformací svaru nebo svařence. Naopak pájený spoj je z hlediska materiálu heterogenní. Vlastnosti pájky jsou zpravidla odlišné od vlastností základního materiálu. Proto nejde pro pájení použít stejné spoje jako pro svařování. Pevnostní a deformační charakteristiky pájených spojů určuje řada různých činitelů. U tvrdého pájení při běžném namáhání, lze vhodnou konstrukční úpravou a vhodným doplňkovým tepelným zpracováním spoje dosáhnout stejné únosnosti, jakou má základní materiál. Odolnosti proti korozi je u pájených spojů horší než u ZM. Výhodou pájeného spoje je mimo jiné to, že spoj má pěkný vzhled, takže není třeba dalšího mechanického obrobění.

Při ručním pájení (zejména tvrdou pájkou) bývá problém odstranit zbytky tavidla ze spoje, které většinou napomáhají korozi. [1]

## 2 Technologie svařování metodou TIG

Při svařování metodou 141 (TIG) se jedná o obloukové svařování, které spočívá v zapálení a hoření elektrického oblouku umístěného mezi základním materiálem a netavicí se elektrodou. Zkratka TIG je z anglických slov Tungsten Inert Gas (německý ekvivalent WIG – Wolfram Inert Gas). Svarová lázeň, elektroda a blízké okolí materiálu je chráněno inertním plynem před účinky okolní atmosféry, hlavně pak před kyslíkem a dusíkem ze vzduchu. Jako inertní (netečný) plyn se u metody TIG používá argon, helium nebo jejich směsi. Elektroda je vyrobena z wolframu a dalších legujících prvků. Elektrický oblouk při TIG svařování je trvalý elektrický výboj mezi katodou (+) a anodou (-) ve vodivém prostředí. Aby došlo ke vzniku takového oblouku je nutno dodávat elektrický proud o hodnotách vyšších než 0,3 A a určitý tlak plynu (nejčastěji atmosférický) Elektrický oblouk je charakteristický intenzivním vyzařováním ultrafialového, viditelného a infračerveného záření. Teplota ve sloupci oblouku může dosahovat 6 až 10 tisíc °C. Svařovací oblouk TIG má také schopnost odstraňovat povrchové oxidy na základním materiálu. Je to fyzikální jev, který se nazývá čisticí účinek oblouku, ke kterému dochází při zapojení na nepřímou nebo střídavou polaritu.

Elektrický oblouk lze zapalovat dvojím způsobem:

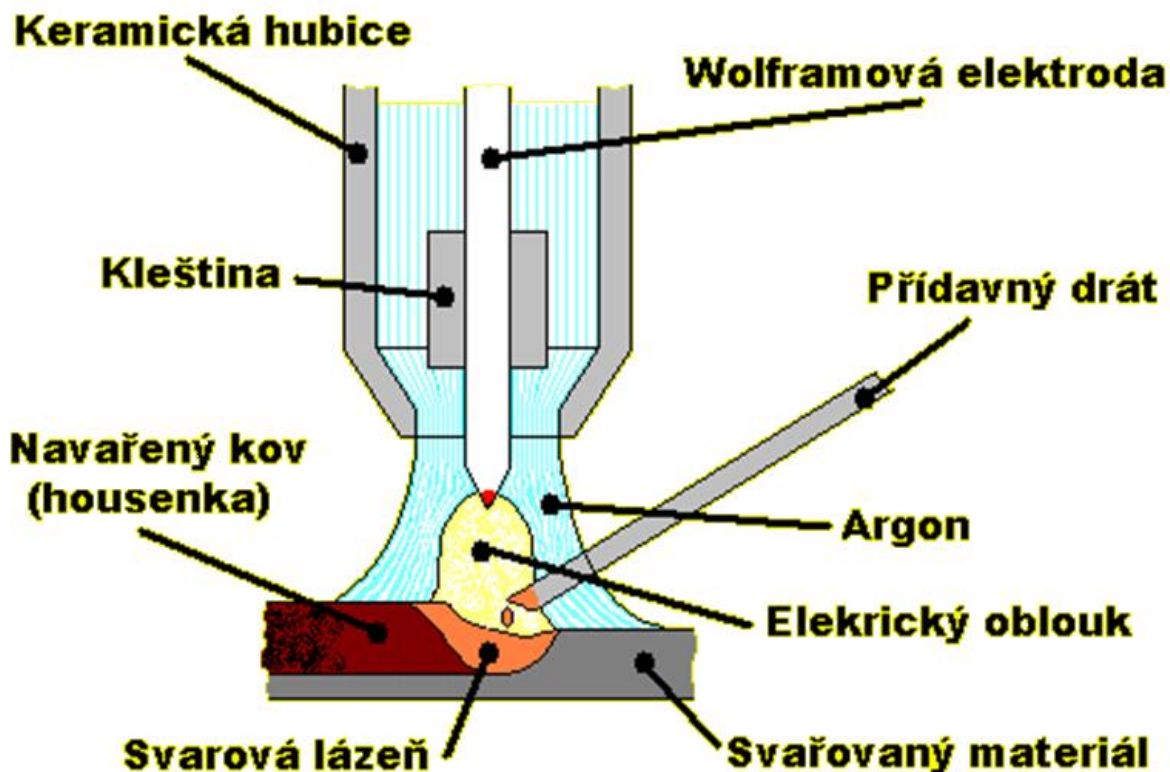
- Dotykově – To znamená, že se wolframová elektroda dotkne svařovacího materiálu a následně rychle oddálí na malou vzdálenost, aby vzniklo zkratové napětí v oblouku.
- Bezdotykově – Za pomoci vysokého napětí a frekvence, jehož zdrojem je vysokofrekvenční ionizátor, se ionizuje plyn a následně dojde k zapálení oblouku (bez zkratového zapálení oblouku).

Ve většině případů se používá bezdotykového způsobu zapalování, protože při dotykovém zapalování dochází k znehodnocení wolframové elektrody a následně ke vzniku wolframových vměstků. [16]

## 2.1 Princip svařování

Princip spočívá v tom, že netavící se wolframová elektroda, které má žhavicí teplotu kolem 4 000°C (záleží na druhu legovacího oxidu), je upnuta v hlavici hořáku do kleštin, pomocí nichž je také do elektrody přenášen svářecí proud (obr. 11). Svářecí proud musí být při svařování TIGem neměnný o předem stanovené hodnotě. Hořák je dále opatřen hubicí, kterou ven proudí plyn vytvářející v místě svařování netečnou (inertní) ochrannou atmosféru, která chrání tavnou lázeň před oxidací a usnadňuje zapalování oblouku.

Svařování může být provázeno buď pouze roztavením a slitím ZM dohromady nebo za pomoci přídavného materiálu, který má podobné složení jako ZM. „Při ručním TIG svařování drží drát svářeč ve druhé ruce (v první ruce má hořák) a přidává jej do lázně po kapkách dle potřeby. V tomto případě mluvíme o ručním TIG svařování. TIG svařování lze také částečně mechanizovat, nebo úplně automatizovat. Při částečné mechanizaci stále svářeč v ruce drží hořák, ale drát je podáván bovdenem pomocí speciálního, motorem hnaného, podavače do oblouku. Posun drátu ovládá svářeč tlačítkem na hořáku. Při úplné automatizaci je hořák upnut ve stroji a vše je řízeno automaticky - tedy vedení hořáku i přidávání drátu.“ [11]



Obr. 11 Princip svařování TIG, dostupné z [11]

## 2.2 Ochranné plyny

Ochranné plyny při svařování TIG mají za úkol zajistit především ochranu wolframové elektrody, tavné lázně a ZM před účinky atmosféry. Zároveň mají vliv na tepelný výkon svařovacího oblouku, jeho zapálení a stabilitu po celý čas svařování. Dnes se pro TIG svařování používají inertní ochranné plyny, jako je argon (Ar), helium (He) nebo jejich směsi. Volba ochranného plynu pro daný ZM závisí především na kvalitě svarového spoje a vysoké ceně těchto plynů.

Argon patří mezi inertní plyny (netečné). Inertní znamená, že nereaguje s jinými chemickými prvky. Je to plyn bez chuti, barvy a zápachu, který je těžší než vzduch, má malou tepelnou vodivost, nízkou ionizační energii a proto usnadňuje zapalování a stabilizaci elektrického oblouku. Vyrábí se destilací zkapalněného vzduchu, ve kterém je obsažen. Argon obsahuje také nečistoty jako je dusík, kyslík, vodík a vlhkost. Tyto příměsi mají negativní vliv na svařované spoje, a proto se musí používat argon o vysoké čistotě, a to v rozmezí od 99,7 do 99,999 %. Argon s nejvyšší čistotou se používá pro spoje obzvlášť citlivé na kyslík a dusík za nízkých teplot (do 200 °C), protože snižuje nebezpečí křehnutí a vzniku trhlin. Označení argonu dle ČSN EN ISO 14175: I – označení pro inertní plyn, 1 – identifikační číslo pro čistý argon.

Helium je plyn bez chuti, zápachu, barvy a je lehčí než vzduch. Vyrábí se destilací vzduchu nebo štěpením zemního plynu. Má nízkou ionizační schopnost a vyžaduje dvakrát vyšší napětí svařovacího proudu, než má argon. Díky vysokému teplenému výkonu, které helium poskytuje, má vyšší rychlost svařování, ale elektrický oblouk se obtížněji zapaluje, má horší stabilitu a hoří neklidně.

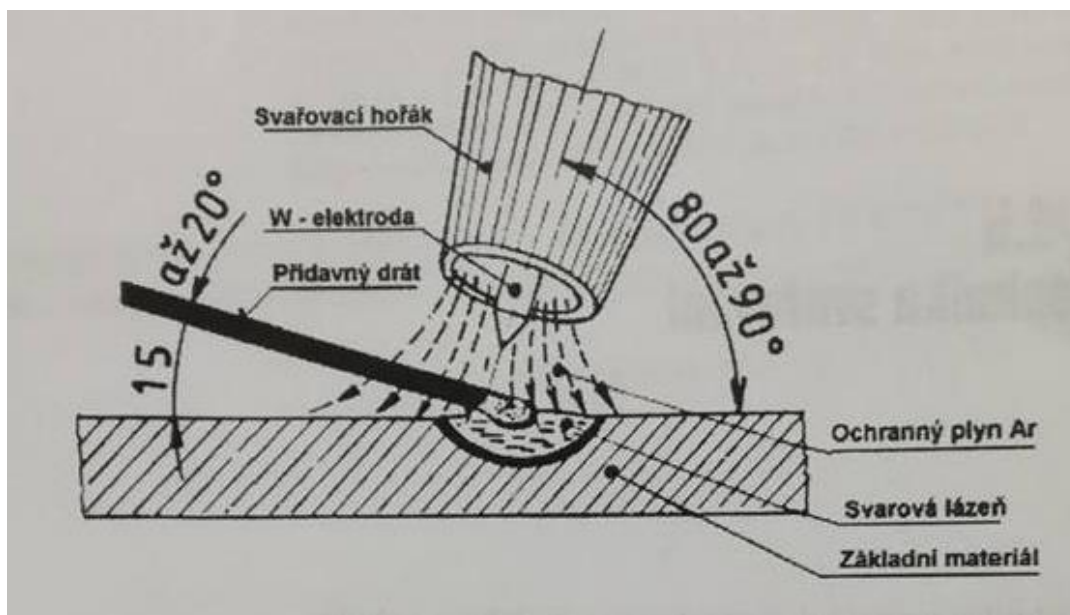
Čistota helia se vyžaduje v ještě vyšší míře než u argonu (od 99,996 do 99,999 %). Svařování TIGU v čistém heliu se téměř nepoužívá, jeho kladné vlastnosti jsou využívány v kombinaci s argonem. Identifikační číslo pro čisté helium je 2 dle normy ČSN EN ISO 14175.

„Směsi argonu a helia tvoří samostatnou skupinu inertních plynů. Množství helia se pohybuje v rozmezí 1 až 95 %. Se stoupajícím obsahem helia stoupá i napětí na oblouku a tím roste i tepelný výkon oblouku TIG.“ [16] Proto můžeme použít vyšší svařovací rychlosti, což vede k vyšší produktivitě práce. Často se směs helia a argonu využívá při svařování materiálů o větších tloušťkách a větší tepelnou vodivostí. Zde jsou uvedeny některé směsi, které se nejčastěji užívají při svařování: 70/30 (70 % Ar a 30 % He), 50/50 a 30/70). Identifikační číslo pro tyto směsi je 3. [16], [18]

### 2.3 Technika svařování

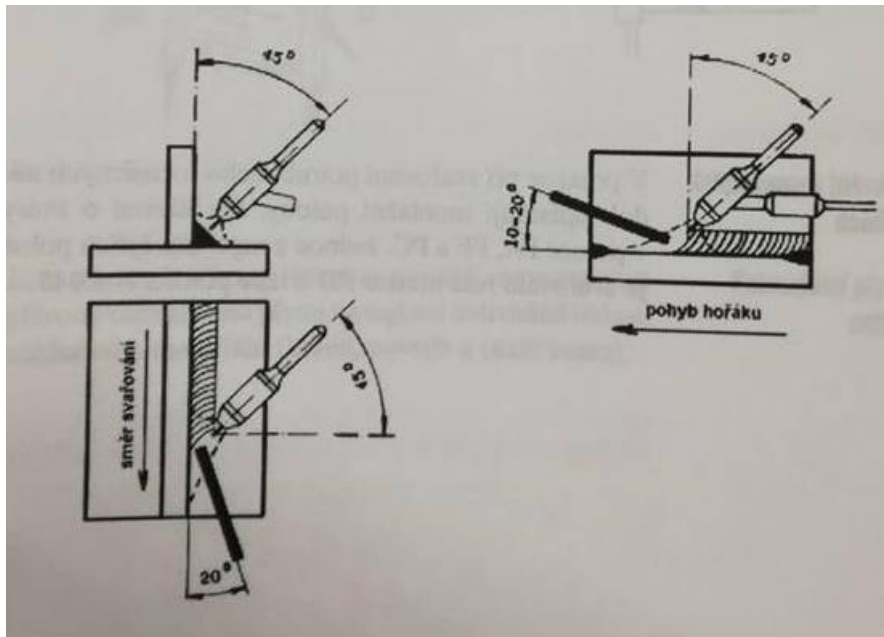
Technikou svařování je myšlena charakteristika polohy a pohybu svařovacího hořáku a přídavného materiálu vzhledem ke svařovanému materiálu. Svařování TIGem vyžaduje postup svařování dopředu. To znamená, že přídavný materiál se pohybuje před hořákem od pravého okraje ZM doleva. Dochází k natavování ZM a přídavný materiál v podobě svařovacího drátu se postupně odtavuje, proud ochranného plynu není narušen a tím se dosáhne pravidelného spoje.

Pro tupé spoje je svařovací hořák veden pod úhlem 80 až 90° a přídavný materiál pod úhlem 10 až 15° vzhledem k ZM (obr. 12). Délka elektrického oblouku je 6 až 10 mm.



Obr. 12 Vzájemná poloha hořáku a přídavného materiálu při svařování svaru tupého, dostupné z [16]

U koutových svarů je důležité, v porovnání se spoji tupými, zvýšit množství dodávaného tepla až o 10 % a zvětšit vzdálenost hubice hořáku od ZM. Vyložení elektrody se volí 1,5 až 2 násobek průměru elektrody. Z hlediska ochrany svarové lázně se také mění poloha hořáku a přídavného materiálu (obr. 13). [16]



Obr. 13 Poloha hořáku a přídavného materiálu pro koutové spoje v poloze vodorovné a šikmo shora, dostupné z [16]

## 2.4 Výhody a nevýhody TIG svařování

Svařování metodou TIG je výhodné, protože:

- Poskytuje účinnou ochranu svarové lázně v inertním ochranném plynu před škodlivými účinky vzduchu (hlavně kyslíku).
- Poskytuje koncentrovaný paprsek, díky kterému máme tak výbornou kontrolu nad svarovou lázní.
- Lze svařovat i bez přídavného materiálu (např. roztavením lemu u lemovaného spoje). Svarové kovy mají stejné chemické složení jako základní materiál a nedochází k zavlečení jiných prvků do svarového kovu.
- Díky vysoké teplotě oblouku je možné pomocí metody TIG svařovat materiály, které by při použití jiné metody nešly roztavit (vysokolegované ocele). Zároveň je ale teplotní pole velmi úzké a nedochází tak k tepelnému ovlivnění základních materiálů v tak velké míře.
- Přisun tepla do svaru je možné efektivně regulovat.
- Po svaření není třeba svar dodatečně upravovat (odstraňovat strusku, kuličky).
- Lze svařovat i v místech s nižší dostupností.

Mezi nevýhody při použití metody TIG patří:

- Vysoká technická náročnost na svařovací zařízení,
- Malá produktivita. [17]

## 2.5 Parametry svařování

„Svařovací parametry určuje svářečský dozor (inženýr, technolog svařování) podle výrobních postupů svařování (WPS) v souladu s normami: ČSN EN ISO 3834; ČSN EN 287-4; ČSN EN ISO 9606, ČSN EN ISO 5817; ČSN EN ISO 15 609 a ČSN EN ISO 9000, které podmiňují jakost svarového spoje.

Tepelný režim při svařování metodou TIG je daný třemi základními parametry:



- Velikost svařovacího proudu – volí se podle tloušťky, tepelné vodivosti ZM, podle typu spoje, polohy svařování a svařovací rychlosti
- Velikost napětí na oblouku – závisí na délce oblouku
- Rychlost svařování – závisí na intenzitě svařovacího proudu a na jeho druhu

Normy také uvádějí doplňkové parametry a technologické podmínky svařování, mezi které patří:

- chemické složení netavící se elektrody;
- průměr netavící se elektrody – volí se podle intenzity svařovacího proudu;
- vyložení elektrody – záleží na typu svarového spoje a geometrii úkosu;
- Vrcholový úhel elektrody – závisí na svařovacím proudu
- Průměr přídavného materiálu – volí se podle velikosti svařovacího proudu a tloušťce ZM
- Průměr hubice hořáku – volí se podle přístupnosti do svaru a šířky svaru
- Velikost pulzačního proudu – závisí na tloušťce a poloze svařovaného materiálu
- Velikost průtoku ochranného plynu – závisí na tloušťce ZM, na vnějším pracovním prostředí a na geometrii svarového úkosu
- Sklon přídavného drátu – závisí na poloze svařování a přístupnosti do místa svaru
- Sklon hořáku – závisí a poloze svařování a přístupnosti do místa svaru.“ [16]

### 3 Slinuté karbidy a jejich využití

Slinuté karbidy (dále SK) jsou zde uvedeny z důvodu, že v experimentální části bude destička ze SK připájená k oceli pomocí pájení metodou TIG. Slinuté karbidy se vyrábí technologií práškové metalurgie. „Základem výroby je lisování směsi prášku tvrdých karbidových částic s práškem pojiv a její následné slinování.“ [14]

#### 3.1 Dělení slinutých karbidů

Slinuté karbidy jsou v dnešní době nejpoužívanějším řezným materiálem. Protože vlastnosti a složení SK jsou rozdílné, bylo nutno rozdíly popsat a označit s všeobecnou platností. Proto také zaujímají samostatnou normu v systému ISO. Podle normy ČSN ISO 513 se slinuté karbidy označují symboly:

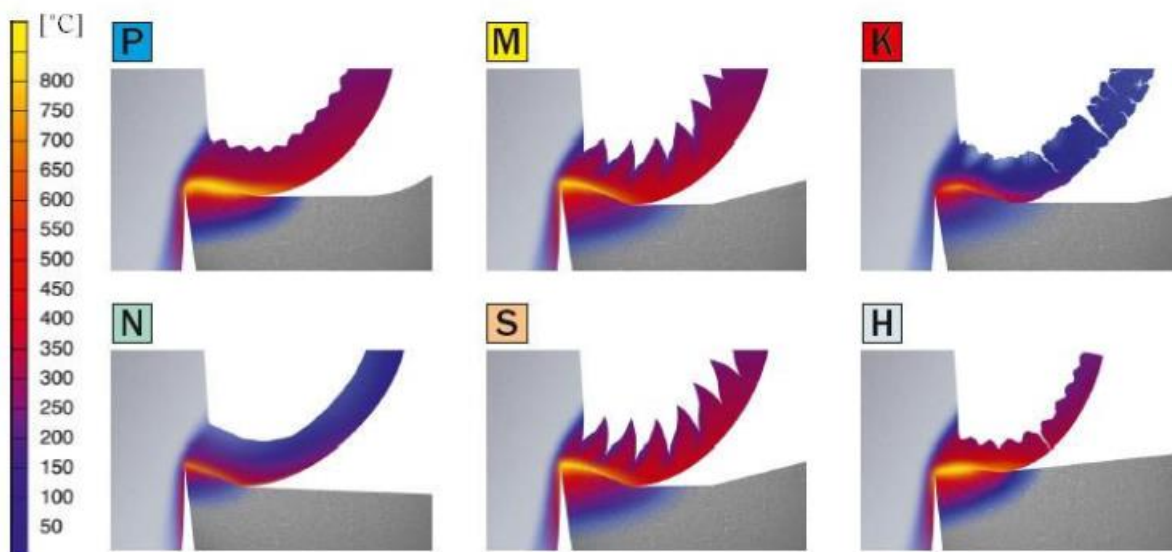
- HW – SK s obsahem primárního karbidu wolframu (WC), pojivem Co a zrnitostí větší než 1  $\mu\text{m}$ ,
- HF - SK s obsahem primárního WC, pojivem Co a zrnitostí menší než 1  $\mu\text{m}$ ,
- HC – povlakové slinuté karbidy.

Druhy a možnosti použití SK znázorňuje rozdělení do šesti, barevně a písmeny odlišných skupin (tab. 3). Podskupiny se označují písmenem skupiny a následným dvoumístným číslem, vyjadřující jejich základní mechanické vlastnosti. S rostoucím číslem podskupiny klesá houževnatost, pevnost v ohybu, ale roste otěruvzdornost a tvrdost. Nepovlakované slinuté karbidy zase značí, že podskupiny s vyšším číselným označením se využívají pro střední a těžké obrábění a hrubování. Díky této kvalifikaci ISO, lze vybrat vhodný řezný materiál pro určité případné použití.

Skupina	Podskupiny	Základní chemické složení	Efektivní aplikace pro obráběný materiál
<b>P</b>	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50	WC (30÷82)% +TiC (8÷64)% +Co (5÷17)% + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající dlouhou, plynulou třísku: Nelegovaná, nízkolegovaná a vysoce legovaná ocel, litá ocel, automatová ocel, nástrojová ocel, feritická a martenzitická korozivzdorná ocel.
<b>M</b>	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40	WC (79÷84)% +TiC (5÷10)% +TaC.NbC (4÷7)% +Co (6÷15)%	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající dlouhou a střední třísku: Austenitická a feriticko austenitická ocel, korozivzdorná, žáruvzdorná, žáropevná, nemagnetická a ořezivzdorná ocel.
<b>K</b>	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40	WC (87÷92)% +Co (4÷12)% + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající krátkou, drobnou třísku: Nelegovaná i legovaná šedá litina, tvárná litina, temperovaná litina.
<b>N</b>	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30		Slinuté karbidy pro obrábění neželezných materiálů: Slitiny mědi a hliníku, duroplasty, fibry, plasty s vlákninou, tvrdá guma.
<b>S</b>	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30		Slinuté karbidy pro obrábění: Žáruvzdorné slitiny na bázi Fe, superslitiny na bázi Ni nebo Co, Titanu, Ti slitiny.
<b>H</b>	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30		Slinuté karbidy pro obrábění: Zušlechtné oceli s pevností nad 1500 MPa, kalené oceli HRC 48÷60, tvrzené kokilové litiny HSh 55÷58

Tab. 3 Rozdělení slinutých karbidů dle ČSN ISO 513, dostupné z [14]

Teplotní zatížení čela břitů ze SK různých skupin je znázorněno na obr. 14. Například SK skupiny K mají jako jedinou tvrdou strukturní složku WC, který s přibývajícím teplotou velmi rychle ztrácí svou tvrdost, rychleji, než je tomu u ostatních karbidů, proto nejsou SK skupiny K vhodné k obrábění materiálů, u kterých dochází k tvorbě dlouhé třísky, protože dlouhá tříška má větší plochu styku s čelem destičky a tím jej více tepelně zatěžuje. [14]



Obr. 14 Modely tepelného zatížení jednotlivých skupin SK a různé lámavosti třísek, dostupné z [14]

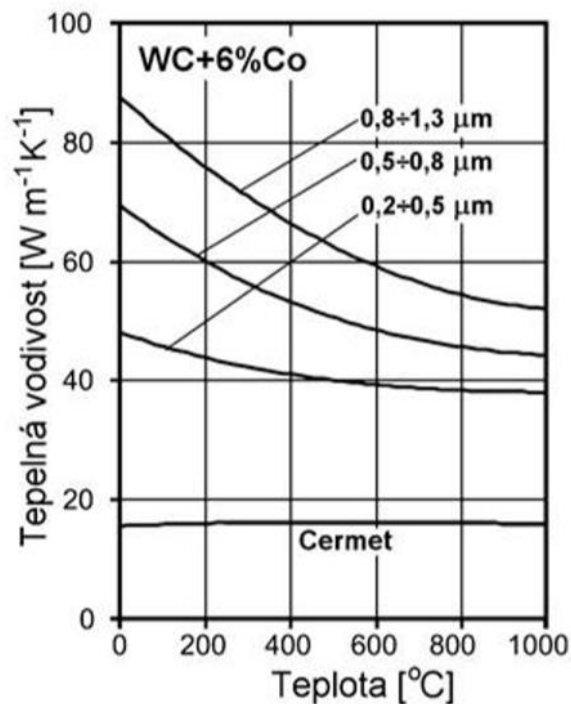
## 3.2 Vlastnosti slinutých karbidů

Vzhledem k používání SK v obrábění, kde se využívají v největší míře, bude tato podkapitola věnována primárně vlastnostem, které jsou při obrábění ovlivňovány. Jako pojivo dominuje kobaltové, tak popisované vlastnosti se budou odvíjet od SK, které kobaltové pojivo obsahují.

### 3.2.1 Tepelná vodivost

SK s nižší tepelnou vodivostí mají příznivý vliv na tepelné zatížení nástroje, protože vznikající teplo je ve větší míře odváděno obrobkem, tudíž je nástroj méně tepelně zatěžován. Bohužel nižší tepelná vodivost snižuje odolnosti proti teplotním šokům.

Tepelná vodivost u SK se s podílem obsahu pojiva Co se mění jen nepatrně. Pokud je pojivo na bázi niklu, tak hodnota tepelné vodivosti klesá. U slinutých karbidů WC-Co jsou hodnoty tepelné vodivosti dvakrát až třikrát vyšší než u rychlořezných ocelí. Platí, že čím hrubší zrna SK mají, tím je hodnota tepelné vodivosti vyšší. Závislost tepelné vodivosti na hrubosti a teplotě znázorňuje obr. 15.

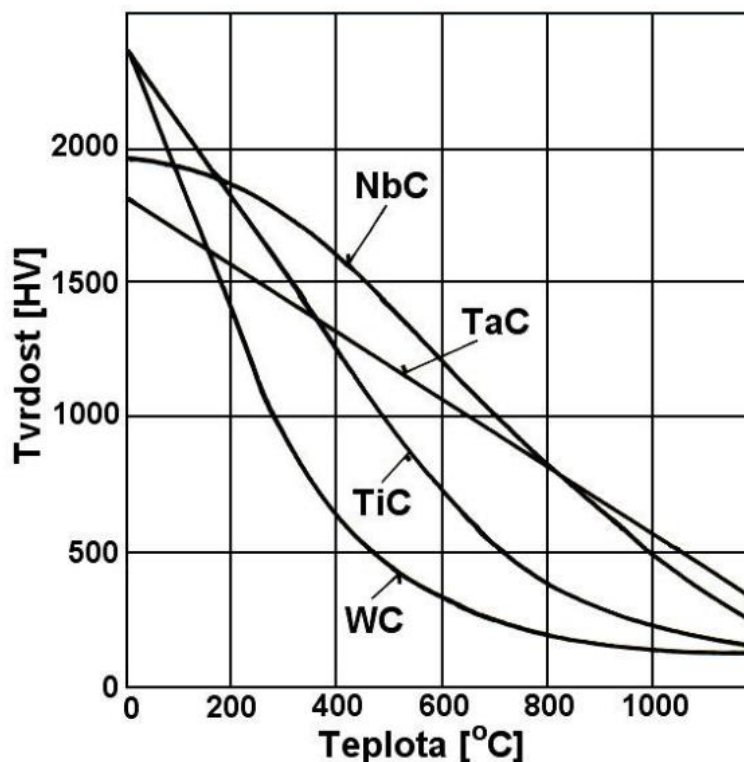


Obr. 15 Závislost vodivosti SK na teplotě, dostupné z [15]

SK s obsahem TiC mají nižší tepelnou vodivost než SK typu WC-Co. Mají-li obsah TiC kolem 15 %, tak je tepelná vodivost srovnatelná s rychlořeznými oceli a s rostoucím obsahem TiC tepelná vodivost stále klesá. [15]

### 3.2.2 Tvrdost

Tvrdost SK typu WC-Co závisí hlavně na obsahu kobaltu a velikosti zrn karbidů. Tvrdost stoupá s ubývajícím obsahem Co a snižující se velikostí zrna. Vzhledem k působení vysokých teplot během obrábění je důležitá závislost tvrdosti na teplotě (obr. 16). Při nárůstu teploty tvrdost SK klesá, u struktur s jemnějším zrnem je pokles tvrdosti menší a SK si zachovávají svojí tvrdost až do teplot mezi 900 °C.



Obr. 16 Závislost tvrdosti SK na teplotě, dostupné z [14]

### 3.2.3 Pevnost

Pevnost ohybu se s rostoucí teplotou výrazně snižuje a se zvyšujícím se obsahem Co naopak roste. Maximální hodnoty pevnosti lze u některých hrubozrnných materiálů dosáhnout při obsahu Co 16 – 18 %. Pevnost v ohybu se pohybuje v rozmezí 2 000 až 4 700 MPa. Karbidy s obsahem TiC mají ohybovou pevnost nižší než karbidy typu WC-Co.

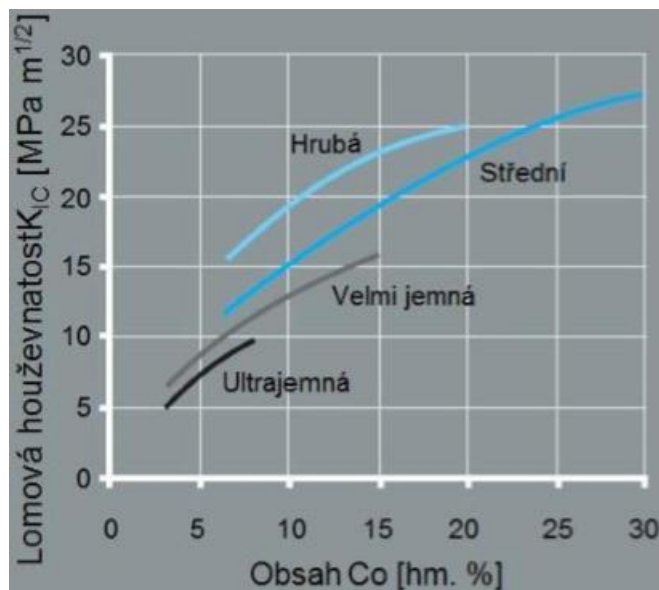
V tahu pevnost klesá s rostoucím podílem pojiv a použitím hrubozrnnějších materiálů. [15]

### 3.2.4 Modul pružnosti

Modul pružnosti pro karbidy typu WC-Co je téměř trojnásobný než u rychlořezných ocelí. Klesá s rostoucím obsahem pojiva Co a teplotou. K poklesu dochází také s obsahem TiC. Naopak vyšší hodnoty mají karbidy s jemnozrnnou strukturou. [15]

### 3.2.5 Lomová houževnatost

Lomová houževnatost je do teplot kolem 600 °C prakticky neměnná, při teplotách vyšších prudce narůstá. Roste také s obsahem Co a velikostí zrna a klesá s rostoucí hodnotou tvrdosti. [15]



Obr. 17 Hodnoty lomové houževnatosti a obsahu Co pro různé zrnitosti, dostupné z [15]

### 3.3 Chemická degradace

#### 3.3.1 Koroze

Koroze ve většině případů napadá materiály pojiv. Koroze rozpouští pojiva ve struktuře a zanechává zrna karbidů, které sama bez pojiv nedokáží tvořit pevný spoj a jsou lehce odstranitelná. Velikost koroze tedy závisí na korozní odolnosti pojiva.

„Korozní opotřebení je degradací materiálu za současného vlivu koroze a otěru. Tento kombinovaný efekt je mnohem větší než vliv těchto procesů samostatně.“ [15]

#### 3.3.2 Oxidace

Už během pracovních teplot SK (600 až 1 000°C) může docházet ke zvýšené oxidaci. Oxidací se vytvoří na povrchu karbidu porézní zoxidovaná vrstva. Oxidace se oproti korozi vytváří jak na pojivu, tak na kovech, které tvoří karbidy. [15]

#### 3.3.3 Naleptávání

Při leptání dochází velmi často k poškození pojiva. Příkladem takového poškození je stripping (renovace již dříve deponovaného nástroje). Proto je při případném metalografickém výbrusu nebo strippingu nutné zvolit správný leptací roztok. [15]

## 4 Oceli třídy 19

Jedna z ocelí, která bude použita jako základní materiál pro náš experiment je nástrojová ocel třídy 19, a tak je na místě si tytu ocel popsát. Oceli třídy 19 se dělí podle obsahu jednotlivých prvků na:

- nelegované nástrojové oceli,
- legované nástrojové oceli,
- rychlořezné nástrojové oceli,
- oceli na lité nástroje.

## 4.1 Vlastnosti

Mezi základní vlastnosti nástrojových ocelí patří houževnatost, tvrdost, odolnost proti popouštění, kalitelnost a prokalitelnost, lešitelnost odolnosti proti otěru a řezivost za stálých rozměrů.

### 4.1.1 Houževnatost

Dochází-li při namáhání ocelí ke kombinovanému namáhání (od tahu, tlaku, ohybu i krutu), je kladen požadavek na dostatečnou houževnatost nástrojové oceli. Houževnatější jsou oceli s nižším obsahem C nebo legované, které pozitivně působí na houževnatost, jako např. Ni. Houževnatá ocel musí být homogenní, jemnozrnná a musí mít minimální vnitřní pnutí. [12]

### 4.1.2 Tvrdost a pevnost

Od nástrojových ocelí je vyžadována také vysoká tvrdost a pevnost, která se odvíjí od způsobu namáhání a podmínek použití součásti. Je-li nástrojová ocel určena pro řezání, vyžaduje se tvrdost nad hranicí HRC 62. Pro práci zastudena je zase výhodnější tvrdost pod uvedenou hranicí. Tvrdost oceli určuje obsah uhlíku, kdy tvrdost po kalení stoupá až do obsahu uhlíku 1 %. Legující prvky se podílejí na zvyšování tvrdosti, jestliže tvoří s C karbidy. [12]

### 4.1.3 Prokalitelnost a kalitelnost

Vhodná volba prokalitelnosti je další požadovanou vlastností nástrojové oceli. Záleží na velikosti nástrojů. U nástrojů malých rozměrů je vyžadované malé prokalení, které vytvoří vysokou povrchovou tvrdost při zachování houževnatého jádra. U nástrojů velkých rozměrů je třeba kalit do hloubky větší. [12]

### 4.1.4 Odolnost proti otěru

„Opotřebením má vliv na životnost tvářecích nástrojů. Je závislé na tvrdosti a morfologii oceli. Tvrdost závisí hlavně na množství C v oceli a dále na použitých legurách, kdy největší vliv na výslednou tvrdost má V a dále Mo, Cr, a W, které tvoří výhodné karbidy.“ [12]

## 5 Ocel ČSN 41 2050

Ocel ČSN 41 2050 (dále už jen 12 050) bude použita v experimentu číslo 2 společně se slinutým karbidem jako základní materiál pro pájený spoj. Jedná se o konstrukční uhlíkovou ocel třídy 12 se zaručeným chemickým složením. Ocel je vhodná k zušlechťování a k povrchovému kalení. Používá se na větší ozubená kola, závěsy pružnic, vřetena soustruhů, šrouby, hřídele, ojnice, apod. Není vhodná na sváření.

Chemické složení	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
12 050	0,42 až 0,50	0,17 až 0,37	0,50 až 0,80	max. 0,04	max. 0,04	max. 0,3	max. 0,25	max. 0,30

Tab. 5 Chemické složení oceli 12 050, dostupné z [17]

## 5.1 Vlastnosti

Ke zhotovení experimentu byly použity výkovky z oceli 12 050, které mají následující mechanické vlastnosti:

- Nejnižší mez kluzu –  $\sigma_{Kt} = 280 - 440$  MPa,
- Pevnost v tahu –  $\sigma_{Pt} = 590 - 830$  MPa,
- Nejnižší tažnost –  $A = 14 - 16$  %,
- Nejnižší kontrakce –  $Z = 35 - 40$  %,
- Nejvyšší tvrdost – podle Brinella =  $180 - 250$  HB. [17]

## 6 Úvod do experimentální části

Cílem experimentální části je pokusit se vytvořit heterogenní spoj mezi slinutým karbidem a ocelí technologií elektrického oblouku za pomoci netavící se elektrody v ochranné atmosféře inertního plynu (TIG metoda). Technologie spojování slinutého karbidu s ocelí je známá již od 50. let minulého století, kde se využívala při výrobě obráběcích nástrojů. Pro náš případ jsme se orientovali spíše dle metody pájení slinutého karbidu plamenem k obráběcímu noži. Tato technologie se využívá ke spojování nevyměnitelných břitových destiček. U technologie pájení plamenem se do spoje dostává mnoho nečistot a ve spoji mohou vznikat oxidy, které zapříčiňují narušení difúzní vrstvy, proto jsme pro náš experiment navrhovali inovaci této technologie. Tudíž jsme se rozhodli vyzkoušet vytvoření našeho heterogenního spoje SK – ocel, pomocí technologie svařování v ochranné atmosféře wolframovou elektrodou 141 (TIG).

Na základě znalostí získaných v teoretické části bude navržen a proveden experiment, který bude následně ověřen destruktivními a nedestruktivními zkouškami. Na základě výsledku zkoušek a průběhu experimentu bude vyhotoven závěr, případný přínos experimentu a možné budoucí navázání na toto téma.

### 6.1 Pájecí pracoviště

Pájení bylo provedeno ve svářecí laboratoři katedry KMM na přístroji KEMPPI MasterTIG MLS 3003 ADCD. Toto zařízení je sice uzpůsobeno pro TIG svařování hliníkových materiálů, ale je také velmi vhodné pro svařování jiných materiálů metodami TIG a MMA. MasterTIG MLS 3003 ACDC může být připojeno do sítě v rozsahu 230 a 460 V a může také dodávat všechny druhy proudu: DC-, AC, DC+ a MIX TIG (kombinace AD a DC).





Obr. 18 Zařízení MasterTIG MLS 3003 ACDC pro pájení metodami TIG a MMA

## 7 Experiment číslo 1

Jak už bylo v úvodu napsáno, experimentální část pojednává o snaze vytvořit kvalitní spoj mezi slinutým karbidem a ocelí pomocí pájky metodou 141 (TIG).

V případě pájení slinutého karbidu se jedná o technologii tvrdého pájení nad 650 °C, proto bylo nutné zvolit pájku s vysokou teplotou tavení, která by takové teploty snesla a nespálila se. V našem případě jsme zvolili stříbrnou pájku s obsahem stříbra 45 %. Jedná se o pájku určenou pro tvrdé pájení s vyšší teplotou tavení, vysokou pevností, dobrých operačních vlastností (zatékavosti, tekutosti, dobré snášení smršťování při rychlém zatékání) a je možno s ní spojovat skoro všechny železné a neželezné kovy, takže pro pájení heterogenních spojů je vhodná volba. Chemické složení a další vlastnosti pájky najdeme v tabulce 6.

Značení pájky podle DIN 8513: B - Ag45CuZn	Chemické složení [%]				Teplota tavení °C (S/L)
	Ag	Cu	Zn	Mn - Ni	
	45	25,5	27,5	zbytek	680 - 740 °C

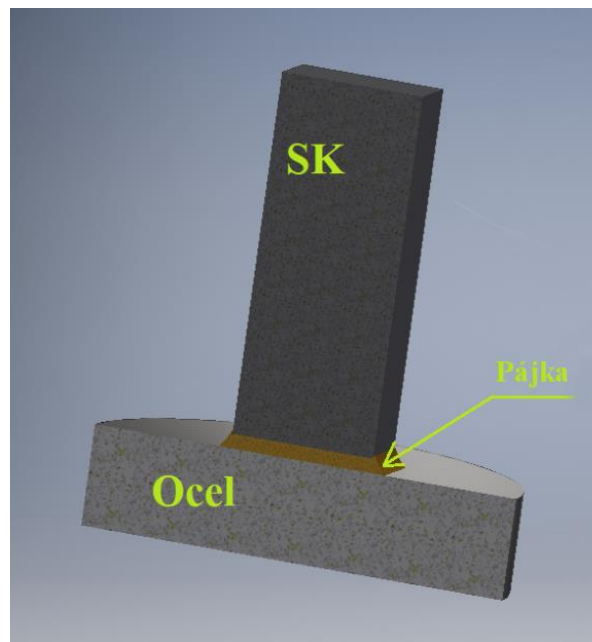
Tab. 6 Pájka B – Ag45CuZn jejich chemické složení a teplota tavení

### 7.1 Příprava vzorků

Protože pájení vyžaduje zvýšenou čistotu pájených ploch, která musí být bezprostředně zaručena, neboť různé nečistoty (olej, oxidy, apod.) brání smáčení, kapilaritě a difúzi pájky, tak jsme i v našem případě museli pájené plochy zbavit nečistot a mastnoty. K odstranění mastnoty a nečistot byl použit aceton.

Základní materiál ze slinutého karbidu měl tvar pravidelného čtyřbokého hranolu o délce strany 15 mm, naproti tomu nástrojová ocel byla ve tvaru válce o průměru 30 mm. Tyto tvarově a rozměrově odlišné geometrie bylo potřeba vhodně umístit, aby mohlo dojít k vytvoření tupého spoje v poloze PB (osa: svislá, poloha hořáku vodorovná šikmo shora) a zároveň mezi materiály musela být mezera v rozmezí 0,1 až 1,5 mm (obr. 19), aby pájka mohla vzlínat do mezery a spoj měl tak nevyšší možné mechanické vlastnosti. Destička z nástrojové oceli byla položena na pracovní desku a nad ní byl upnut vzorek z nástrojové oceli s uvedenou šířkou pájeného spoje.

Přehřev vzorků před pájením nebyl zvolen.



Obr. 19 Konstrukční návrh spoje, kterého chceme po pájení dosáhnout

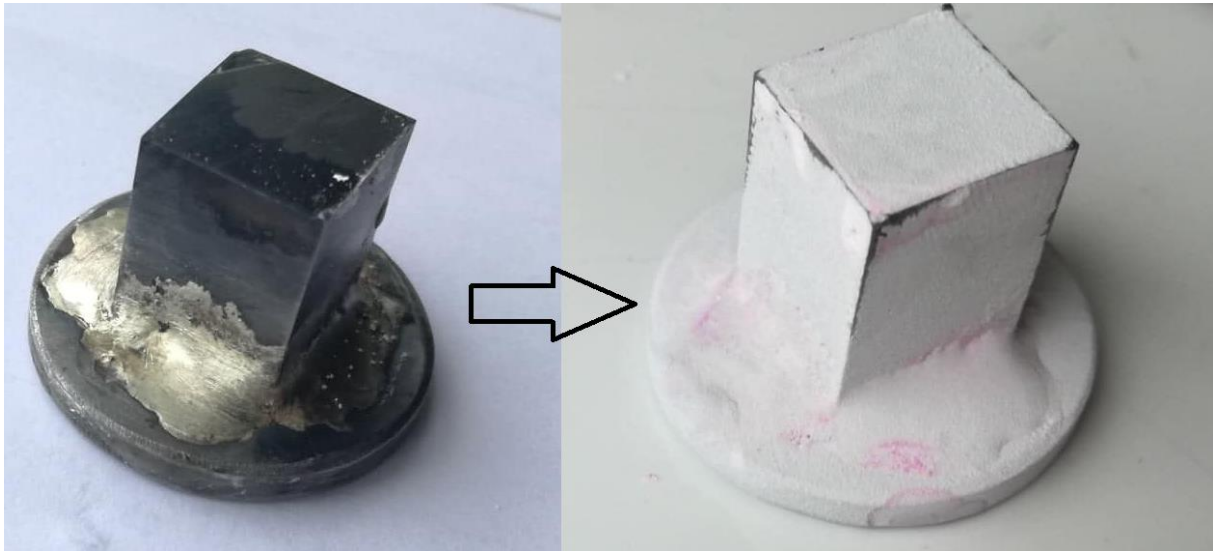
## 7.2 Vlastní provedení experimentu

Byl proveden tupý spoj ve svislé poloze PB z materiálů SK – ocel. Na spojení byla použita obalená pájka (součástí pájky bylo i tavídló). Ochrannou atmosféru byl použit technický argon s čistotou Ar 99,996% (značka Ar 4.6) s rychlostí průtoku plynu 10 L/m a svařovacím proudem 70 A.

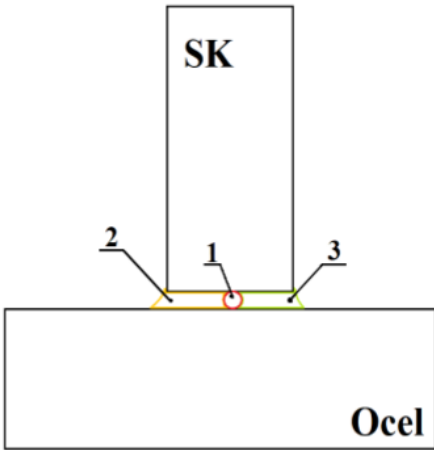
Další informace o specifikaci postupu pájení jsou uvedené v pBPS, která byla navržena pro potřebu experimentu (tab. 7). Vlastní provedení spoje se ale potýkalo s problémy a nárokem na zručnost technika, kterému nešla aplikovat pájka do mezery spoje. Již jen práce se slinutým karbidem ohledně tepelné vodivosti je problematická a další experimentální zkoušky budou potřebovat, jak upravit parametry, tak i techniku svařování, protože pájka se vlivem vysokých teplotách, které přijme od TIG hořáku, stává velmi tekutou a má tendenci ze spoje unikat. Dalším problémem byl příliš vysoký průtok plynu, který při špatném pohybu odfoukával samotou pájku ze spoje.

Po zhotovení spoje byly na vzorcích provedeny následující zkoušky: vizuální kontrola, metalografické, kapilární a radiografické zkoušení. K provedení vizuální kontroly a radiografickému zkoušení bylo potřeba vzorky dále upravovat. Pro metalografické zkoušení bylo nutno vzorkem provést řez a udělat metalografický výbrus. Řez byl proveden na drátořezu

a metalografický výbrus v laboratořích KMM na diamantových plátnech. Vzorky poté byly pozorovány na elektronovém mikroskopu. Kapilární zkoušení se provádělo na čistých a suchých vzorcích. Vhodný penetrant se nanese na zkoušenou oblast (oblast spoje) a případně pronikl do vad otevřených na povrchu. Po uplynutí příslušné penetrační doby, (15-30 minut) se z povrchu odstraní přebytek penetrantu pomocí slabého proudu vody. Potom se nanese výbojka. Penetrant, který zůstal v povrchových vadách, začal vzlínat a zbarvil výbojku, což zřetelně vyznačilo vadu.



*Obr. 20 Pájený vzorek před a po kapilární zkoušce*

<b>Specifikace postupu pájení „pBPS“ dle ČSN EN 13 134</b>		Strana: 1 Počet stran: 1 Revize č.:
1. Výrobce : —	16. Zkušební organizace : —	
2. Místo : Plzeň, Západočeská univerzita 565	17. Způsob přípravy spoje: —	
3. Číslo dokladu (pBPS) : 04/2019	18. Čištění před pájením: chemické - odmaštění pájených ploch acetonem	
4. Číslo BPAR : —	19. Čištění po pájení : odstranění zbytků tavidla	
5. Číslo zkušebního kusu : EX01	20. Vnitřní čištění (pročištění) : —	
6. Kvalifikace páječe : —	21. Přídavný mater.-pájka – forma: drát Ø 1,6 mm	
7. Proces pájení : Příprava základních materiálu a jejich následné pájení stříbrnou pájkou metodou TIG.	– typ : <b>ECOBRAZ Ag45CuZn</b>	
8. Základní materiál 1 : <b>Ocel třídy 19</b>	– způsob vkládání pájky do spoje : ručně	
9. Základní materiál 2 : <b>Slinutý karbid</b> (blíže nespecifikovaný)	– místo uložení pájky ve spoji : mezi základními materiály	
10. Pájená tloušťka stěny [mm]: 0,1	22. Tavidlo – forma : Borax, kterým byla pájka obalena	
11. Průměr trubky (tyče) [mm]: —	– typ : —	
12. Tvarovka – označení, jakost (T-kus, nátrubek) : <b>Tupý spoj – poloha PB</b>	– způsob vkládání tavidla do spoje : ručně společně s pájkou	
13. Tepelné zpracování před : — a po procesu pájení : —	– místo uložení tavidla ve spoji : —	
14. Podrobné stanovení přípravků a uchycení : —	23. Měření teploty (kontrola a ustavení sond) : —	
15. <b>Konstrukční návrh spoje</b>  	24. Časový průběh teplot při pájení : —	
	25. Velikost / číslo hořáku : —	
	26. Metoda pájení : Elektrický oblouk v ochranné atmosféře argonu (TIG)	
	27. Oxidační plyn (typ, tlak) : —	
	28. Druh proudu a polarita : DC -	
	29. Předehřev před pájením : —	
	30. Zdroj energie (typ, parametry) : třífázová zástavka 400 V	
	31. Indukční cívka (konstr. návrh) : —	
	32. Elektroda druh/průměr: WC20/ 1,6 mm	
	33. Nastavení zařízení (tlak elektrod, proud, čas) : 70 A	
	34. Typ pece : —	
	35. Atmosféra (typ, čistota, parametry), proudění : Technický argon 4.6, Průtok plynu 10 L/m	
	36. Uhel nastavení hořáku: 45°	
	37. Druh automatu: KEMPPi MLS 3003 ACDC	
38. Složení lázně : —		
39. Č.pozice	40. Materiál	41. Výrobce, rozměr
42. Počet kusů	43. Norma	44. Poznámka
45. Další podmínky a poznámky:		
46. Výrobce		
48. Zkušební orgán nebo technická dozorcí (inspekční) organizace		
47. datum, jméno, podpis a razítko svářečského dozoru		
49. datum, jméno, podpis a razítko zkušebního orgánu		

Tab. 7 Specifikace postupu pájení pro vzorek 1

### 7.3 Vyhodnocení experimentální části 1

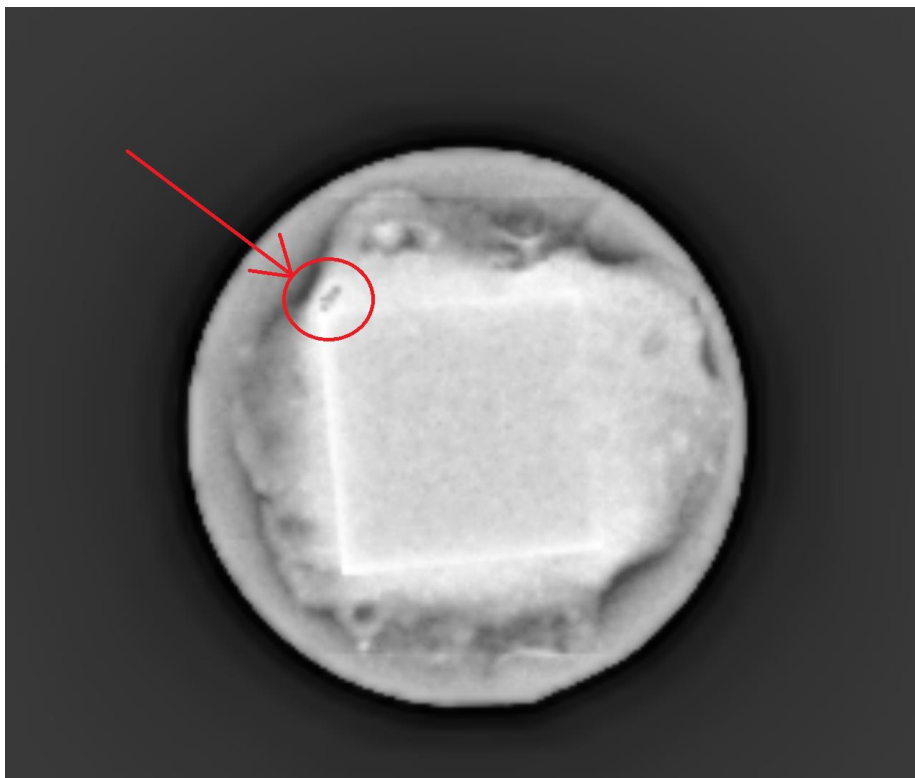
Spoje byly kontrolovány vizuálně. Na povrchu vykazovaly spoje vady nadbytek pájky (6BAAA dle ČSN EN ISO 18279). Z makrostrukturního vyhodnocení rozřízlého vzorku jsme pozorovali, že pájka nepronikla celým spojem, jak je vidět na obr. 21, a zatekla jen do první třetiny spoje. Jednalo se tedy o vadu neúplného zatečení, která se označuje 4CAAA. Důvodem mohla být příliš velká tekutost pájky z důvodu vysokého tepelného příkonu nebo špatně zvolená mezera. Tato skutečnost samozřejmě narušuje celkovou pevnost tohoto spoje, a proto jsme již spoj nepodrobili tahové zkoušce a u dalších vzorků se budeme této vadě snažit předejít.



Obr. 21 Řez pájeného spoje

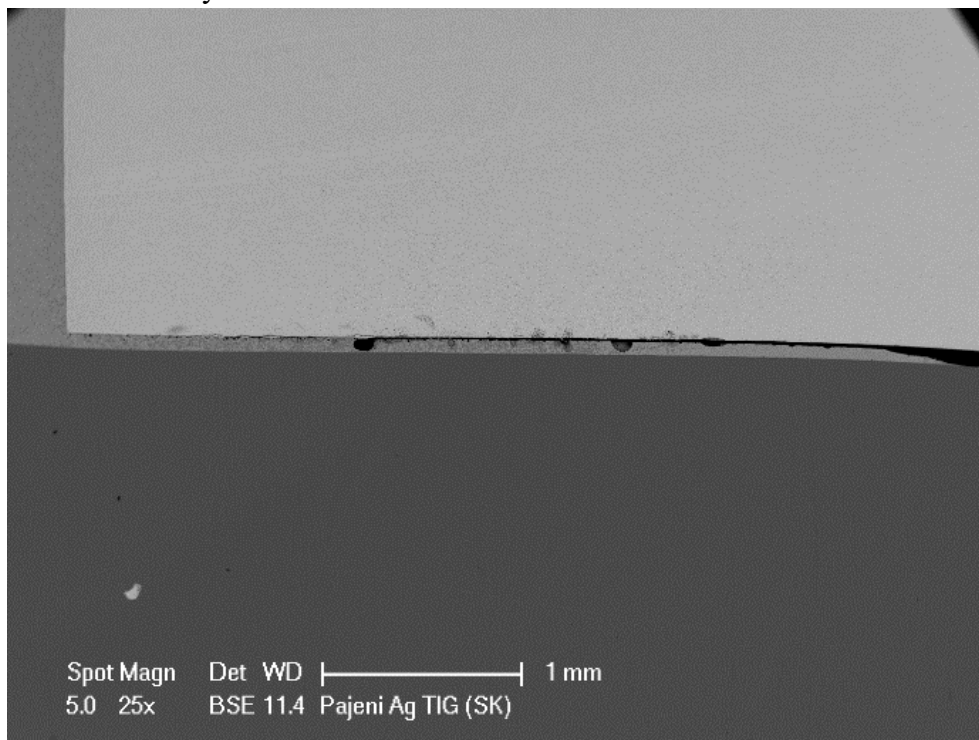
Kapilární zkouškou bylo v návaznosti na vizuální kontrolu zjištěno, že spoje neobsahovaly žádné vady otevřené na povrch jako je pórovitost, neúplné zatečení a nedostatečná smáčivost.

Radiografickým zkoušením jsme se snažili lokalizovat případné vady a jejich velikost. Bohužel vzorky díky svému tvaru a vysoké výšce byly obtížně pozorovatelné, a tak bylo možno pozorovat pouze vady, které byly na okrajích pájeného místa. Na obrázku č. 22 můžeme pozorovat dutinu, kterou bychom mohli označit jako vadu 2BAAA dle ČSN 18279.



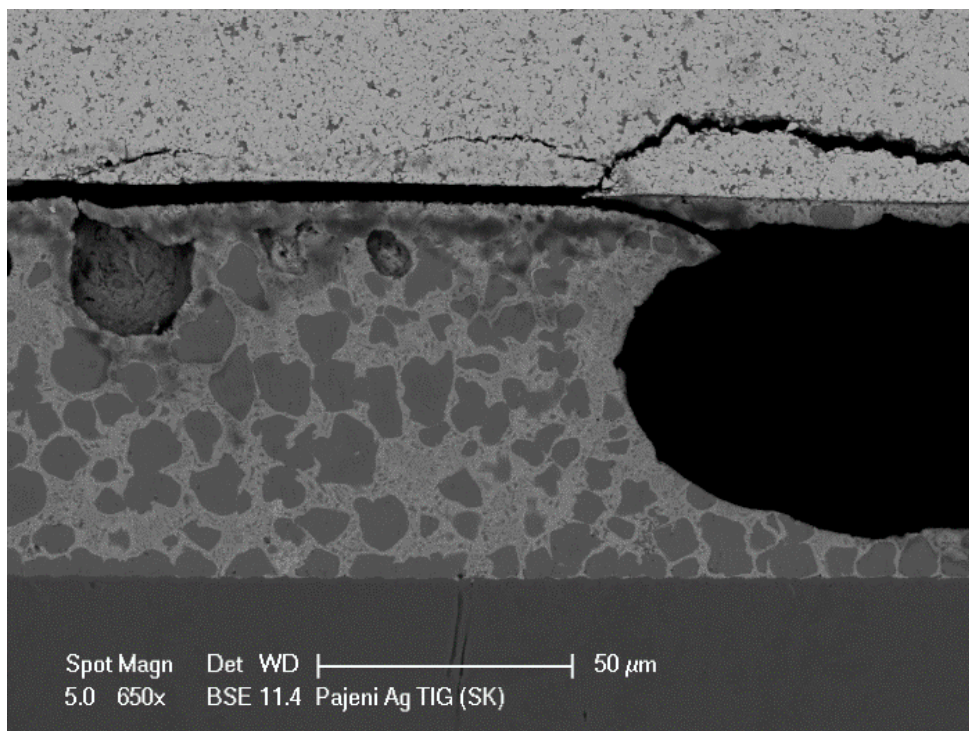
Obr. 22 Snímek vzorku z RTG, na kterém je označena plynová dutina

Dále byly provedeny snímky mikrostruktury pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu. Na obr. 23 lze pozorovat rozhraní SK – Ag pájka – Ocel. Je zde patrné, jak již bylo zjištěno u makrostrukturního hodnocení, že pájka nepronikla do celého spoje a navíc ve spoji jsou zřetelné dutiny.



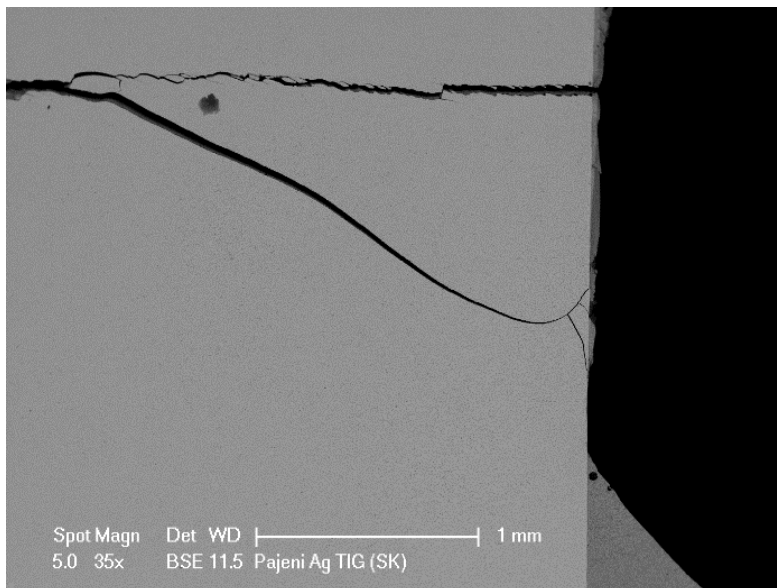
Obr. 23 Mikrosnímek z elektronového mikroskopu, rozhraní SK (nahore) – pájka – ocel, zvětšení 25x

Dutina je přiblížená na obr. 24, kde je její tvar a velikost, která je větší než 50  $\mu\text{m}$ . Dutinu bychom mohli opět charakterizovat jako vnitřní vadu 2BAAA. V našem spoji se vytvořily bubliny pravděpodobně z důvodu špatného zatečení pájky do spoje. Na obr. 24 lze dále pozorovat i trhliny na straně slinutého karbidu v tepelně ovlivněné oblasti (označení vady 1AAAD) a mezeru mezi slinutým karbidem a pájkou, která vznikla neúplným zatečením pájky (4CAAA). Mezera bude značně snižovat mechanické vlastnosti spoje.

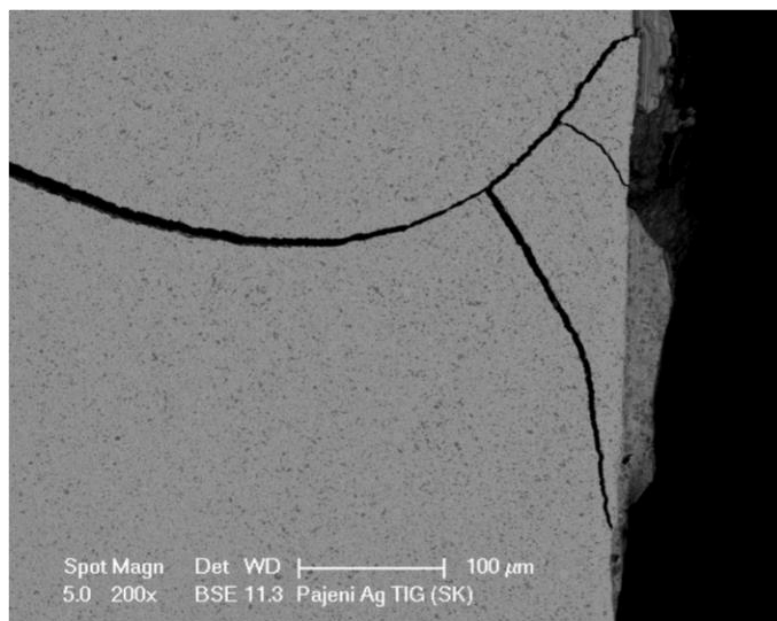


Obr. 24 Detail rozhraní SK – pájka - ocel a pohled na vnitřní dutinu. Zvětšení 650x

Na obr. 25 a 26 se nacházejí další trhliny, které vznikly ve slinutém karbidu reakcí na vysoký tepelný příkon technologií TIG. Slinutý karbid se s největší pravděpodobností přehřál a vlivem velkého teplotního gradientu praskal.



Obr. 25 Mikrosnímek z elektronového mikroskopu, pohled na trhlinu, zvětšení 35x



Obr. 26 Mikrosnímek z elektronového mikroskopu, detail trhliny

Na obr. 27 a 28 je znatelná difúzní vrstva mezi pájkou a SK. Na detailu vidíme, že tloušťka difúzní vrstvy se pohybuje okolo 5  $\mu\text{m}$ . Jestliže známe hloubku difúzní vrstvy, pak můžeme z upravené rovnice 2. Fickova zákona

$$x^2 = 2Dt$$

spočítat součinitel difúze  $D$  v závislosti na hloubce difúze  $x$  a čase  $t$  jako:

$$D = \frac{x^2}{2t} = \frac{(5 * 10^{-7})^2}{10} = 2,5 * 10^{-14} \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right].$$

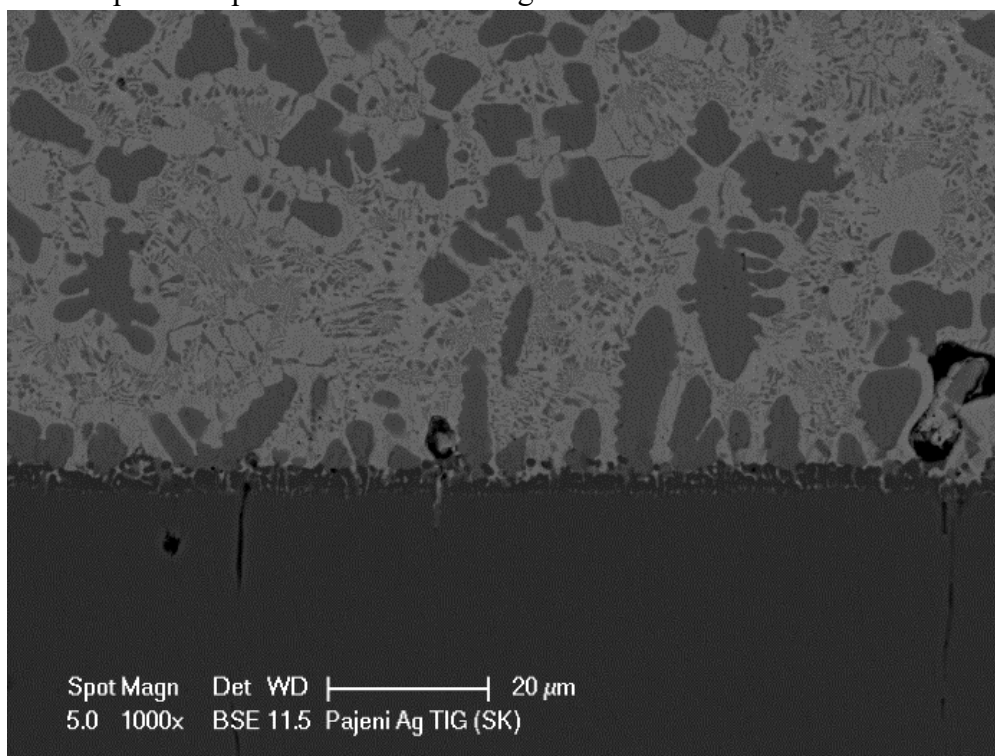


V tabulce 8 jsou uvedeny pro porovnání hodnoty součinitele difúze  $D$  dalších prvků. Pro náš případ budeme uvažovat jako základní materiál stříbrnou pájku, protože ocel difundovala do pájky.

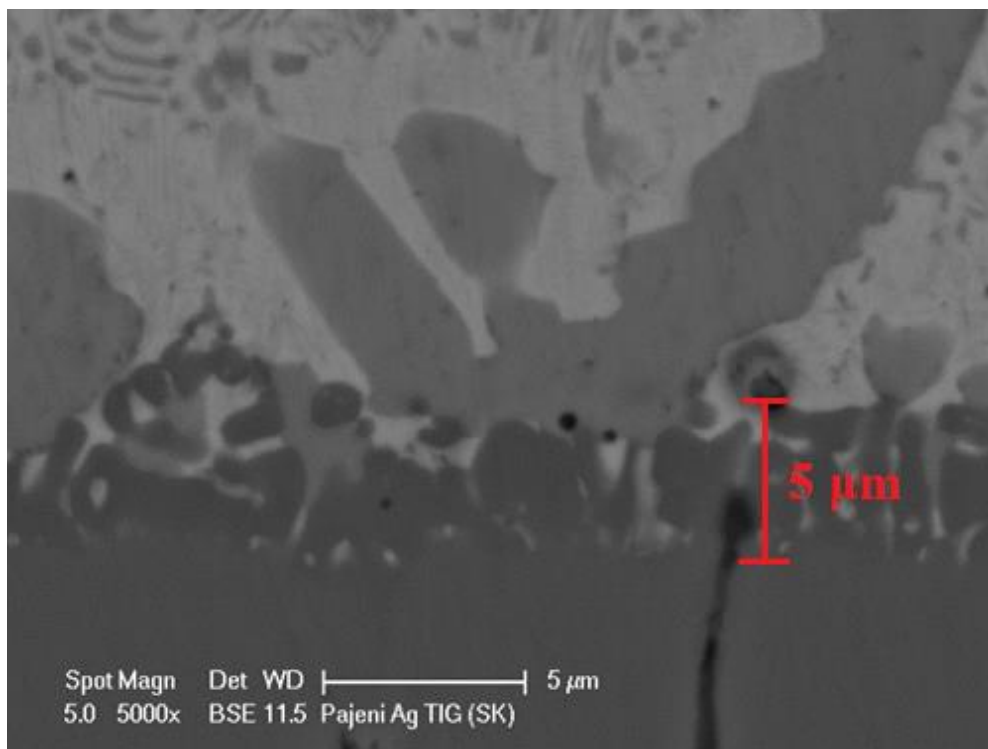
Základní materiál	Difundující prvek	Teplota [°C]	$D$ [cm <sup>2</sup> /s]
Ag45CuZn	ocel	1000	$2,5 \cdot 10^{-14}$
Sn	Cu	160	$9,4 \cdot 10^{-13}$
Cu	Ni	840	$3,6 \cdot 10^{-10}$
Cu – Zn	Ni	840	$7 \cdot 10^{-10}$
Cu	Zn	840	$3 \cdot 10^{-9}$

Tab. 8 Hodnoty difúzního součinitele  $D$  pro různé kombinace

Jak je z tabulky 8 vidět, hodnota difúzního součinitele je pro náš případ znatelně menší. V porovnání s kombinací Cu – Zn je to řádově až deset tisíc krát menší. Důvodem toho je pravděpodobně špatná rozpustnost kombinace Ag – Fe.



Obr. 27 Mikrosnímek z elektronového mikroskopu, rozhraní pájka (nahore) – ocel, zvětšení 1000x



Obr. 28 Detail rozhraní, kde je pozorovatelná difúzní vrstva. Zvětšení 5000x

## 8 Experiment číslo 2

Experiment číslo 2 navazuje na první, kde se vzorky pájely za určitých parametrů a podmínek. Protože pájecí podmínky a parametry nebyly zcela vyhovující, tak se je budeme snažit vyladit, abychom dosáhli spoje s větší jakostí.

Vzorky byly pájeny dvěma rozdílnými tvrdými pájkami, abychom měli srovnání o kvalitě spojů pájených jinými pájkami. První byla vybrána opět pájka stříbrná s obsahem Ag 45 % a druhá pájka mosazná CuZn40. Pájka byla zvolena z důvodu, že se jedná o daleko levnější variantu. Ceny stříbrné pájky se pohybují řádově ve stokorunách, kdežto u mosazné jsou to řádově koruny a to je s ohledem na ekonomičnost spoje velice důležité. Mosazná pájka obsahuje další doprovodné prvky, kterými jsou křemík, cín a mangan. Mangan zlepšuje pevnost v tahu. Cín snižuje teplotu tání a zlepšuje tekutost pájky a křemík zmenšuje rozpustnost vodíku. Všechny tyto doprovodné prvky nám působí kladně na mechanické vlastnosti našeho spoje.

Přesné chemické složení pájky Ag45CuZn najdeme v tabulce 1. Chemické složení a další vlastnosti pájky mosazné najdeme v tabulce 9.

Značení pájky:	Chemické složení					Pracovní teplota	Tvrdost [HB]
	Cu	Mn	Si	Sn	Zn		
DIN 8513: L - CuZn40	60	0,4	0,3	0,25	zbytek	920 - 950 °C	110

Tab. 9. Chemické složení mechanické vlastnosti pájky L – CuZn40, dostupné z [1]

Za základní materiál bude opět použitý slinutý karbid, který bude připájen k oceli 12 050 (dle ČSN).

## 8.1 Příprava vzorků

Obrážený základní materiál měl nevyhovující rozměry, a proto bylo nutné pro potřebu experimentu přídatné materiály vhodně tvarově upravit. Pro účel experimentu byla ocel 12 050 uříznuta na tloušťku stěny přibližně 1 cm. Na slinutém karbidu CTM17, který měl tvar válce o průměru 1 cm a vysoké výšce, byl proveden řez diamantovým kotoučem ke zmenšení výšky. Výsledná výška SK byla okolo 3 cm. Vlastnosti a složení slinutého karbidu CTM17 nalezneme v tabulce 10.

CERA-TIZIT sorty – kódy	Pojiv o [%]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Tvrdo st [HV10]	Pevno st v ohybu [Mpa]	Lomová houževnato st [Mpa*m <sup>1/2</sup> ]	Pevno st v tlaku [MPa]	E – modul [GPa]	Tepelná vodivost [W/m K]	Koeficient tepelné roztažnosti [10 <sup>-6</sup> /K]
CMT17	8,5	14,65	1 420	2 800	11,3	5300	600	95	5,1

Tab. 10 Složení a vlastnosti slinutého karbidu CTM17

Základní materiály byly zbaveny nečistot a mastnoty pomocí acetonu.

Tvarově a velikostně odlišné základní materiály byly pájeny ve vodorovné poloze PB. K zajištění polohy byla použita soustava podložek a upínek. Vodorovná poloha byla zvolena, aby pájka mohla snadněji natéci do mezery spoje, aby se nestalo jako u experimentu č. 1, že pájka nedostatečně zateče do mezery.

Byl také zvolen předehřev vzorku za pomoci plamenu na teplotu přibližně 300°C, abychom snížili pravděpodobnost vytvoření trhlin.

Po ukončení nedestruktivních zkoušek byly spoje připraveny pro potřeby metalografického zkoušení. Vzorky byly za tepla preparovány, následně broušeny a leštěny. Leptání vzorků nebylo provedeno, protože pro potřebu zkoušky, kde jsme se snažili vyhodnotit zatečení pájky, zanesení vměstky, pórovitost, trhliny a další vady, nebylo nutné.

## 8.2 Vlastní provedení experimentu

Byl proveden tupý spoj ve vodorovné poloze PB z materiálů SK – ocel. Na spojení prvního vzorku byla použita opět obalená pájka Ag45CuZn. Rozdíly mezi prvním experimentem a tímto jsou následující:

- U předchozího experimentu nebyl zvolen předehřev vzorků. Předehřevem se snažíme zabránit vytvoření trhlin. Nedojde totiž k tak velkému teplotnímu šoku.
- Spoj byl proveden v poloze vodorovné, aby pájka mohla snáze a hlouběji zateci do mezery ve spoji.
- Elektrický proud byl snížen z 70 na 60 A, abychom snížili pracovní teplotu a snížili pravděpodobnost tvorby trhlin. Proud nešel dále snížit, protože pájené plochy by se nedostatečně spájely.

- Změnila se dále polarita z přímé (DC -) na nepřímou (DC +). Při přímé polaritě má spoj větší šířku, ale nejde do takové hloubky, což opět může snížit tvorbu trhlin.
- Průtok plynu byl zvýšen z 10 L/m na 15 L/m, aby roztavená pájka byla více chráněna před vlivem okolních plynů a zamezilo se tvorbě plynových dutin a bublin. Při dalším zvýšení průtoku plynu docházelo k rozstříku pájky po základním materiálu a okolí.

Z těchto důvodů věříme v lepší výsledek, než byl v prvním experimentu. Další informace k postupu pájení nalezneme v tabulce 11.

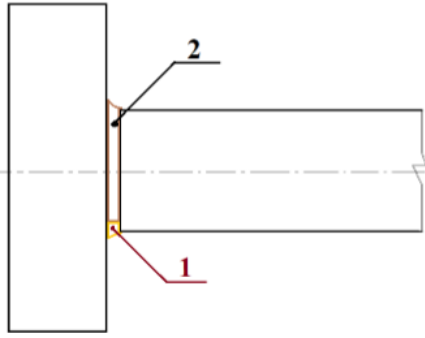
Při pájení mosaznou pájkou bylo nutno použít respirátor, protože zinek má totiž tu nepříjemnou vlastnost, že vře při teplotě 913 °C, přičemž při nižších teplotách dosahuje tlak nasycených par vysokých hodnot, takže už při 650 °C můžeme pozorovat vypařování zinku. Toto vypařování je škodlivé pro zdraví pracovníka.

Pájení probíhalo opět na přímé polaritě (DC -). Další informace o pájení mosazného vzorku najdeme v pBPW v tabulce 12.

V obou případech pájení probíhalo na stejném pracovišti a přístroji, ve stejné ochranné atmosféře Ar 4.6.

<b>Specifikace postupu pájení „pBPS“ dle ČSN EN 13 134</b>		Strana: 1			
		Počet stran: 1			
		Revize č.:			
1. Výrobce : —	16. Zkušební organizace : —				
2. Místo : Plzeň, Západočeská univerzita 565	17. Způsob přípravy spoje: pájené plochy řezány na pile				
3. Číslo dokladu (pBPS) : 05/2019	18. Čištění před pájením: chemické - odmaštění pájených ploch acetonem				
4. Číslo BPAR : —	19. Čištění po pájení : —				
5. Číslo zkušebního kusu : EX02	20. Vnitřní čištění (pročištění) : —				
6. Kvalifikace páječe : —	21. Přídavný mater.-pájka – forma: drát Ø 1,6 mm				
7. Proces pájení : Příprava základních materiálu a jejich následné pájení mosaznou pájkou metodou TIG.	– typ : <b>ECOBRAZ Ag45CuZn</b>				
8. Základní materiál 1 : Ocel 12 050	– způsob vkládání pájky do spoje : ručně				
9. Základní materiál 2 : Slinutý karbid CTM17	– místo uložení pájky ve spoji : mezi základními materiály				
10. Pájená tloušťka stěny [mm]: 0,1	22. Tavidlo – forma : Borax, kterým byla pájka obalena				
11. Průměr trubky (tyče) [mm]: —	– typ : —				
12. Tvarovka – označení, jakost (T-kus, nátrubek) : Tupý spoj – poloha PB (vodorovná)	– způsob vkládání tavidla do spoje : ručně společně s pájkou				
13. Tepelné zpracování před : — a po procesu pájení : —	– místo uložení tavidla ve spoji : —				
14. Podrobné stanovení přípravků a uchycení : —	23. Měření teploty (kontrola a ustavení sond) : —				
15. <b>Konstrukční návrh spoje</b>  	25. Velikost / číslo hořáku : —				
	26. Metoda pájení : Elektrický oblouk v ochranné atmosféře argonu (TIG)				
	27. Oxidační plyn (typ, tlak) : —				
	28. Druh proudu a polarita : DC +				
	29. Předehřev před pájením : 300 °C				
	30. Zdroj energie (typ, parametry) : třífázová zástavka 400 V				
	31. Indukční cívka (konstr. návrh) : —				
	32. Elektroda druh/průměr: WC20/ 1,6 mm				
	33. Nastavení zařízení (tlak elektrod, proud, čas) : 60 A				
	34. Typ pece : —				
	35. Atmosféra (typ, čistota, parametry), proudění : Technický argon 4.6, Průtok plynu 15 L/m				
	36. Uhel nastavení hořáku: 45°				
	37. Druh automatu: KEMMPI MLS 3003 ACDC				
	38. Složení lázně : —				
39. Č.pozice	40. Materiál	41. Výrobce, rozměr	42. Počet kusů	43. Norma	44. Poznámka
45. Další podmínky a poznámky:					
46. Výrobce			48. Zkušební orgán nebo technická dozorce (inspekční) organizace		
47. datum, jméno, podpis a razítko svářečského dozoru			49. datum, jméno, podpis a razítko zkušebního orgánu		

Tab. 11 Specifikace postupu pájení pro vzorek 2

<b>Specifikace postupu pájení „pBPS“ dle ČSN EN 13 134</b>				Strana: 1 Počet stran: 1 Revize č.:	
1. Výrobce : —		16. Zkušební organizace : —			
2. Místo : Plzeň, Západočeská univerzita 565		17. Způsob přípravy spoje: pájené plochy řezány na pile			
3. Číslo dokladu (pBPS) : 04.1/2019		18. Čištění před pájením: chemické - odmaštění pájených ploch acetonem			
4. Číslo BPAR : —		19. Čištění po pájení : —			
5. Číslo zkušebního kusu : EX03		20. Vnitřní čištění (pročištění) : —			
6. Kvalifikace páječe : —		21. Přídavný mater.-pájka – forma: drát Ø 2 mm – typ : DIN 8513: L-CuZn40			
7. Proces pájení : Příprava základních materiálů a jejich následné pájení mosaznou pájkou metodou TIG.		– způsob vkládání pájky do spoje : ručně – místo uložení pájky ve spoji : mezi základními materiály			
8. Základní materiál 1 : Ocel 12 050					
9. Základní materiál 2 : Slinutý karbid CTM17					
10. Pájená tloušťka stěny [mm]: 0,1		22. Tavidlo – forma : Borax			
11. Průměr trubky (tyče) [mm]: —		– typ : —			
12. Tvarovka – označení, jakost (T-kus, nátrubek) : Tupý spoj – poloha PB (vodorovná)		– způsob vkládání tavidla do spoje : ručně společně s pájkou – místo uložení tavidla ve spoji : —			
13. Tepelné zpracování před : — a po procesu pájení : —		23. Měření teploty (kontrola a ustavení sond) : —			
14. Podrobné stanovení přípravků a uchycení : —		24. Časový průběh teplot při pájení : —			
15. Konstruktivní návrh spoje		25. Velikost / číslo hořáku : —			
		26. Metoda pájení : Elektrický oblouk v ochranné atmosféře argonu (TIG)			
		27. Oxidační plyn (typ, tlak) : —			
		28. Druh proudu a polarita : DC +			
		29. Předehřev před pájením : 300 °C			
		30. Zdroj energie (typ, parametry) : třífázová zástavka 400 V			
		31. Indukční cívka (konstr. návrh) : —			
		32. Elektroda druh/průměr: WC20/ 1,6 mm			
		33. Nastavení zařízení (tlak elektrod, proud, čas) : 80 A			
		34. Typ pece : —			
		35. Atmosféra (typ, čistota, parametry), proudění : Technický argon 4.6, Průtok plynu 10 L/m			
36. Uhel nastavení hořáku: 45°					
37. Druh automatu: KEMPPPI MLS 3003 ACDC					
38. Složení lázně : —					
39. Č.pozice	40. Materiál	41. Výrobce, rozměr	42. Počet kusů	43. Norma	44. Poznámka
45. Další podmínky a poznámky:					
46. Výrobce			48. Zkušební orgán nebo technická dozorcí (inspekční) organizace		
47. datum, jméno, podpis a razítko svářečského dozoru			49. datum, jméno, podpis a razítko zkušebního orgánu		

Tab. 12 Specifikace postupu pájení pro vzorek 3

Po zhotovení spoje byly vzorky opět podrobeny vizuální kontrole, kapilárnímu a radiografickému zkoušení.

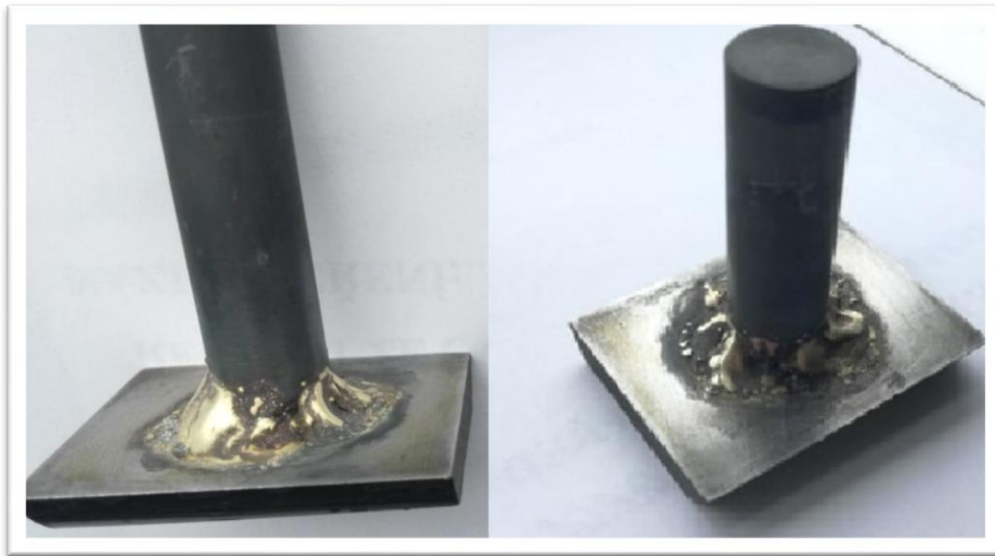
### 8.3 Vyhodnocení experimentální části 2

Po spojení vzorků bylo na řadě jejich vyhodnocení. Vizuální kontrolou bylo zjištěno několik vad. Na obr. 29 můžeme sledovat fotografie spoje zhotoveného pájkou stříbrnou.



Obr. 29 Fotografie vzorku pájeného pájkou Ag45CuZ

Už od pohledu je viditelné, že spoj je vzhledově nepěkný. Na povrchu je nadbytek pájky (vada 6BAAA dle ČSN EN ISO 18 279, dále jen označení vady), spoj je nepravidelný (5GAAA), v okolí spoje se nacházejí zbytky tavidla (9FAAA) a ve spoji je i několik otvorů, které nejsou spájené. Jinak tomu nebylo ani u vzorku pájeného pájkou mosaznou (obr. 30). Spoj obsahoval stejné nedostatky a vady jako vzorek pájený stříbrnou pájkou. U mosazného spoje vady dosahovaly menší velikosti.



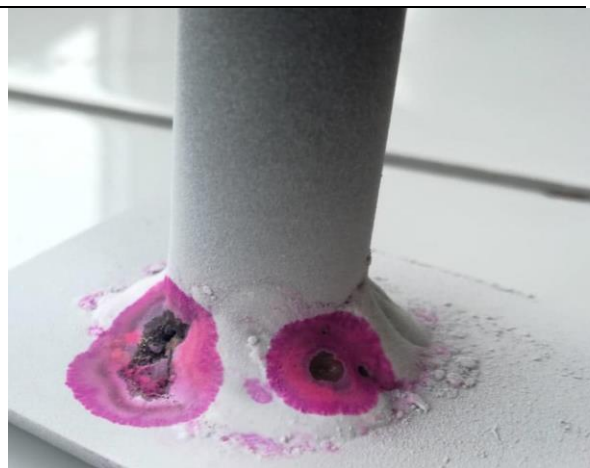
*Obr. 30 Vzorek spojený pájkou mosaznou: CuZn40*

Kapilární zkoušení zmiňované povrchové vady ještě zvýraznilo. Na obr. 31 a 32 lze pozorovat černo-šedá místa na mosazné pájce pájeného vzorku, která značí nepravidelnost spoje a nespájená místa. V těchto místech se do pájecí mezery pro tupý spoj dostalo jen minimální množství pájky. Na obr. 31 jsou také viditelné kapky ulpěné na povrchu pracovního kusu. Jedná se o rozstřík, který nese označení 7CAAA. Ten byl způsoben průtokem inertního plynu TIG hořákem, který kapky rozfoukal po povrchu. U druhého vzorku pájeného stříbrnou pájkou se vady opakovaly. Můžeme pozorovat nepravidelnost spoje a místa kam se pájka opět nedostala.





*Obr. 31 Vzorek pájený pájkou L – CuZn40 po kapilárním zkoušení*



*Obr. 32 Vzorek pájený pájkou L – CuZn40 po kapilárním zkoušení*

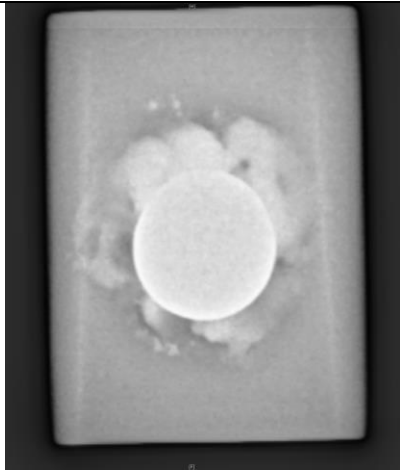


*Obr. 33 Vzorek pájený pájkou Ag45CuZn po kapilárním zkoušení*

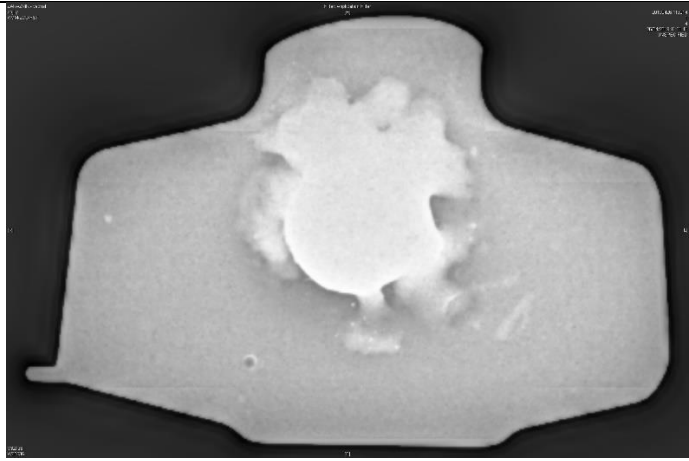


*Obr. 34 Vzorek pájení pájkou Ag45CuZn po kapilárním zkoušení*

Radiografické zkoušení bohužel nebylo účinné a neodhalilo žádné vnitřní vady. RTG zařízení nedokázalo prozářit část ze slinutého karbidu, a proto na fotografiích (obr. 35, 36) nejsou viditelné žádné vnitřních vady.

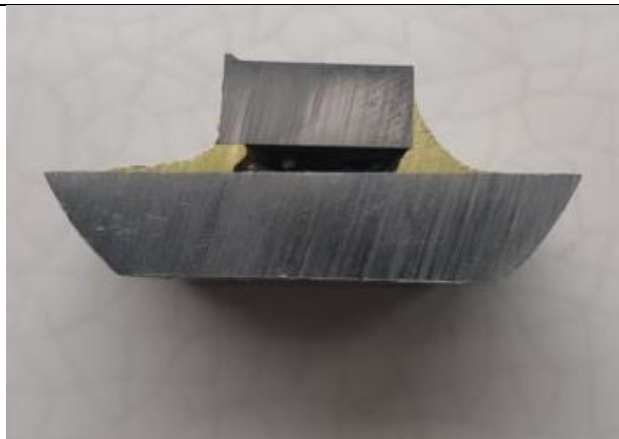


Obr. 35 Snímek z RTG mosazí pájeného vzorku

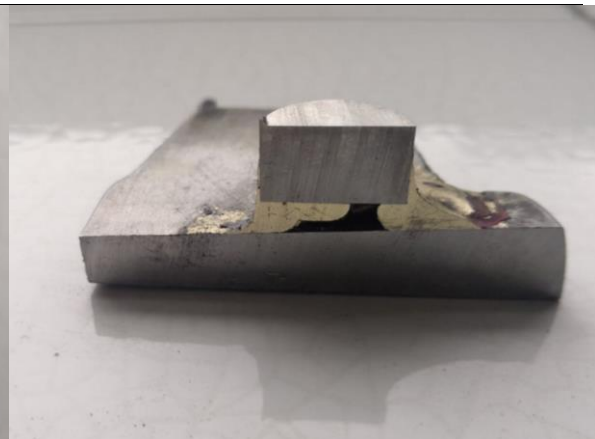


Obr. 36 Snímek z RTG stříbrnou pájkou pájeného vzorku

Pozorováním rozřízných vzorků bylo zjištěno, že pájka nezatekla do mezer spoje, jak je vidět na obr. 37 a 38. Jednalo se tedy o vadu nezatečení do mezery spoje. Důvodů nezatečení pájky mohlo být několik. Součástí mosazné pájky nebylo tavidlo, a tak pájka špatně smáčela a nezatekla. V obou případech byl také problém dostat pájku do mezery spoje díky foukajícím inertnímu plynu. Dále nebyla vytvořena požadovaná mezera mezi základními materiály. V tabulkách pBPS je předepsána mezera 0,5 mm, aby mohli působit kapilární síly, ale mezera spoje dosahuje ve skutečnosti velikosti okolo 2 mm. Technik tedy nedodržel postup dle pBPS. Tato skutečnost samozřejmě narušuje celkovou pevnost tohoto spoje, a proto jsme opět spoje nepodrobili tahové zkoušce.



Obr. 37 Řez spoje pájeného pájkou L-CuZn40



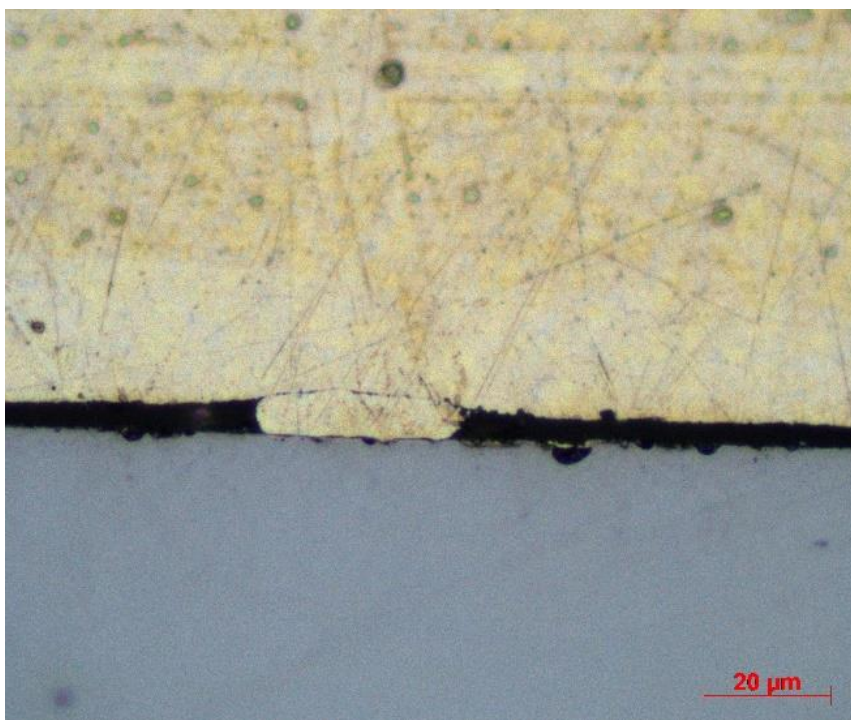
Obr. 38 Řez spoje pájeného pájkou Ag45CuZn

Jako poslední byla provedena metalografická zkouška. Stříbrný spoj na rozhraní SK – pájka, v místech, kde došlo ke spojení materiálu, nevykazoval žádné známky vad a pájka dobře smáčela slinutý karbid jak je vidět na obr. 39.



Obr. 39 Mikrosnímek spoje s pájkou Ag45CuZn, rozhraní SK (nahore) – pájka, zvětšení 200x

Totéž se bohužel nedalo říct o rozhraní pájka – ocel 12 050, kde na obr. 40 je vidět mezera rozměrově okolo 7 μm mezi pájkou a ocelí. Mezera mezi pájkou a ocelí nejspíše vrstva oxidů, ale to by se muselo dokázat chemickou analýzou. Mezera také negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti spoje.



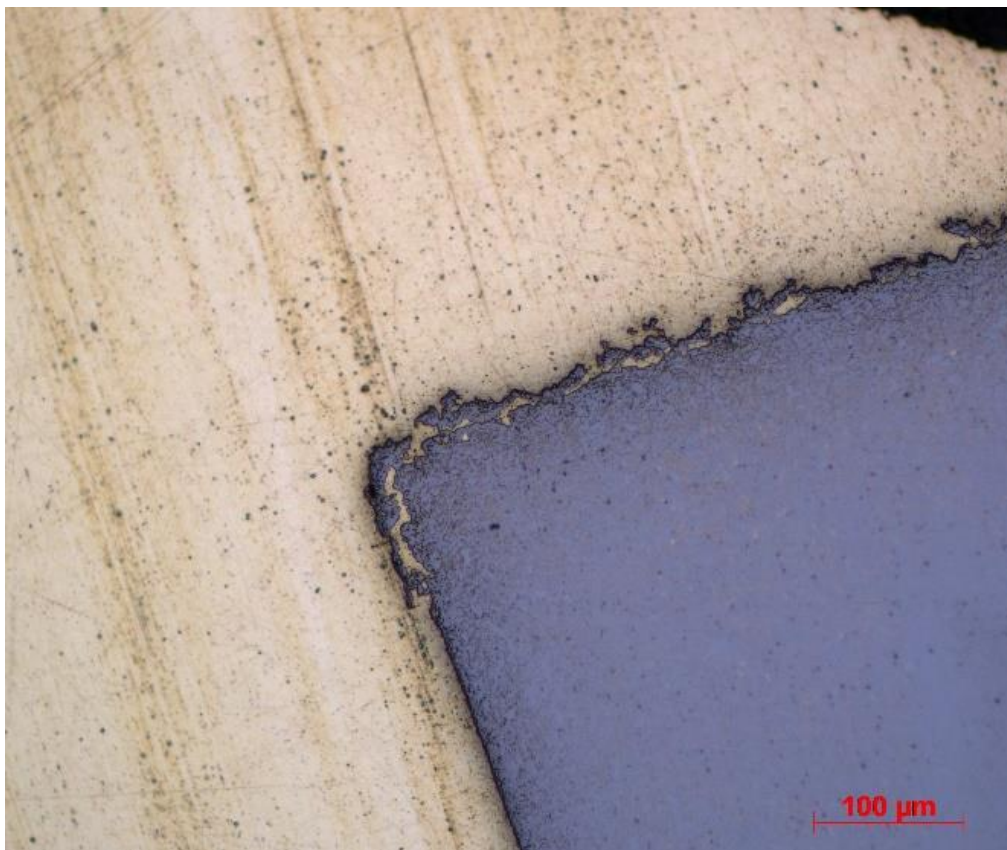
Obr. 40 Mikrosnímek spoje s pájkou Ag45CuZn, rozhraní ocel (dole) – pájka, zvětšení 1000x

Na dalším snímku (obr. 41) je vidět trhlina, která se vytvořila na oceli v místě, kde docházelo k nanášení pájky během zhotovování spoje. Trhlina vznikla pravděpodobně z důvodu velkého tepleného příkonu od TIG hořáku nebo kvůli náhlému teplotnímu šoku, protože na opačné straně spoje se trhliny již neobjevovaly. Vada mohla být již v základním materiálu před pájením.

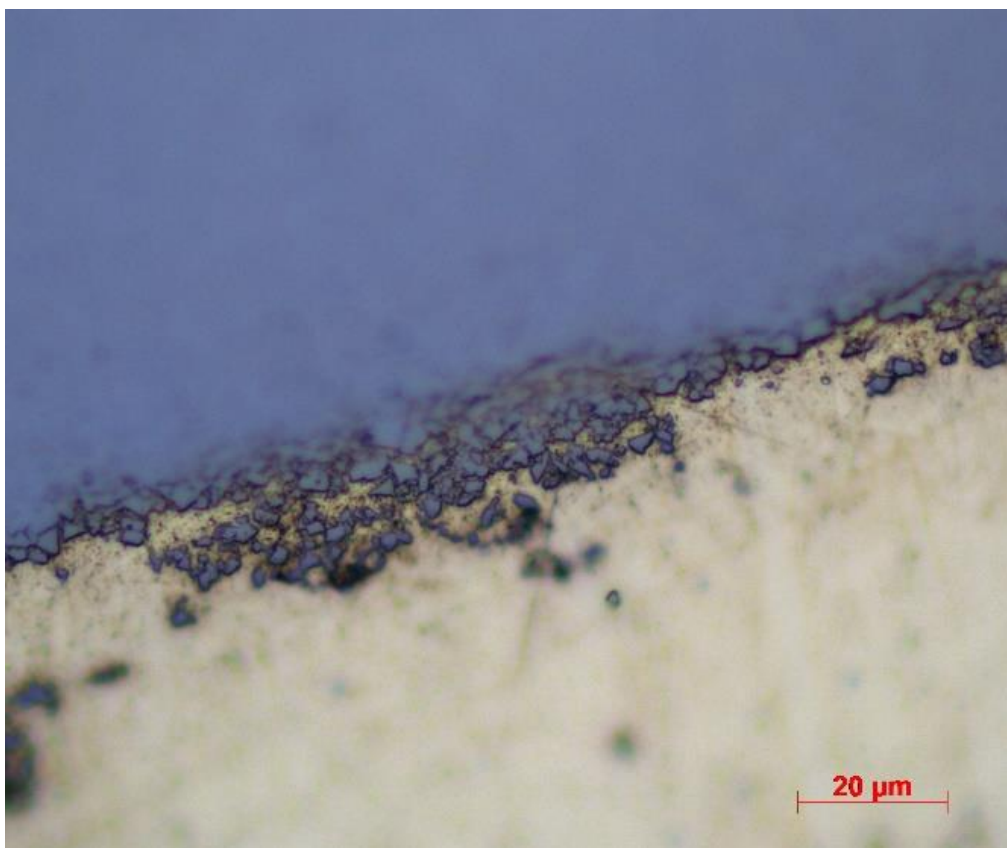


Obr. 41 Mikrosnímek spoje s pájkou Ag45CuZn, rozhraní ocel (dole) – pájka, kde je viditelná trhlina, zvětšení 1000x

Spoj pájený pájkou mosaznou vykazoval podstatně jiné vady, než spoj předchozí. Na obr. 42 a 43 jsou vidět kousky slinutého karbidu, jak se oddělily od svého povrchu. Kobaltové pojivo, které taje při teplotách 1495 °C bylo nadměrným vystavením vysokých teplot při zhotovování spoje a dlouho dobrou pájení roztaveno, a tak se části karbidu bez pojiva oddělily od povrchu v místech, kde bylo tepelné zatížení největší. Stříbrná pájka tedy nahradila kobaltové pojivo. Takový spoj by mohl mít v některých případech celkově lepší mechanické vlastnosti, ale pro potřebu našeho experimentu je narušení struktury SK nepřijatelné. Důvod pro vytvoření spoje probíhalo dlouhou dobu, byl ten, že se pájka obtížně dostávala do mezery spoje a měla tendenci ze spoje unikat.

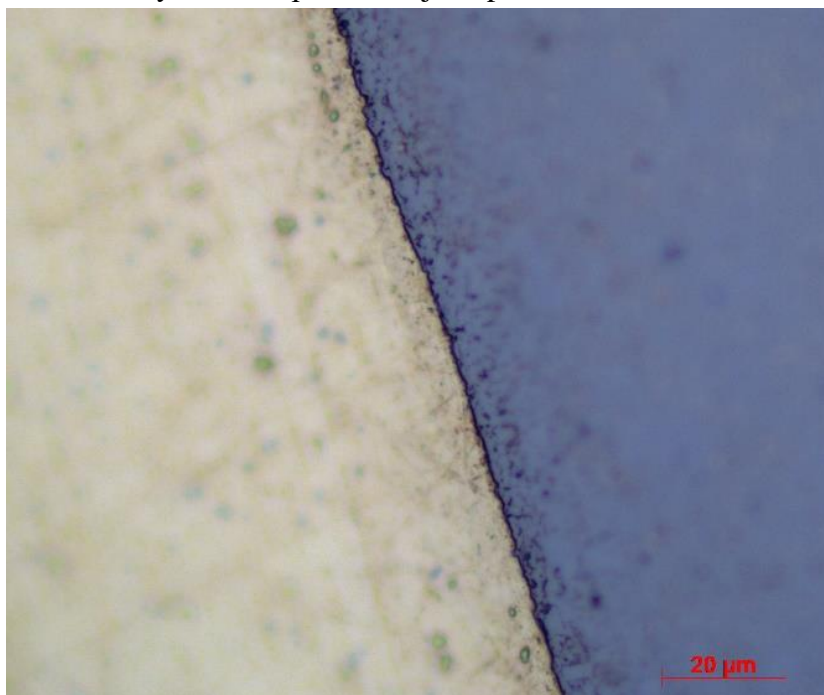


Obr. 42 Mikrosnímek spoje s pájkou L – CuZn40, rozhraní pájka (vlevo) – SK, zvětšení 200x



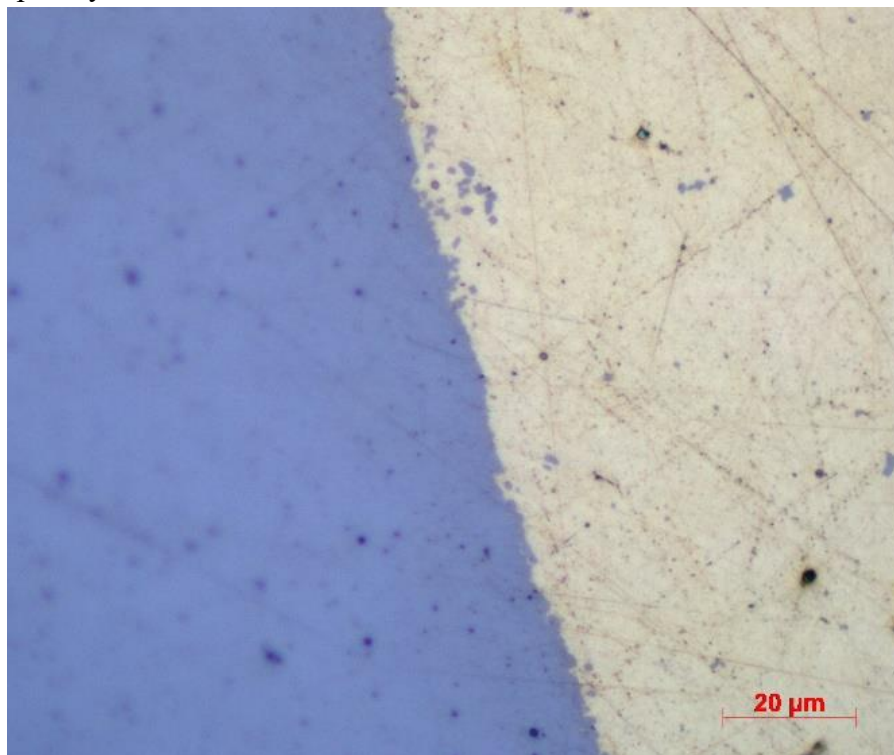
Obr. 43 Mikrosnímek spoje s pájkou L – CuZn40, rozhraní SK (nahore) – pájka, zvětšení 1000x

Na dalším obrázku č. 44 je vidět rozhraní mezi pájkou a SK v mezeře spoje, kde je vidět, že pájka dobře smáčela slinutý karbid a přilnula k jeho povrchu.



Obr. 44 Mikrosnímek spoje s pájkou L – CuZn40, rozhraní pájka (vlevo) – SK, zvětšení 1000x

To samé se dá říci i o posledním obrázku č. 45, kde lze pozorovat rozhraní mezi mosaznou pájkou a ocelí v mezeře spoje. Na obrázku jsou také pozorovatelné kousky oceli v mosazné pájce. Tyto kousky se rozpustily na povrchu oceli a poté ztuhly na straně mosazné pájky, aniž by se v ní rozpustily.



Obr. 45 Mikrosníkem spoje s pájkou L – CuZn40, rozhraní ocel (vlevo) – pájka, zvětšení 1000x

## Závěr

Byli zhotoveny první testovací vzorky heterogenního pájeného spoje slinutý karbid – ocel pomocí technologie pájení v ochranné atmosféře wolframovou elektrodou. Na základě zhodnocení spoje, který vykazoval řadu problémů ohledně kvality spojení až po problém základního materiálu – slinutého karbidu s vysokým tepelným příkonem, byla navržena další sada tupých i přeplátovaných pájených spojů. Orientovali jsme se na vyladění parametrů pro technologii TIG a budeme se snažit snížit tepelný příkon, změnu polaritu včetně zvolení přehřevu u základního materiálu. Věříme, že po vyzkoušení vhodných podmínek a parametrů najde tato technologie uplatnění.

V experimentu číslo dva jsme zkoušeli vyladit parametry pro pájení stříbrnou pájkou a zároveň jsme srovnávali rozdíl mezi drahou, stříbrnou a levnější mosaznou pájkou. Bohužel experiment se potýkal s podobnými problémy jako v části první. Technolog nad pájením dvou vzorků strávil okolo hodiny času a potýkal se se značnými potížemi. Obě pájky nedostatečně smáčely povrch základních materiálů. Pájka měla tendenci spoj opouštět a rozstříkovat se po ploše vlivem proudění inertního plynu. Při pájení na nepřímé polaritě docházelo k velkému zatěžování wolframové elektrody, která se během krátkého časového okamžiku (8 sekund od začátku pájení) začala tavit. Takto natavená elektroda se už dále nedala použít, musela být uštípnuta a následně nahradit elektrodou novou. Proto je použití nepřímé polaritu v kombinaci s drahou stříbrnou pájkou značně finančně náročné a nevýhodné. Po složitém procesu pájení oba vzorky vykazovaly značné množství vad. Pájený spoj stříbrný obsahoval stejné vady jako vzorek spojený pájkou mosaznou.

V budoucnu se bude potřeba orientovat na to, jak dostat pájku do mezery spoje. Na takové experimenty nebude nutné jako ZM používat drahé a obtížně dělitelné slinuté karbidy, ale postačí použít obyčejné konstrukční nízkolegované nebo nelegované oceli, abychom mohli vyzkoušet více vzorků. Bude nutno také navrhnout lepší přípravek, aby mezera mezi spoji byla přesná a pájka se mohla snadněji dostat do mezery spoje.

Pokud bychom se chtěli odklonit od tématu pájení elektrickým obloukem, tak jako alternativu pro tento druh spojení připadá v úvahu technologie pájení plamenem, která je levnější, nebo pájení sendvičovou pájkou v ochranné atmosféře inertního plynu. Tyto metody se již v minulosti pro tento druh spojení (slinutý karbid – ZM) používaly a vytvoření kvalitního spoje by tudíž nemělo být tak obtížné.

## Seznam literatury

- [1] RUŽA, V. *Pájení*. Druhé, upravené a doplněné vydání. Praha: SNTL, 1988.
- [2] GRUBER, J. Kukátko do historie svařování.  
[http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef\\_gruber/clanky/benardos.pdf](http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/benardos.pdf). Osobní stránky [online]. 2012 [cit. 2015-05-22].
- [3] DVOŘÁK, K. *Historie svařování v českých zemích: Úvod do historie svařování*.  
<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=239>. Česká svářečská společnost ANB [online]. 2008 [cit. 2015-05-21].
- [4] HUMPSTON, G., JACOBSON, D. *Principles of soldering*. Materials Park, Ohio: ASM International, c2004. ISBN 0871707926.
- [5] ABEL, M., CIMBUREK, V. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Vyd. 1. Pardubice: ABE.TEC, 2005, 179 s. ISBN 80-903597-0-1.
- [6] *Povrchové napětí* – Wikipedie. [online].  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Povrchov%C3%A9\\_nap%C4%9Bt%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Povrchov%C3%A9_nap%C4%9Bt%C3%AD).
- [7] TECHPORTAL.CZ. *Fyzikální podstata pájení* [online]. [cit. 2018-12-06].  
[https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyda4qSAP2hZNnz\\_st-3-A4fw](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyda4qSAP2hZNnz_st-3-A4fw).
- [8] LAUKO, M., ČVUT DSpace [online]. *Pájecí slitiny a jejich vlastnosti*.  
[https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68608/F3-DP-2017-Lauko-Marek-Pajeci%20slitiny%20a%20jejich%20vlastnosti.pdf?sequence=1&fbclid=IwAR3gLKRa7mOud8hjoLeiqr7NJBKHLmH0rMSC4AHvy\\_tf9STQmfEmuWXcKX4](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68608/F3-DP-2017-Lauko-Marek-Pajeci%20slitiny%20a%20jejich%20vlastnosti.pdf?sequence=1&fbclid=IwAR3gLKRa7mOud8hjoLeiqr7NJBKHLmH0rMSC4AHvy_tf9STQmfEmuWXcKX4). Praha: ČVUT-EL, 2017.  
Diplomová práce.
- [9] *I. Fickův zákon* – WikiSkripta. [online].  
[https://www.wikiskripta.eu/w/I.\\_Fick%C5%AFv\\_z%C3%A1kon](https://www.wikiskripta.eu/w/I._Fick%C5%AFv_z%C3%A1kon).
- [10] VIŇÁŠ, J., KAŠČÁK, J. *Mig spájkovanie povrchov upravených karosářských plechov*.  
<https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/17-2010/pdf/127-130.pdf>.  
Košice: SJF – TUKE, 2010.
- [11] *TIG svařování I - základní principy* [online].  
<https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008011702>. 2009 [cit. 2018-12-06].
- [12] JANSÁ, Z. *Vliv kalící teploty nástrojových ocelí na opotřebení proti otěru*. Plzeň, 2015.  
Bakalářská. ZČU-FST-KMM. Vedoucí práce Ing. Jiří Hájek Ph.D.
- [13] 3.2.1.1.4.9 *OCELI TŘÍDY 19 | Studijní materiály nejen do strojírenství. Studijní materiály nejen do strojírenství*. <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/04/321149-oceli-tridy-19.html>.



- [14] DEMBEK, J. *Slinuté karbidy a jejich efektivní využití*. [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29889](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29889). Brno 2010. Diplomová, VUT – FSI.
- [15] VÁČA, T. *Degradace slinutých karbidů*. Plzeň, 2015. Bakalářská. ZČU - FST - KMM. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž.
- [16] BARTÁK, J. *Svařování kovů v praxi: materiály, výpočty, technologie, požadavky na jakost, bezpečnost práce*. Praha: Dashöfer, 2008. ISSN 1803-2834.
- [17] ČESKOSLOVENSKÁ STÁTNÍ NORMA ČSN 41 2050: *Ocel 12 050*. Nahrazuje ČSN 41 2050 z 12. 9. 1962. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1978.
- [18] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA ČSN EN ISO 14175: *Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. Nahrazuje ČSN EN ISO 1475 z února 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2009.
- [19] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA ČSN EN 12799: *Tvrdé pájení - Nedestruktivní zkoušení pájených spojů*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [20] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA ČSN EN ISO 18279: *Tvrdé pájení - Vady v pájených spojkách*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

## Seznam tabulek

- Tab. 1 Hodnoty povrchového napětí
- Tab. 2 Hodnoty difúzního součinitele D pro různé kombinace
- Tab. 3 Rozdělení slinutých karbidů dle ČSN ISO 513
- Tab. 4 Rozdělení nelegovaných ocelí dle % C a využití
- Tab. 5 Chemické složení oceli 12 050
- Tab. 6 Pájka B – Ag45CuZn jejich chemické složení a teplota tavení
- Tab. 7 Specifikace postupu pájení pro vzorek 1
- Tab. 8 Hodnoty difúzního součinitele D pro různé kombinace
- Tab. 9 Chemické složení mechanické vlastnosti pájky L – CuZn40
- Tab. 10 Složení a vlastnosti slinutého karbidu CTM17
- Tab. 11 Specifikace postupu pájení pro vzorek 2
- Tab. 12 Specifikace postupu pájení pro vzorek 3

## Seznam obrázků

- Obr. 1 Hlavní metody spojování strojírenských materiálů

- Obr. 2 Makrosnímek ocelového spoje
- Obr. 3 Schéma pájeného spoj
- Obr. 4 Schématické znázornění povrchového napětí kapaliny
- Obr. 5 Schématické znázornění smáčivosti
- Obr. 6 Rovnovážné diagramy měkkých pájek na bázi Pb-Sn, Sn-Zn, Zn-Cd, Cd – Pb
- Obr. 7 Rovnovážný diagram slitiny Cu-Zn
- Obr. 8 Rovnovážný diagram slitiny Ag-Cu-Zn
- Obr. 9 Zkušební vzorky pro zkoušku smykem
- Obr. 10 Zkušební vzorek pro odlupovací zkoušku
- Obr. 11 Princip svařování TIG
- Obr. 12 Vzájemná poloha hořáku a přídavného materiálu při svařování svaru tupého
- Obr. 13 Poloha hořáku a přídavného materiálu pro koutové spoje v poloze vodorovné a šikmo shora
- Obr. 14 Modely tepelného zatížení jednotlivých skupin SK a různé lámavosti třísek
- Obr. 15 Závislost vodivosti SK na teplotě
- Obr. 16 Závislost tvrdosti SK na teplotě
- Obr. 17 Hodnoty lomové houževnatosti a obsahu Co pro různé zrnitosti
- Obr. 18 Zařízení MasterTIG MLS 3003 ACDC
- Obr. 19 Konstrukční návrh spoje
- Obr. 20 Pájený vzorek před a po kapilární zkoušce
- Obr. 21 Řez pájeného spoje
- Obr. 22 Snímek vzorku z RTG
- Obr. 23 Mikrosnímek z elektronového mikroskopu, rozhraní SK (nahore) – pájka – ocel
- Obr. 24 Detail rozhraní SK – pájka - ocel a pohled na vnitřní dutinu
- Obr. 25 Mikrosnímek z elektronového mikroskopu, pohled na trhlinu
- Obr. 26 Mikrosnímek z elektronového mikroskopu
- Obr. 27 Mikrosnímek z elektronového mikroskopu, rozhraní pájka (nahore) – ocel
- Obr. 46 Detail rozhraní, kde je pozorovatelná difúzní vrstva
- Obr. 29 Fotografie vzorku pájeného pájkou Ag45CuZ
- Obr. 30 Vzorek spojený pájkou mosaznou: CuZn40
- Obr. 47 Vzorek pájený pájkou L – CuZn40 po kapilárním zkoušení