



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní  
Ústav strojírenské technologie**

**Svařování termočlánků mikroplazmou**

**Welding of thermocouples microplasma**

Bakalářská práce

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE

**Jaromír Bittner**

---

Praha 2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Jaromíra BITTNERA**

Program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Název: Svařování termočlánků mikroplazmou

Název anglicky: Welding of thermocouples microplasma

### Zásady pro vypracování:

1. Druhy termočlánků používaných při svařování
2. Popis principu drátkových termočlánků a možné způsoby výroby
3. Návrh a konstrukce přípravku pro svařování termočlánků
4. Praktické svaření vybraného typu termočlánku a návrh metodiky zkoušení
5. Závěrečné zhodnocení dosažených poznatků při konstrukci přípravku a výroby termočlánků

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE

Konzultant: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE


Datum zadání bakalářské práce: 25. 4. 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 12. 8. 2016

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

*Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou nebo bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové nebo bakalářské práci.*

Zadání bakalářské práce převzal dne: 16. 5. 2016

  
-----  
Student

  
-----  
Vedoucí ústavu



  
-----  
Děkan

V Praze

dne 24. 4. 2016

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Svařování termočlánků mikroplazmou vypracoval samostatně a veškeré použité informační zdroje, ze kterých jsem při tom čerpal, jsem uvedl na konci této práce v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

Podpis

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Karlu Kovandovi Ph.D., IWE za vedení mé bakalářské práce, za věcné připomínky a za pomoc při řešení problémů v průběhu bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Michalu Brejchovi Ph.D. z Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze za realizaci kontrolního měření.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu během studia.

## Anotace

<i>Jméno a příjmení:</i>	Jaromír Bittner
<i>Program:</i>	Výroba a ekonomika ve strojírenství
<i>Obor:</i>	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
<i>Druh práce:</i>	Bakalářská práce
<i>Vedoucí práce:</i>	Ing. Karel Kovanda Ph.D., IWE - Ústav strojírenské technologie
<i>Rok obhajoby:</i>	2016
<i>Název práce:</i>	Svařování termočlánků mikroplazmou

V teoretické části bakalářské práce jsou uvedeny fyzikální principy fungování termočlánků, druhy termočlánků používaných při svařování a tepelném zpracování. Následuje teorie svařování mikroplazmou a základní charakteristiky této metody. Teoretickou část uzavírá výčet technologií používaných k výrobě termočlánků svařováním.

V experimentální části je uveden popis jednotlivých zařízení pracoviště mikroplazmového svařování. Následuje popis návrhu přípravku pro svařování termočlánků a rozbor materiálů použitých pro výrobu termočlánků a jejich svařitelnosti. V druhé polovině experimentální části je postup stanovení svařovacích parametrů a vyhodnocení kontrolních měření.

V závěru bakalářské práce jsou zhodnoceny dosažené výsledky.

<i>Klíčová slova:</i>	mikroplazmové svařování, plazma, plazmový oblouk, termočlánek
<i>Rozsah práce:</i>	54 stran
<i>Počet obrázků:</i>	52
<i>Počet tabulek:</i>	13
<i>Počet grafů:</i>	7

## Annotation

<i>Name and surname:</i>	Jaromír Bittner
<i>Program:</i>	Production and economics in mechanical engineering
<i>Field:</i>	Manufacturing technology, materials and economics in mechanical engineering
<i>Kind of work:</i>	Bachelor thesis
<i>Supervisor:</i>	Ing. Karel Kovanda Ph.D., IWE – Department of Manufacturing Technology
<i>Year:</i>	2016
<i>Title:</i>	Welding of thermocouples microplasma

In the theoretical part of this thesis are presented physical principles thermocouples, types of thermocouples used in field of welding and heat treatment. Followed by theory of microplasma welding and its basic characteristics. The theoretical part is closed by the list of welding technologies used to produce thermocouples.

In the experimental part of this thesis is a description of microplasma welding workplace and its components. Followed by construction of thermocouple handler and analysis of materials and their weldability. In the second half of the experimental part is a procedure of determinating welding parameters and evaluation of control measurements.

In the end of this bachelor thesis is the conclusion and the evaluation of results.

<i>Keywords:</i>	Microplasma welding, Plasma, Plasma arc, Thermocouple
<i>Scope:</i>	54 pages
<i>Number of figures:</i>	52
<i>Number of tables:</i>	13
<i>Number of charts:</i>	7

## Obsah

1	Úvod .....	8
2	Termočlánek.....	9
3	Druhy termočláneků.....	11
3.1	Řešení konců termočláneků .....	13
4	Použití termočláneků ve svařování a tepelném zpracování.....	16
4.1	Stanovení průběhu teplotních cyklů .....	17
5	Popis svařování plazmou .....	19
5.1	Plyny pro svařování mikroplazmou .....	19
5.2	Plazmové svařování .....	20
5.3	Pracovní oblast při svařování mikroplazmou .....	21
5.4	Podmínky svařování mikroplazmou [9] .....	21
5.4.1	Vliv podmínek svařování.....	21
5.4.2	Parametry svařování.....	22
5.4.3	Regulace plazmového procesu .....	22
5.5	Vady při mikroplazmovém svařování .....	22
5.5.1	Povrch svarového spoje.....	23
5.5.2	Koncový kráter s vadou .....	23
5.5.3	Tvorba pórů .....	23
5.6	Použití svařování mikroplazmou .....	23
5.6.1	Použití:.....	23
5.7	Metody svařování termočláneků .....	24
5.7.1	Odporové svařování .....	24
5.7.2	Svařování vybíjením kondenzátoru .....	24
5.7.3	Svařování laserem .....	26
5.7.4	Svařování elektronovým svazkem .....	26
5.7.5	TIG/Plasma .....	26
6	Požadované termočláneký .....	27
6.1	Svařitelnost slitin niklu .....	27
7	Vývoj přípravku ke svařování termočláneků .....	28
7.1	První návrh .....	28
7.2	Druhý návrh.....	29
7.3	Stanovení rozměru drážky přípravku .....	29
8	Zařízení pro svařování termočláneků .....	35
8.1	Svařovací zdroj Microplasma 50.....	35
8.2	Mikroplazmový hořák.....	37



8.3	Chladicí zařízení UK 500.....	38
8.4	Weldycar carriage.....	39
8.5	Upnutí přípravku .....	39
9	Výroba a vyhodnocení vzorků .....	40
9.1	Postup přípravy svařování .....	40
9.2	Stanovení svařovacích parametrů .....	41
9.3	Výroba zkušebních vzorků .....	43
10	Kontrolní měření .....	44
10.1	Kalibrace termočlánků.....	45
10.2	Měření přechodových jevů.....	47
11	Shrnutí a závěr.....	50
12	Bibliografie.....	51
13	Seznam obrázků .....	53
14	Seznam tabulek .....	54
15	Seznam Grafů .....	54

## 1 Úvod

Hlavním cílem bakalářské práce je navrhnout možné řešení výroby drátkových termočlánků využitím mikroplazmového svařování. Dílčími cíli jsou navržení jednoduchého svařovacího přípravku pro upínání pěti termočlánků najednou, nalezení optimálních svařovacích parametrů a zjištění opakovatelnosti výroby.

Plazma je čtvrté skupenství atomární hmoty pozorované ve vesmíru. Jde o nejrozšířenější stav, který tvoří podíl 99% atomární hmoty ve vesmíru. Jde tedy o ionizovaný plyn složený z iontů a elektronů, který vzniká odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynů nebo roztržením molekul. Plazma tvoří hvězdy, mlhoviny, ionosféru, sluneční vítr a mnoho dalších jevů.

Na Zemi lze pozorovat plazmu v přírodě ve formě blesků nebo polární záře. Z technického hlediska lze využívat plazmu k svícení zářivek, k řezání a v neposlední řadě ke svařování.

Plazmové svařování a řezání bylo vynalezeno Robertem M. Gagem v roce 1953 a patentováno v roce 1957. Plazmovým svařováním lze svařovat jak tlusté tak tenké plechy a je charakteristické vysokou hustotou energie oblouku. Jedním z prvních a nejznámějších využití plazmového svařování byly svary na lopatkách turbíny raket Saturn pro vesmírný program Apollo.

Tato práce se zabývá mikroplazmovým svařováním, které se od klasického plazmového svařování liší hlavně velikostí svařovacího proudu. Při mikroplazmovém svařování jde o hodnoty svařovacího proudu od desetin do dvou desítek Ampérů.

## 2 Termočlánek

Termočlánkem se nazývá dvojice drátů z různých kovových materiálů spojených (svařených) spolu na jednom konci. Využívá se především k měření teploty. Termočlánek využívá principu tzv. Seebeckova jevu, tj. jevu převodu tepelné energie na elektrickou. Tento jev jako první pozoroval estonsko-německý fyzik Thomas Johann Seebeck (1770 - 1831) v roce 1821. Zjistil, že umístí-li se vodič tak, že jeho konce budou mít různé teploty, vzniká mezi nimi určité malé napětí. Velikost tohoto napětí je závislá na použitém materiálu a na rozdílu teplot na obou koncích vodiče. Vezmeme-li k tomu ještě druhý vodič z jiného kovu a na jednom konci oba kovy vodivě spojíme (svaříme), pak na volných koncích naměříme rozdíl těchto napětí obou vodičů. V neuzavřeném obvodu lze tedy mezi oběma spoji dvou kovů naměřit takzvané **termoelektrické napětí  $\Delta U$** , které je dáno rozdílem kontaktních napětí vznikajících na obou koncích daných kovů. [1], [2]

Proto tedy platí:  $\Delta U = U_{12}(T_2) - U_{12}(T_1)$ . Indexy u obou kontaktních napětí jsou stejné - jedná se o dvě napětí, která vznikají na rozhraní stejných kovů. Fakt, že jedno kontaktní napětí je vyšší než druhé, je dán pouze rozdílem teplot obou spojů. [1], [2]

Jelikož závislost termoelektrického napětí na teplotě není lineární, volí se použití termočlánků tak, aby v rozsahu použití teplot se tato závislost dala považovat za lineární. Toto lze uvažovat pro malé rozsahy teplot  $T_1$  a  $T_2$  obou konců daných kovů. V těchto malých rozdílech teplot platí tedy přibližně lineární závislost termoelektrického napětí na teplotě, tj. lze psát  $\Delta U = \alpha_{12}(T_2 - T_1) = \alpha_{12} \cdot \Delta T$ , kde  $\alpha_{12}$  je takzvaný Seebeckův koeficient (též termoelektrický koeficient);  $[\alpha_{12}] = V \cdot K^{-1}$ . Seebeckův koeficient závisí vždy na dané dvojici kovů. Termoelektrické napětí závisí jen na rozdílu teplot a na daných materiálech a nezávisí na způsobu vedení tepla daným materiálem, na rychlosti ohřevu materiálu, atd. [1], [2]

Pokud by rozdíl teplot obou rozhraní kovů byl větší než zhruba několik desítek kelvinů, bylo by nutné místo lineárního vztahu použít vztah složitější. Napětí by tak nebylo již přímo úměrné rozdílu teplot, ale ve výrazu by se objevily i kvadratické členy, kubické členy a další. Tomuto se snažíme v praxi vyvarovat použitím takových materiálů termočlánku, který vykazuje v požadovaném rozsahu teplot lineární závislost. Jinými slovy, známe výši a rozsah měřené teploty a podle toho zvolíme k jejímu měření požadovaný materiál termočlánku. [1], [2]

Použitelnost uvedeného lineárního vztahu je tedy dána tím, jak přesné výsledky při měření napětí uvedeným způsobem očekáváme či potřebujeme.

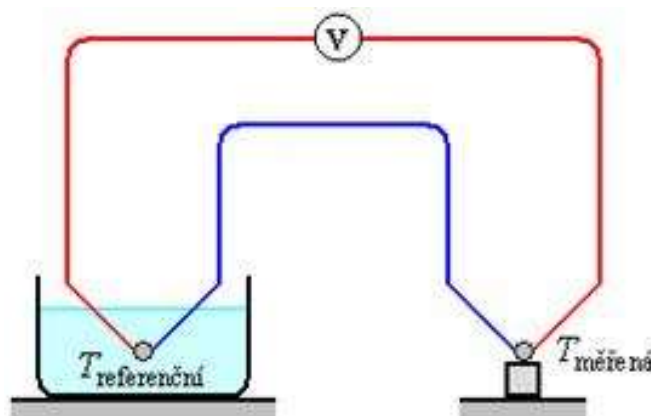
Termoelektrické napětí je pro většinu dvojic kovů velmi malé. Navíc se z dodané tepelné energie přemění na elektrickou energii jen asi 1 % - 3 %. Proto se termočlánky v minulosti vůbec

nepoužívaly jako zdroje elektrického napětí, ale využívaly se k měření teploty. Tímto způsobem se nejčastěji termočlánky využívají i v současné době. [1], [2]

Termočlánek může být v dnešní době využíván i jako spolehlivý zdroj elektrického proudu, ale jeho energetická účinnost i výkon jsou velice malé. Čidlo je složeno ze dvou elektricky vodivých kovových vodičů různého chemického složení. Tyto jsou pak zapojeny do elektrického obvodu. Při praktickém použití jsou takovéto termočlánky sdružovány do baterií a používají se zejména u kosmických sond, kde jsou součástí radioizotopového termoelektrického generátoru. Materiál termočlánků je při těchto speciálních použitích volen z polovodičů.

Aby termočlánek fungoval, musí se mezi dvěma spoji kovů vytvořit teplotní rozdíl, což lze nejjednodušeji udělat tak, že jedno rozhraní ohřejeme. Tedy dodáme energii ve formě tepla. [1], [2]

Jeden konec termočlánku je udržován na stálé referenční teplotě (většinou teplota směsi vody a ledu), druhý konec je vystaven měřené teplotě. Pomocí voltmetru se měří termoelektrické napětí, na základě kterého lze pak stanovit rozdíl teplot obou spojů termočlánku a tedy i měřenou teplotu.



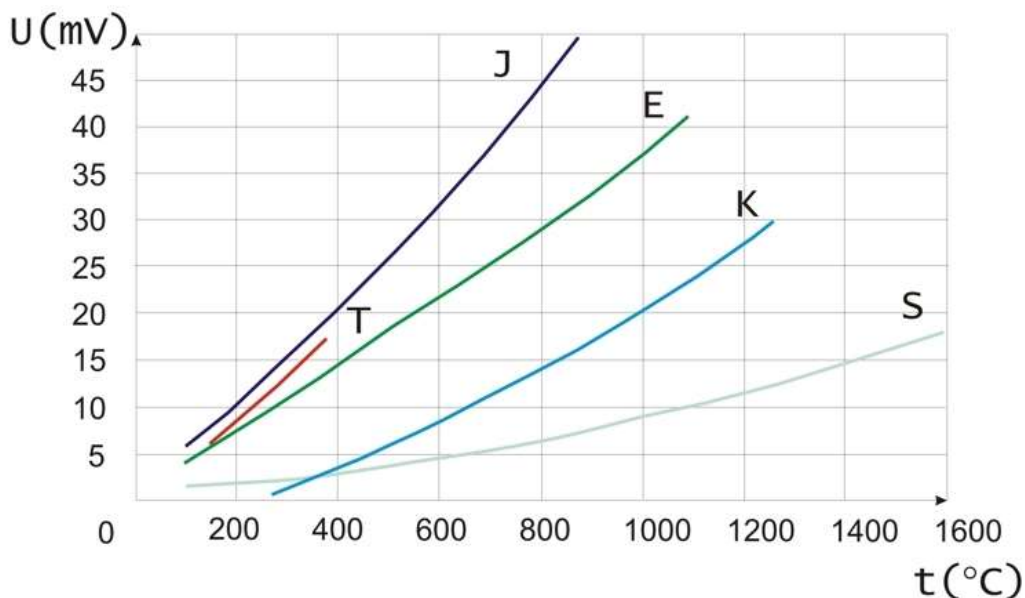
Obrázek 1-Seebeckův okruh [1]

V praxi by takovéto uspořádání pro měření nebylo praktické, používá se proto místo termočlánku s referenční teplotou tzv. kompenzace studeného konce. V praxi je provedena nejčastěji pro konkrétní typ termočlánku, ale lze ji provést i jako univerzálně programovatelná. Kompenzace upravuje napětí tak, aby se vylínil vliv parazitních termočlánků na vedení. V praxi je to provedeno pomocí takzvaného kompenzačního vedení. Materiál tohoto vedení je proveden z podobného materiálu jako termočlánek, ale je levnější. Rozsah použití je také menší, většinou max. do 200°C. Kompenzační vedení je vždy určeno pro konkrétní materiál termočlánku. Pokud potřebujeme při použití mít i samotné vedení při vyšší teplotě, při kterém kompenzační vedení již nelze použít, musíme použít vedení ze samotného materiálu, jako termočlánek. Barvy termočlánekových vedení a kompenzačních vedení jsou podle různých norem různé a v praxi se liší v jednotlivých státech. Viz tabulka 1. [1], [2]

### 3 Druhy termočlánků

Termočlánky jsou k dispozici v mnoha různých kombinacích kovů nebo kalibrací. Nejčastější kalibrace jsou hlavně typy J, K, T a E. Každý typ má různý teplotní rozsah, přesnost a pracovní podmínky. Pro vysoké teploty jsou nejvhodnější typy R, S a speciální C a GB. Maximální teplotní rozsah termočlánku se mění s typem, avšak také s průměrem drátu použitého na termočlánek. To znamená, že s velmi tenkým průřezem termočlánekového drátu nelze dosáhnout plný rozsah teploty. Tabulka 1 zahrnuje kompletní přehled standardních typů termočlánků, jejich přesností, teplotních rozsahů a barevné značení dle ITS – 90. Nejběžnější termočlánek je tedy kalibrace typu J. Pracuje na menším teplotním rozsahu a s kratší životností při vyšších teplotách než typ K. Vzhledem k nákladnosti a spolehlivosti je však typ J vhodný ekvivalent termočlánku typu K, který není drahý, ale je zároveň přesný a spolehlivý na širokém rozsahu teplot. Termočlánek typu J se hodí pro využití ve vakuu a inertních atmosférách. Omezené je však jeho využití v oxidačním prostředí při vysokých teplotách nebo naopak při velmi nízkých teplotách. Pro nízké teploty je vhodnější spíše typ T, který se hojně využívá v cryogenice. [3], [4]

Pro použití za vysokých teplot je vhodné použít termočlánky typu B, R nebo S. Z nichž typ B má nejvyšší teplotní limit z termočlánků zde zmíněných. Udrží vysokou úroveň přesnosti a stability při extrémních teplotách. Dále lze využít typy R a S, které jsou si, co se týče výkonů, velice podobné. Typ R má větší obsah Rhodia než typ S a proto je dražší, ale vykazuje také silnější signál a větší stabilitu. Oba tyto termočlánky jsou běžně k nalezení v BioTech aplikacích, farmaceutickém a potravinářském průmyslu. [3], [4]



Graf 1-Charakteristiky termočlánků [3]

						Barevné značení dle ITS-90			
Typ	Materiál	Přesnost		Vedení	Max. teplotní rozsah [°C]	Větev	Větve		Obalu
<b>B</b>	Pt30Rh – Pt6Rh	Standartní	±0,5% (nad 800°C)	Termočláňkové	0 – 1700	+	Není stanoveno		
		Speciální	---	Kompenzační	0 – 100	-			
						+	Šedá		Šedá
						-	Červená		
<b>E</b>	NiCr – CuNi	Standartní	±1,7°C nebo 0,5% (1% pod 0°C)	Termočláňkové	-200 – 900	+	Fialová		Hnědá
		Speciální	1°C nebo 0,4%	Kompenzační	0 – 200	-	Červená		
						+	Fialová		Fialová
						-	Červená		
<b>J</b>	Fe – CuNi	Standartní	±2,2°C nebo 0,75%	Termočláňkové	0 – 750	+	Bílá		Hnědá
		Speciální	1,1°C nebo 0,4%	Kompenzační	0 – 200	-	Červená		
						+	Bílá		Černá
						-	Červená		
<b>K</b>	NiCr – NiAl	Standartní	±2,2°C nebo 0,75% (2,0% pod 0°C)	Termočláňkové	-200 – 1250	+	Žlutá		Hnědá
		Speciální	1,1°C nebo 0,4%	Kompenzační	0 – 200	-	Červená		
						+	Žlutá		Žlutá
						-	Červená		
<b>R</b>	Pt13Rh – Pt	Standartní	±1,5°C nebo 0,25%	Termočláňkové	0 – 1450	+	Není stanoveno		
		Speciální	0,6°C nebo 0,1%	Kompenzační	0 – 150	-			
						+	Černá		Zelená
						-	Červená		
<b>S</b>	Pt10Rh – Pt	Standartní	±1,5°C nebo 0,25%	Termočláňkové	0 – 1450	+	Není stanoveno		
		Speciální	0,6°C nebo 0,1%	Kompenzační	0 – 150	-			
						+	Černá		Zelená
						-	Červená		
<b>T</b>	Cu – CuNi	Standartní	±1°C nebo 0,75% (1,5% pod 0°C)	Termočláňkové	-270 – 370	+	Modrá		Hnědá
		Speciální	0,5°C nebo 0,4%	Kompenzační	-60 – 100	-	Červená		
						+	Modrá		Modrá
						-	Červená		
<b>N</b>	Ni14,2Cr1,4Si – Ni1,4Si0,1Mg	Standartní	±2,2°C nebo 0,75% (2% pod 0°C)	Termočláňkové	270 – 1300	+	Oranžová		Hnědá
		Speciální	1,1°C nebo 0,4%	Kompenzační	0 – 200	-	Červená		
						+	Oranžová		Oranžová
						-	Červená		

Tabulka 1-Přehled termočláňků [3], [4]

### 3.1 Řešení konců termočlánků

Nechráněné termočlánky jsou nejjednodušší formou, avšak nechráněný termočlánek lze v praxi použít jen výjimečně. Často musí být vedení termočlánku elektricky izolované od aplikace a ochráněné od vnějších vlivů prostředí. Například při měření teploty tekoucí kapaliny může být také nutné umístit termočlánek do speciálního přípravku, aby bylo dosaženo validního měření. Měřící konec je tvořen mechanickým spojením dvou drátů o stejném průměru. Špička termočlánku lze vyrobit několika způsoby. Například svařováním, pájením nebo i zakroucením. Spoje jsou zobrazeny na obrázku 7. Výběr konce termočlánku závisí zejména na požadavcích přesnosti a využití. Nechráněný spoj má proto jistá omezení použití. Nejčastěji se tyto nechráněné termočlánky používají pro měření teploty plynu. Jsou velmi malé a mají krátkou dobu odezvy. Bodový termočlánek o průměru kontaktního hrotu  $25\mu\text{m}$  je vhodný pro přesné zjištění teploty prvků o malých rozměrech. Používá se pro měření teploty proudu vzduchu. Tento termočlánek vykazuje velice krátkou časovou konstantu a vysokou přesnost. Ideální termočlánek pro měření teploty menších ploch je plošný. Hrot je dlouhý asi 10 mm a jeho průměr je  $40\mu\text{m}$ . Vyznačují se vynikající časovou konstantou, vyšší odolností a mechanickou stabilitou. [5] [6]

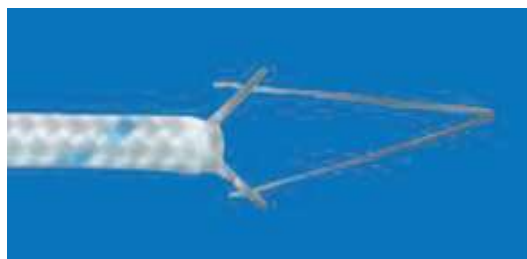


Obrázek 2-Bodový termočlánek [5]



Obrázek 3-Plošný termočlánek [5]

Kombinací bodového a plošného termočlánku vznikne spoj, který je vysoce citlivý. Průměr měřícího hrotu  $25\mu\text{m}$  a délkou přibližně 7 mm. Vyznačuje se velmi krátkou časovou konstantou. Nazýváme jej víceúčelový termočlánek a používá se zejména v případě extrémně rychlých změn teploty. [5]



Obrázek 4-Kombinovaný termočlánek [5]

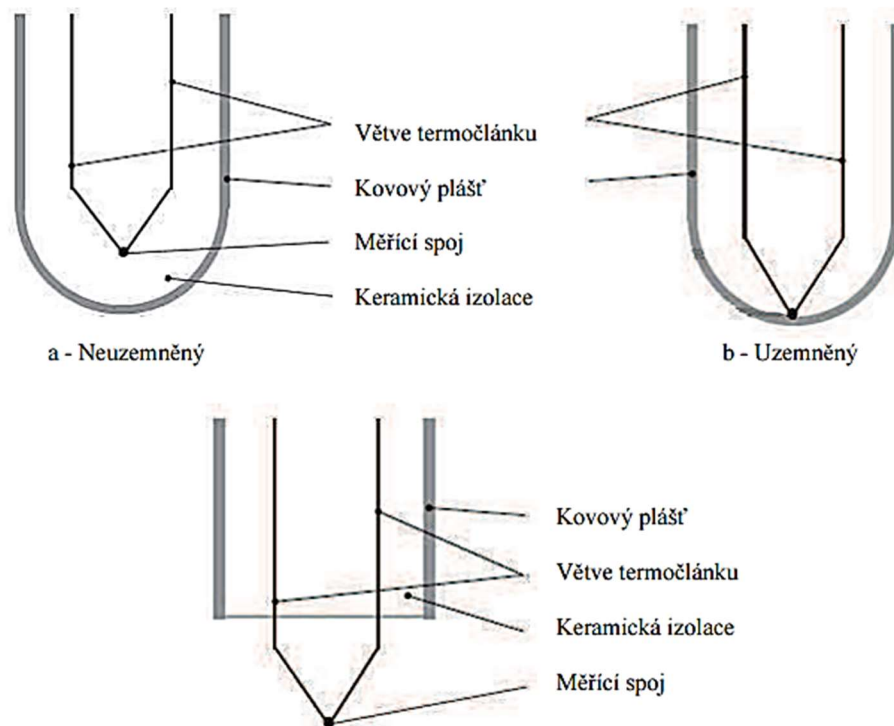


Obrázek 5-Víceúčelový termočlánek [5]

Chráněné termočlánky mají tři různá provedení měřícího konce. Uzemněný, neuzemněný a nechráněný. [5] Viz obrázek 6. Izolaci a ochranu termočlánků lze provést různými způsoby. Například

pro použití při teplotách  $-30^{\circ}\text{C}$  až  $105^{\circ}\text{C}$  lze použít PVC (Polyvinylchlorid) izolaci, teflonovou izolaci pro  $-273^{\circ}\text{C}$  až do  $+250^{\circ}\text{C}$ , skleněná vlákna od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $400^{\circ}\text{C}$  nebo polyamid od  $-269^{\circ}\text{C}$  do  $400^{\circ}\text{C}$ . Pro použití v aplikacích s vysokými teplotami je nutné použít keramické izolace. Požadavky na elektrickou a chemickou izolaci často kolidují s dobrým vedením tepla, což zapříčiňuje chyby v měření. [6]

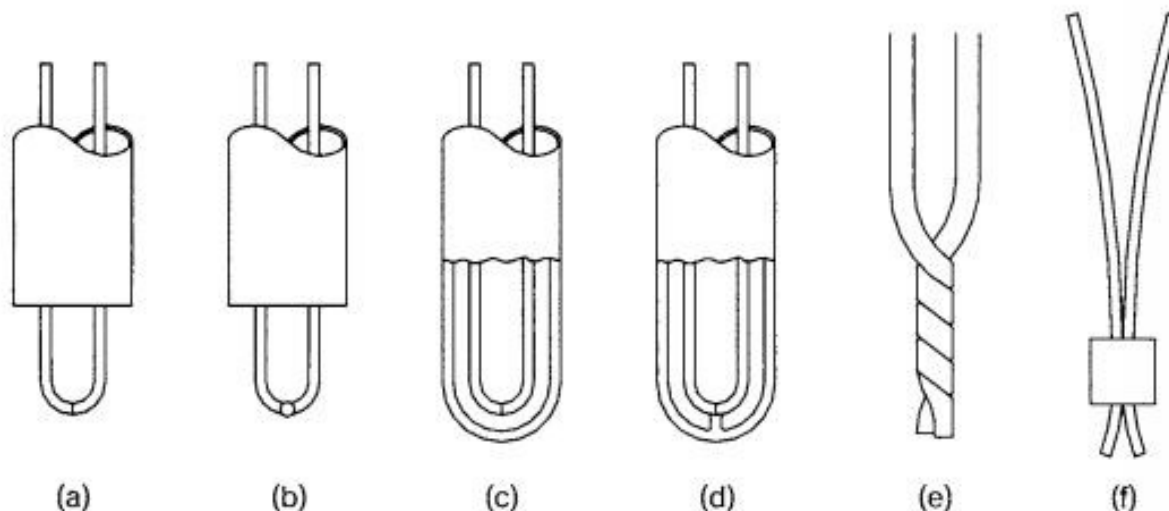
U uzemněného typu je svařen plášť s koncem termočlánku. Spoj má rychlou časovou odezvu, je ovšem velmi citlivý na uzemněné měřicí elektrické smyčky. Neuzemněný spoj má oddělený termočlánek od stěny pláště pomocí izolace. Nechráněný spoj je vysunut z pláště. Tyto termočlánky jsou nejlepší při měření teploty plynu- velmi rychlá časová odezva. [5]



Obrázek 6-Provedení měřícího konce termočlánku [5]

Nechráněné konce termočlánku mají kratší časovou konstantu (dobu odezvy), než termočlánky chráněné pláštěm, z důvodu prostupu tepla pláštěm.

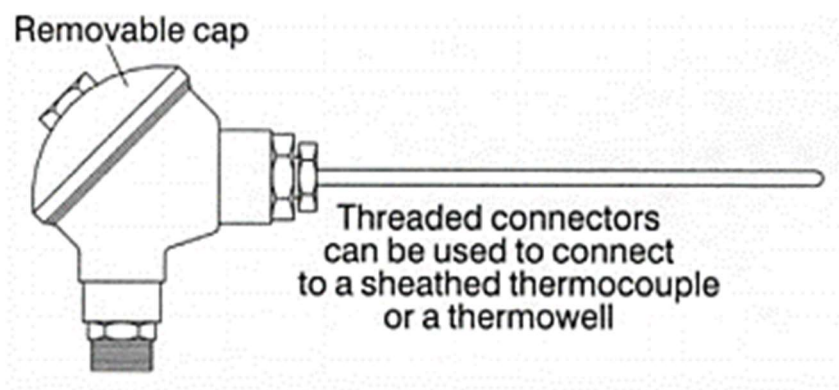




Obrázek 7-spoje termočlánků [6]

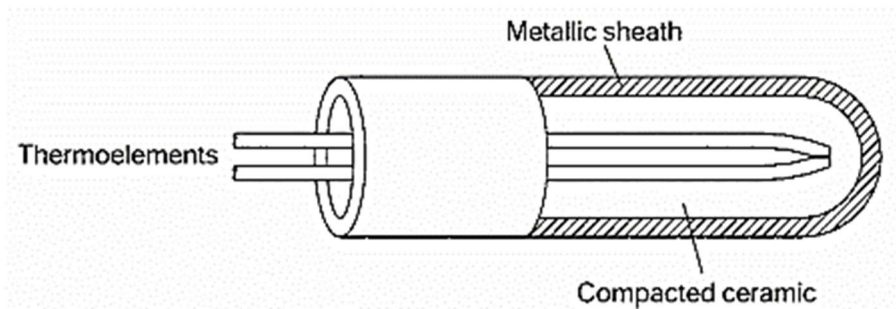
- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| (a) Svařený na tupo            | (d) Svařený na tupo, uzavřený a uzemněný |
| (b) Svařená kulička            | (e) Zakroucený                           |
| (c) Svařený na tupo a uzavřený | (f) ohnutý                               |

Pro měření teplot ve vysoce agresivním nebo korozivním prostředí možné požit termočlánek v trubičce nebo pouzdře okolo izolace. Viz obrázek 8.



Obrázek 8-Příklad zapouzďřeného termočlánku [6]

Takovéto pouzdra jsou běžně k dostání. Výběr izolace a pouzdra záleží na aplikaci. Norma ASTM z roku 1993 o použití termočlánků k měření teplot udává široký seznam materiálů ochranných pouzder pro různé aplikace. MIMS (mineral insulated metal sheathed) termočlánek se pokouší o nejlepší spojení vysokého přenosu tepla a ochrany vůči okolnímu prostředí. V tomto termočlánku je nerostná izolace okolo vedení termočlánku, jako například z oxidu hořečnatého, k zaručení elektrické izolace a podpoře tepelné vodivosti. To vše je zapouzďřené v kovovém pouzdře. MIMS termočlánek lze použít v rozsahu teplot od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $1250^{\circ}\text{C}$ . [6]

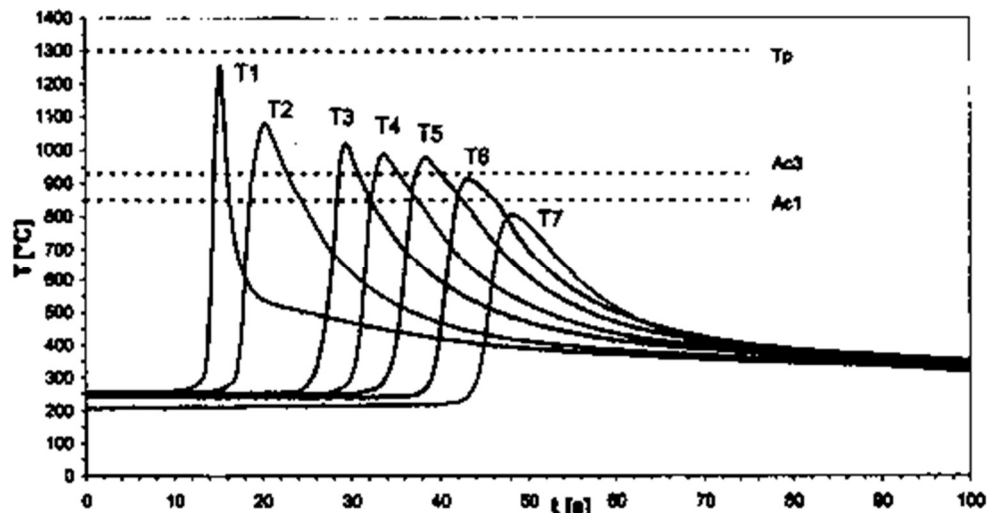


Obrázek 9-Termočlánek MIMS [6]

#### 4 Použití termočláneků ve svařování a tepelném zpracování

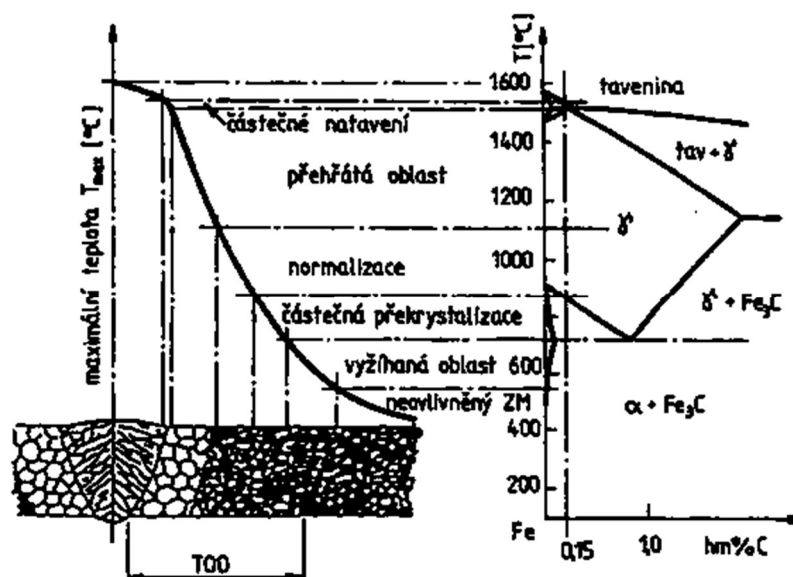
Vliv koncentrovaných zdrojů tepla používaných pro tavné svařování na strukturu a vlastnosti svarových spojů posuzujeme pomocí tzv. teplotních cyklů při svařování. Znalost teplotních cyklů při svařování využíváme také pro výzkum a vývoj svařitelnosti materiálů, studium praskavosti svarových spojů a detailní studium mikrostruktury a mechanických vlastností jednotlivých oblastí svarových spojů.[15] [7]

Příčinou vzniku teplotního cyklu při svařování je zdroj tepla, který musí působit v oblasti svarového spoje, aby byla zajištěna termická aktivace svařovaných povrchů. Přiváděné teplo a vedení tepla jsou pak příčinou vzniku teplotního cyklu. Teplotní cyklus vyjadřuje závislost průběhu teploty na čase v posuzovaném místě svarového spoje. [7] [8]



Obrázek 10-Průběh teplotních cyklů [8]

Teplotní cyklus je charakterizován oblastí ohřevu, tj. nárůstem teploty z počáteční teploty až na maximální teplotu. Rychlost ohřevu na maximální teplotu je dána fyzikálními vlastnostmi svařovaného materiálu, použitou technologií svařování a intenzitou použitého zdroje tepla. Příklady charakteristických tvarů teplotních cyklů naměřených v jednom bodě TOO při svařování různými technologiemi svařování [7] [8]



Obrázek 11- Vliv teplotního cyklu na strukturu svarového spoje [8]

Metoda svařování	Šířka TOO [mm]		
	Nad Ac1	Nad Ac3	Přehřátá oblast
111	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
135, 131	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
121	3 až 15	0,3 až 2	0,1 až 0,5
72	5 až 50	1 až 10	0,5 až 5
51	0,3 až 1	0,1 až 0,3	0 až 0,1
15	0,3 až 1	0,1 až 0,3	0 až 0,1

Tabulka 2-Orientační šířky pásem TOO [7]

#### 4.1 Stanovení průběhu teplotních cyklů

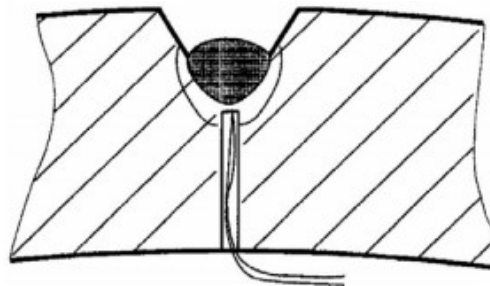
Tvary křivek teplotních cyklů při různých metodách svařování můžeme stanovit:

1. měřením
2. výpočtem

Měření teplotních cyklů při svařování se nejpřesněji provádí pomocí termočlánků. K měření se používají termočlánky typu J, K, R a S.

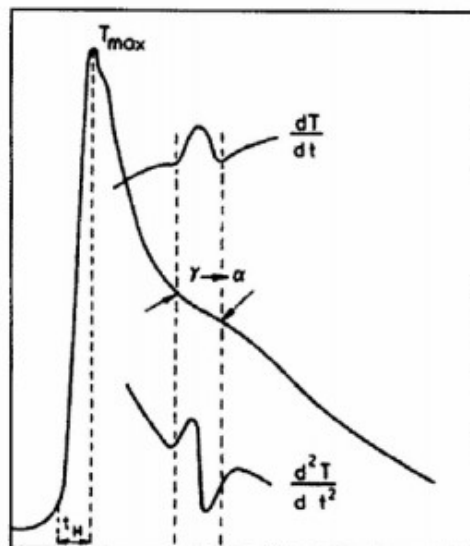
Typ termočlánku se volí podle vzdálenosti od hranice natavení, ve které chceme teplotní cykly měřit. Vzhledem k tomu, že teplotní cykly se mění v závislosti na vzdálenosti od hranice, natavení musí mít spoj termočlánku s měřeným místem velmi malý rozměr. Jinak bychom měřili pouze průměrné hodnoty teploty z plochy spoje. Proto používáme termočlánky malých průměrů, obvykle do 0,5mm. Malé průměry termočlánků mají také malou tepelnou setrvačnost (malý tepelný obsah) a tím přispívají k přesnosti měření. Pro přesné měření je také nutné zajistit kovový kontakt termočlánků s měřeným místem. Proto se obvykle přivažují kondenzátorovou impulzní svářečkou. Pro přesné měření se také doporučuje používat krátkých termočlánků a ke spojení s měřicí aparaturou použít kompenzační vedení s malým vlastním odporem. K vyhodnocování teplotních cyklů se dnes používají výpočtové

softwaru např. PSCOPE. Teplotní cykly můžeme měřit buď na povrchu zkušebních vzorků, nebo i uvnitř materiálu, kde se termočlánky přivažují do válcových děr s plochým dnem v různé vzdálenosti od hranice natavení, viz obrázek 14. [7]



Obrázek 12- Schéma měření teplotních cyklů [8]

Při přesném měření můžeme v oblasti vysokých teplot pozorovat prodlevu, která je způsobena účinkem krystalizačního tepla při tuhnutí svarového kovu. Čím je objem tuhnoucího svarového kovu větší, tím je i tato prodleva výraznější. Tím lze vysvětlit skutečnost, že při ručním obloukovém svařování obalenou elektrodou tuto prodlevu prakticky nezaznamenáme, při svařování automatem pod tavidlem je výraznější a zcela zřetelná je při elektrostruskovém svařování. V oblasti nižších teplot pozorujeme na této křivce změnu sklonu v oblasti teplot transformace  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Změnu sklonu můžeme zvýraznit derivováním záznamu podle času a tím stanovit i počátky a konce transformace  $\gamma \rightarrow \alpha$  při různých podmínkách svařování viz obrázek 14. [7]



Obrázek 13- Záznam teplotního cyklu pásma přehřátí s vyznačením začátku a konce přeměny  $\gamma \rightarrow \alpha$  a záznam derivace teploty podle času [8]

Rozložení teplot ve svarovém spoji můžeme také s podstatně menší přesností stanovit pomocí termovize. Měření teplotních cyklů ve svarových spojích je však velmi nákladné. Protože jejich znalost má pro posuzování svařitelnosti kovů a slitin zásadní význam, byla od začátku studia teplotních cyklů při svařování řešena možnost jejich matematického výpočtu.

Znalost teplotních cyklů při svařování umožňuje detailní studium mikrostruktury a mechanických vlastností jednotlivých oblastí TOO svarových spojů, které není možné studovat na reálných svarových spojích s ohledem na malé rozměry TOO a jejich částí. Je to metoda simulování teplotních nebo teplotních a deformačních cyklů pomocí speciálních simulátorů podmínek při svařování. Tato technika zkvalitňuje a usnadňuje studium svařitelnosti kovů a jejich slitin. [7]

## 5 Popis svařování plazmou

Plasmový oblouk je zvláštním zdrojem tepelné energie pro tavné svařování, který má vlastnosti odlišné od běžného. Je to dáno především tím, že vytváří paprsek plasmy nezávisle na svařovacím proudu a tím se stabilizuje oblouk. Pomocí samostatného zdroje se vytvoří úzký paprsek plazmatu, jehož úkolem je zajistit ionizaci plynu a klidné hoření oblouku. Svařovací zdroj má proto dva nezávisle regulovatelné zdroje proudu. Pomocný zdroj je napojen na wolframovou elektrodu (katodu) a měděnou hubici (anodu). Plasma vznikající při hoření pomocného oblouku tryská z otvoru v hubici vlivem přetlaku plasmového plynu. Tento paprsek je dále zužován proudem ochranného plynu. Tím se zvyšuje jeho teplota, rychlost a dynamický tlak na základní materiál. Hlavní zdroj energie je napojen na wolframovou elektrodu, kladný pól na základní materiál. Oblouk prochází paprskem nezávisle vytvořeného plazmatu. [9]

Díky značné výstupní rychlosti plasmového paprsku a jeho malé divergenci se dosahuje dvojího účinku:

- vysoké koncentrace energie v blízkosti osy paprsku a tím i charakteristické tvaru závaru
- klidného a stabilního hoření poměrně dlouhého přeneseného oblouku, srovnáme-li s metodou WIG může být délka oblouku několikanásobně větší a plasmový oblouk proto zasáhne i do míst pro svařování WIG nepřístupných.

### 5.1 Plyny pro svařování mikroplazmou

Plyny pro svařování mikroplazmou rozdělujeme na plasmové a ochranné.

Vnitřní proud plynu kolem wolframové elektrody je nazýván plasmový (pilotní) plyn. Nejčastěji se jedná o argon, který díky své nízké ionizační energii dosáhne vysokého ionizačního stupně. Při svařování CrNi ocelí nebo slitin na bázi niklu je používána směs argonu a vodíku. V důsledku vyšší tepelné entalpie vodíku, a při shodné délce oblouku vyšší energie je možné zvýšit rychlost svařování ve srovnání s použitím čistého argonu. K tomu přispívá ještě lepší tepelná vodivost. Podobný efekt dosáhneme při svařování titanu a zirkonu přimísením helia do plasmového plynu. [9]

Ochranný plyn nesmí negativně ovlivňovat vlastnosti základního materiálu. Volba ochranného plynu se řídí v první řadě podle základního materiálu. Jako vnější ochranný plyn je používán u nelegovaných a nízkolegovaných ocelí stejně jako pro austenitické oceli a slitiny na bázi niklu zpravidla směs argon/vodík. Pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí je možné použít i směs argon-CO<sub>2</sub> nebo argon-O<sub>2</sub>. Pro svařování hliníku je vhodná směs argon-helium. [9]

Pokud používáme fokusující plyn, potom je to směs argon/helium nebo argon/vodík, která je přiváděna separátním okruhem ochranného plynu mezi plasmovým a ochranným plynem, nebo studený argon oddělený nad počátkem oblouku.

Množství plasmového (pilotního) plynu je pro mikroplazmové svařování 0,2 až 1 l/min, pro svařování tenkých plechů podle velikosti proudu 1 až 6 l/min. Množství ochranného plynu je mezi 5 až 10 l/min popř. 15 až 25 l/min. [9]

*Argon s 2 až 7% vodíku se používá pro svařování:*

- nelegované a nízkolegované oceli
- korozivzdorných Cr, CrNi ocelí
- slitin niklu ( Incoloy, Nomonic, Inconel, Nimonic)
- Hasteloy

*Argon se používá pro svařování:*

- automatové oceli
- zlata
- molybdenu
- titanu

*Helium se používá pro svařování:*

- mědi
- bronze
- stříbra
- vanadu
- wolframu

## 5.2 Plazmové svařování

Paprsek plazmatu vytváří v základním materiálu, plechu o tloušťce 0,2 až 0,8 mm, tzv. "Schlüssellocheffekt = efekt klíčové dírky" - svařování průchozím paprskem. Toto profouknutí plasmového paprsku je znakem toho, že bylo dosaženo úplného provaření. Při dalším pokračování paprsku se otvor uzavírá sbíháním roztaveného materiálu. Tato technika může být provedena pouze strojně, protože je potřebná rovnoměrná rychlost svařování a přesné vedení hořáku středem svaru.

Znakem pro svařování průchozím paprskem je kalíškový závar, při kterém poměr mezi šířkou svaru a hloubkou leží mezi svařování WIG a elektronovým paprskem. [9]

Metoda není ovlivňována délkou oblouku a výkyvy hořáku. Umožňuje svařovat vysokými rychlostmi. Kořen svaru je hladký a rovnoměrný.



Obrázek 14-Svařování mikroplazmou [9]



Obrázek 15-Svařování TIG [9]

Druhy plazmového svařování podle:

- Mikroplazmové svařování se svařovacím proudem 0,1 A - 20 A.
- Středněplazmové svařování se svařovacím proudem 20 A - 100 A.
- Svařování klíčovou dírkou (keyhole welding), nad 100 A.

### 5.3 Pracovní oblast při svařování mikroplazmou

V této oblasti jsou používány proudové zdroje pracující v oblasti 0,05 - 50A. Je možné svařovat materiály od tlouštěk folií až po 1 mm. Zvláště v rozsahu proudu pod 1A nabízí usměrněný oblouk rozhodující přednosti proti metodě WIG. I při malých hodnotách proudu hoří stabilně. Vysvětlením je následující: u volně hořícího oblouku dochází k prudkému poklesu charakteristiky oblouku v oblasti nízkých proudů a také ke klesajícímu průběhu charakteristiky proudového zdroje, obě charakteristiky se neprotínají, nelze definovat žádný pracovní bod. Kontraktí se charakteristika oblouku změní do té míry, že se i u nízkých proudů dosáhne pracovního bodu. Při svařování s vysokými proudy se pracovního bodu dosáhne u obou druhů oblouku bez problémů. [9]

Používají se stejnosměrné zdroje s klesající statickou charakteristikou.

### 5.4 Podmínky svařování mikroplazmou [9]

#### 5.4.1 Vliv podmínek svařování

Největší vliv mají jako u všech ostatních metod obloukového svařování především elektrické parametry.

##### 5.4.1.1 Polarita

Jak již bylo uvedeno je minus pól proudového zdroje na wolframové elektrodě a plus pól na vodou chlazené měděné hubici (nepřenesený oblouk) nebo na svarku (přenesený oblouk). Tímto je zajištěna možnost vysoké proudové zatížitelnosti, ale také dlouhá životnost elektrody.

#### 5.4.1.2 Velikost proudu

V zásadě se dá říct, že při plasmovém svařování se s nárůstem proudu zvyšuje průvar. Pokud, ale je při určité velikosti proudu dosaženo společně s tlakem plasmového plynu dostatečného průvaru, pak umožňuje zvýšená velikost proudu odpovídající zvýšení rychlosti svařování.

#### 5.4.1.3 Napětí

Svařovací napětí při plazmovém svařování o 10 až 15V vyšší než při svařování WIG, tzn. v oblasti 28 až 33V. Jelikož je často svařováno s relativně malým odstupem hořáku, nastavuje se napětí samostatně v závislosti na použitém plasmovém plynu (argon, argon/vodík).

#### 5.4.2 Parametry svařování

	tenký plech	tenký plech	folie
tloušťka materiálu [mm]	0,2 – 2,5	0,2 - 0,5	0,01 - 0,2
proud [A]	1 – 50	1 - 20	0,05 - 10

Tabulka 3-Svařování mikroplazmou [9]

Tloušťka plechu	tvar svaru	Proud [A]	plasmový plyn [l/min]	ochranný plyn [l/min]	rychlost svařování [cm/min]
3	I	160	5	20	65
4	I	180	6	20	60
5	I	190	7	20	50
7,5	I	210	7	20	25
10	Y	240	7	20	22

Tabulka 4-Svařování plazmou (materiál CrNi) [9]

#### 5.4.3 Regulace plasmového procesu

Při ručním plasmovém svařování - mikroplazmovém, má svářeč bezprostřední kontrolu nad procesem a může tak sklonem hořáku nebo změnou rychlosti svařování ovlivnit výsledný svar. U mechanizovaného svařování taková možnost není. [9]

#### 5.5 Vady při mikroplazmovém svařování

Při hodnocení možnosti vzniku vady je přirozeně metoda plasmového svařování srovnávána se svařováním WIG. Při tomto srovnání je ihned zřejmé, že nebezpečí wolframových vměstků je při plasmovém svařování výrazně nižší, protože je wolframová elektroda chráněna v plasmové hubici a je zamezeno zapálení oblouku dotykem nebo náhodnému kontaktu elektrody s materiálem. [9]



### 5.5.1 Povrch svarového spoje

Tlak plasmového plynu neovlivňuje pouze provaření, ale i tvorbu povrchu svaru. Příliš velké množství způsobuje proto vedle hlubokého kořene také poškození povrchu svaru. Vysoký tlak plasmy nestlačuje svarový kov pouze dolů, ale i do stran. Odstraní se snížením množství plasmového plynu. [9]

### 5.5.2 Koncový kráter s vadou

Při svařování průchozím paprskem může v koncovém kráteru dojít ke vzniku vadných míst s výskytem lunek nebo pórů, v místě průchozího otvoru. Proto musíme při ukončení svaru snížit svařovací proud a plynule snížit tlak plasmového plynu. U našeho zařízení dochází k tomuto procesu automaticky. [9]

### 5.5.3 Tvorba pórů

Při plasmovém svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí může dojít k silné tvorbě pórů vlivem působení oxidu uhlíku. Kyslík, který se i přes veškerá opatření dostane do tavné lázně, se může spojit s uhlíkem v oceli, což může vést k silné tvorbě plynů. Nepříznivě působí také, když se svařuje bez nebo s malým množstvím přídavného materiálu. Ve svarovém kovu se pak nedostává desoxidáčnických prvků. Z výše uvedených důvodů je jasné, že není možné plasmové svařování nestabilizovaných ocelí bez přídavného materiálu. Ale i u oceli stabilizované hliníkem může dojít k tvorbě pórů. U oceli stabilizované křemíkem by neměl podíl kovového křemíku přesáhnout 0,15%, pro zajištění stabilizovaného svarového kovu bez pórů. Při svařování CrNi ocelí by neměl podíl vodíku, ve směsi argon-vodík - pro zvýšení rychlosti svařování, přesáhnout 5%. [9]

## 5.6 Použití svařování mikroplazmou

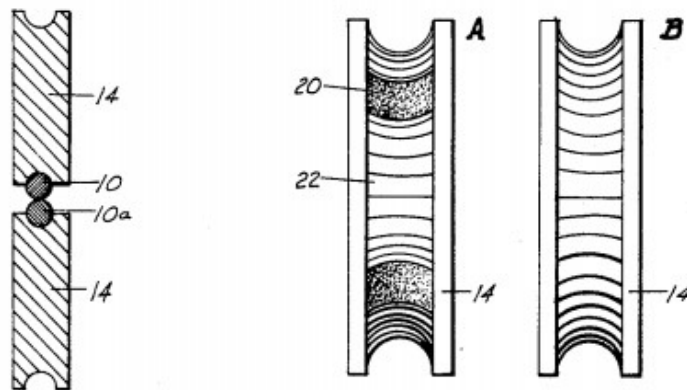
Metoda svařování mikroplazmou je určena pro svařování dílů s vysokými požadavky na jakosti svarových spojů. Svařování je možné bez problémů provádět ručně, ale 70 až 80% prodaných zařízení jsou integrovány s různými typy mechanizace. Toto je založeno na velmi dobré stabilitě oblouku a perfektní volbě volených parametrů.

### 5.6.1 Použití:

- výroba měřicích přístrojů
- membrány manometrů
- termostaty
- ventily a příruby
- vedení elektronových mikroskopů
- uzavřená relé
- odporové prvky
- spirální katetry, injekční jehly, lékařské nástroje
- vlnovce, filtry, oprava forem, oprava litinových odlitků (CrNi)
- svařování roštů pro papírenský průmysl

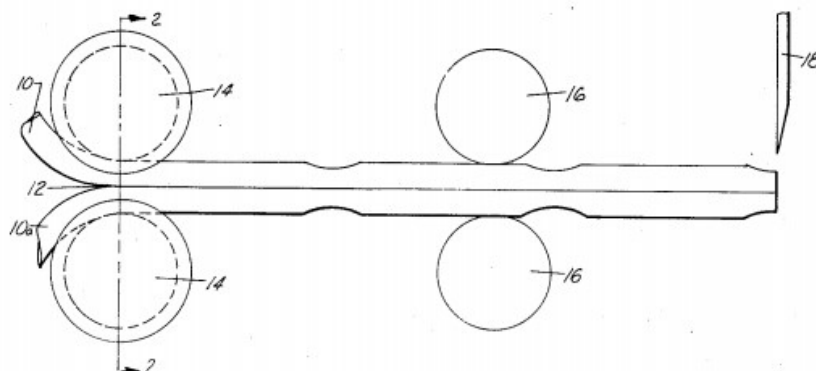
## 5.7 Metody svařování termočlánků

### 5.7.1 Odporové svařování



Obrázek 16-Polohovací kotouč [10]

Na následujícím obrázku 19 je vyobrazeno schéma svařovacího procesu i s následným odstřiháváním jednotlivých termočlánků. Detailněji je celý proces popsán v US patentu č. 05/130266 z data 12.6.1971.



Obrázek 17-Schéma svařovacího procesu [10]

### 5.7.2 Svařování vybíjením kondenzátoru

Ke svařování metodou vybíjení kondenzátoru se využívá například zařízení HotSpot Thermocouple welder. Funguje na podobném principu jako zařízení pro přivařování svorníků, avšak zde nedochází ke spojení natavených drátků se základním materiálem. Zdroj svařovacího proudu obsahuje kondenzátory, které poskytují energii potřebnou k zapálení oblouku a natavení drátků. Oba drátky jsou stočeny a drženy v kleštích, do kterých je přiváděn svařovací proud. Oblouk se zapaluje kontaktem s uzemněnou ocelovou podložkou. Nevýhodou je možná kontaminace svarového spoje od ocelové podložky. [11] [12] [13]



Obrázek 18-HotSpot Thermocouple Welder [13]

Existuje však mnoho dalších typů zařízení pro tento druh svařování jako je například L60 Thermocouple & Fine Wire Welder, kde je uhlíkový hrot připojen k jednomu pólu a kleště k druhému.



Obrázek 19-L60 Thermocouple & Fine Wire Welder [14]

Svařečka L60 thermocouple welder se používá pro všechny typy běžně dostupných termočlánků. Je jednoduchá na použití. Pomocí ní se svařují dráty s průměrem až do 1,1mm pod ochrannou argonovou atmosférou. Napájecí napětí u této svařečky je 250V.

### 5.7.3 Svařování laserem

Zařízení pro svařování laserem vyrábí například firma Sisma v Itálii. Laserový paprsek je možné přesně zaměřit do místa svaru, nastavit výkon i délku svařovacího pulsu. [11] [15]



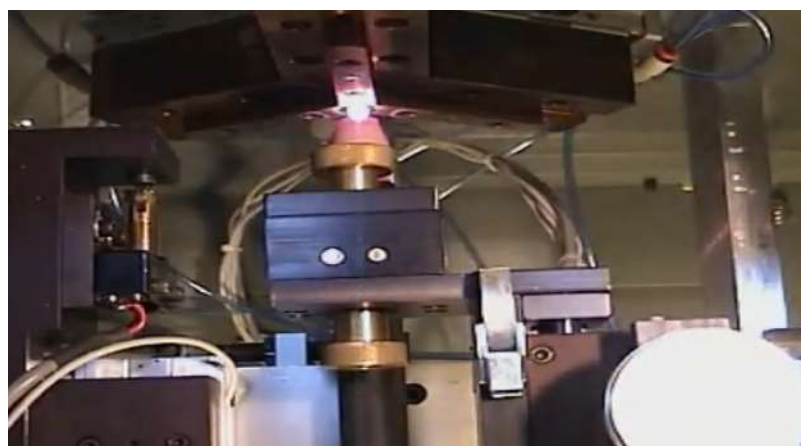
Obrázek 20-Zařízení pro svařování laserem [15]

### 5.7.4 Svařování elektronovým svazkem

Pro svařování velmi tenkých termočlánků se využívá svařování elektronovým svazkem. K natavení materiálu se využívá fokusovaný elektronový svazek s vysokou energií. Hlavní nevýhodou této metody je nutnost použití vakuové komory. Avšak stejně jako u svařování laserem lze přesně nastavovat polohu, výkon i délku pulsu svazku. [11]

### 5.7.5 TIG/Plasma

Zařízení od firmy Process Welding Systems, Inc., které sloužící k výrobě drátkových termočlánků, funguje na principu plasmového svařování. Shora se do přípravku vkládají připravené drátky a odspodu přijíždí plazmový hořák, který oba drátky svaří. Toto zařízení není vhodné ke svařování drátků malého průměru. [11]



Obrázek 21-Plasmové zařízení na výrobu termočlánků [16]

## 6 Požadované termočláanky

Cílem práce bylo najít optimální parametry a dostatečnou opakovatelnost výroby termočláanky typu K o průměru drátů 1mm. Dráty termočláanky typu K jsou z materiálů NiCr a NiAl, známé pod obchodními značkami firmy Concept Alloys, inc jako Chromel® a AlumeI®. Oba dráty jsou tedy vyrobeny ze slitin niklu. Výrobce udává, že chemické složení slitiny Chromel® je přibližně 90% niklu a 10% chromu. AlumeI® je slitina obsahující přibližně 95% niklu, 2% manganu, 2% hliníku a 1% křemíku. Pro přesnější zjištění chemického složení jednotlivých materiálů by bylo vhodné využít spektrální analýzu. Ze spektrální analýzy by pravděpodobně vyplynulo, že zdánlivě stejné materiály nemají zcela stejné chemické složení a to by pak mohlo ovlivnit výsledné termoelektrické napětí měřené termočláankem. Tato skutečnost byla však zanedbána pro její malý význam při běžném měření teplot s přesností na jednotky stupňů celsia. [17] [18]

### 6.1 Svařitelnost slitin niklu

Niklové slitiny mohou obsahovat nečistoty, které velmi nepříznivě ovlivňují svařitelnost slitiny. Jde zejména o prvky, které se obtížně v niklu rozpouštějí jako například síra, uhlík nebo olovo.

Nepříznivý vliv síry je dán zejména malou rozpustností tohoto prvku v tuhém stavu a nízkou teplotou tavení vznikajícího eutektika (644 °C). Vylučování nízkotavitelného eutektika na hranicích zrn je základní příčinou vzniku horkých trhlin. Horké trhliny se mohou vyskytovat jak ve svarovém kovu tak i v tepelně ovlivněné oblasti. Problém horkých trhlin v tepelně ovlivněné oblasti se řeší obvykle technologickou cestou, a to zabezpečením minimální šířky tepelně ovlivněné oblasti.

Nepříznivý vliv uhlíku na svařitelnost niklu a jeho slitin souvisí opět s jeho rozpustností v niklu. Při svařování niklu s obsahem uhlíku nad 0,2 % dojde při rychlém ochlazení svarového kovu k potlačení difúze uhlíku a uhlík zůstává v tuhém přesyceném roztoku. Při provozu svarového spoje při vyšších teplotách (300 – 750 °C) dojde k precipitaci nestabilního uhlíku z přesyceného roztoku ve formě grafitu. Tato strukturní změna může vyvolat ve svarových spojích vznik trhlin za studena. Proto je obsah uhlíku v technickém niklu limitován max. 0,2 %.

Svařitelnost niklových slitin a jejich vhodnost ke svařování je pouze do určité míry ovlivňována legujícími prvky. Většina prvků, zejména Cu a Fe, podstatně neovlivňují svařitelnost slitin a při svařování se chovají přibližně stejně jako technický nikl. [8] [19]

## 7 Vývoj přípravku ke svařování termočlánků

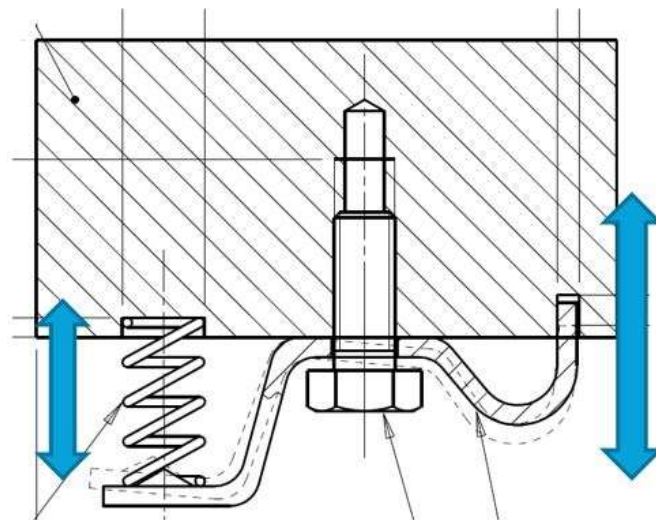
Pro opakovatelné svařování polotovarů termočlánků, v podobě drátků o průměrech od 0,8mm do 1mm, je nutné zajistit stálou a pevnou pozici jednotlivých drátků. K tomuto účelu byl vyvinut svařovací přípravek. K jeho vytvoření bylo vzato do úvahy několik počátečních kritérií:

- ✓ Průměr drátů 0,8-1mm
- ✓ Průměrná velikost hotového svarového spoje
- ✓ Doba svařování
- ✓ Jednoduchost a ekonomičnost přípravku

Ke zvýšení efektivity a tím snížení doby svařování jednoho termočlánku byl stanoven počet pět upnutých polotovarů v přípravku.

### 7.1 První návrh

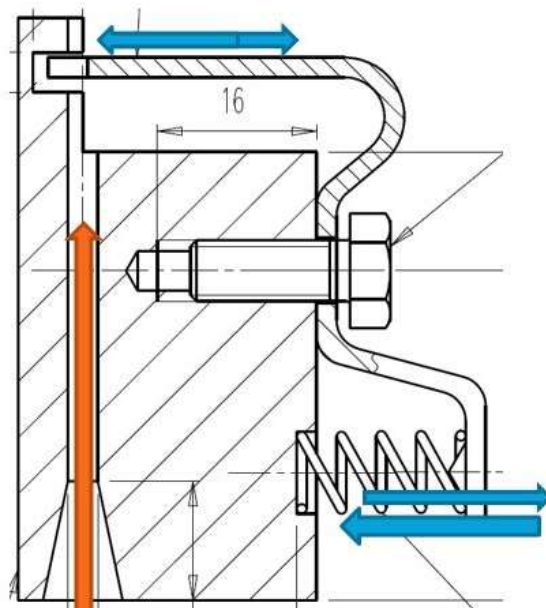
Na základě zadaných požadavků byl vytvořen prvotní návrh, dále jen Alternativa 1. Přípravek Alternativa 1 se skládá z měděného tělesa. Měď byla pro výrobu tělesa vybrána zejména pro její vysokou tepelnou vodivost. Těleso je připevněno k pracovnímu stolu pomocí dvou držáků tvaru písmene L. Při svařování dvou drátů termočlánku je důležité zajistit jejich vzájemnou polohu. To bylo zajištěno umístěním drátků do drážky a přidržení pomocí páky. Páka je ohnutá z plechu tloušťky 2mm a tlačena silou 51,4 N, která je vyvolaná pružinou. Na obrázku 22 je zobrazen princip fungování přípravku, kde modré šipky znázorňují pohyb páky.



Obrázek 22-Nákres přípravku Alternativa 1

## 7.2 Druhý návrh

Po přezkoumání nevýhod Alternativy 1 a to zejména velikosti resp. délky roztečí mezi jednotlivými svary a od toho se odvíjející i vyšší ceny, bylo navrženo druhé řešení Alternativa 2. Druhé řešení vyplývá z principů Alternativy 1. Opět je využito principu páky ohnuté z korozivzdorné oceli o tloušťce 2mm. Páka je umístěna vertikálně a pomocí pružiny zajišťuje polohu termočlátku. Termočlánek je vsunut do tělesa přípravku otvorem o  $\varnothing 3$  mm. Na obrázku 23 je zobrazen princip fungování přípravku, kde modré šipky opět znázorňují pohyb páky a oranžová vsunutí dvou drátů termočlátku.



Obrázek 23-Nákres přípravku Alternativa 2

## 7.3 Stanovení rozměru drážky přípravku

Pro stanovení správné hloubky a šířky drážky pro vedení drátů termočlátku v tělese přípravku bylo nutné vzít v úvahu šířku svaru, tzn. maximální rozměr „svarové kuličky“. Bylo změřeno 18 již svařených (kopených) termočláneků a jejich rozměry vyhodnoceny.





Obrázek 24-Detail měřených termočlánků

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>X<sub>i</sub> [mm]</i>	<b>1,57</b>	<b>1,58</b>	<b>1,63</b>	<b>1,63</b>	<b>1,69</b>	<b>1,71</b>	<b>1,71</b>	<b>1,76</b>	<b>1,81</b>
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	<b>1,82</b>	<b>1,82</b>	<b>1,85</b>	<b>1,91</b>	<b>1,93</b>	<b>1,96</b>	<b>2,06</b>	<b>2,23</b>	<b>2,27</b>

Tabulka 5-Naměřené hodnoty svarových spojů

Pomocí Grubbsova testu, který se používá pro objektivní vylučování extrémních hodnot na základě vypočteného testovacího kritéria u souborů dat, které odpovídají Gaussovu normálnímu rozdělení sledované náhodné veličiny, byla eliminována přítomnost hrubých chyb měření svarů.

1) Seřazení hodnot výběrového souboru do vzestupné variační řady.

2) Vypočet aritmetického průměru

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 1,83 \text{ [mm]}$$

3) Vypočet směrodatné odchylky ze všech hodnot souboru.

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = 0,2035 \text{ [mm]}$$

4) Vypočet testovacích kritérií pro první a poslední n-tou hodnotu variační řady.

$$\text{Pro } \alpha = 0,01 \rightarrow T_{krit} = 2,903 \text{ [mm]}$$

$$T_{min} = \frac{\bar{X} - X_{min}}{S_x} = 1,277 \text{ [mm]}$$

$$T_{max} = \frac{X_{max} - \bar{X}}{S_x} = 2,162 \text{ [mm]}$$

5) Porovnání s tabulkovou kritickou hodnotou pro příslušné n výběrového souboru.

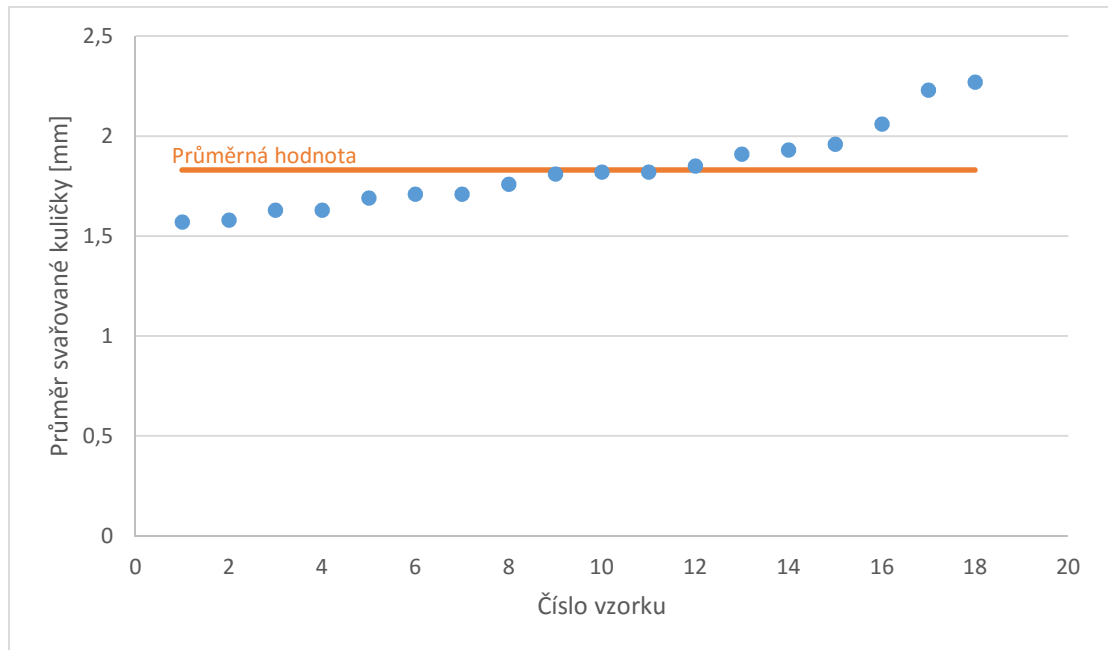
$$T_{min} < T_{krit} \wedge T_{max} \leq T_{krit}$$

$$1,277 < 2,903 \wedge 2,162 \leq 2,903$$

!!SPLNĚNO!!



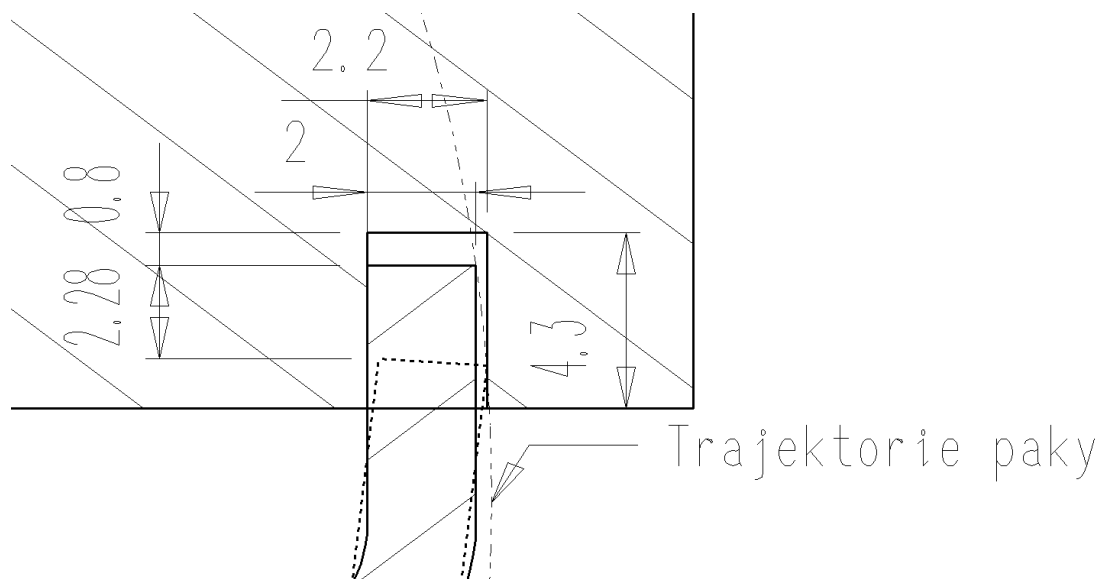
Grubbsův test ověřil, že při měření maximálního rozměru svaru nedošlo k hrubé chybě měření, a že naměřené hodnoty jsou objektivně relevantní.



Graf 2-Průměry jednotlivých svařových kuliček

Dále byla vypočtena pravděpodobnost, že svarový spoj bude mít maximální rozměr menší jak 2mm, pomocí Microsoft Excel funkce  $NORM.DIST(2; \bar{X}; S_x; 1)$ . Pravděpodobnost, že svarový spoj bude menší jak 2mm je přibližně 79,8%. Pro pokrytí zbylých 20,2% případů je při konstrukci přípravku volena vůle v drážce.

Na základě vypočítané pravděpodobnosti a průměrné hodnotě šířky svarového spoje byla stanovena konečná šířka drážky přípravku.



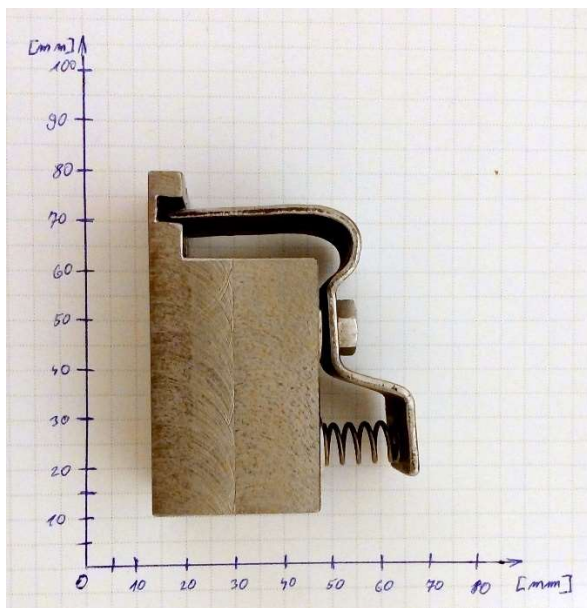
Obrázek 25-Detail drážky přípravku Alternativy 1

Konečná šířka drážky byla vypočtena vztahem:

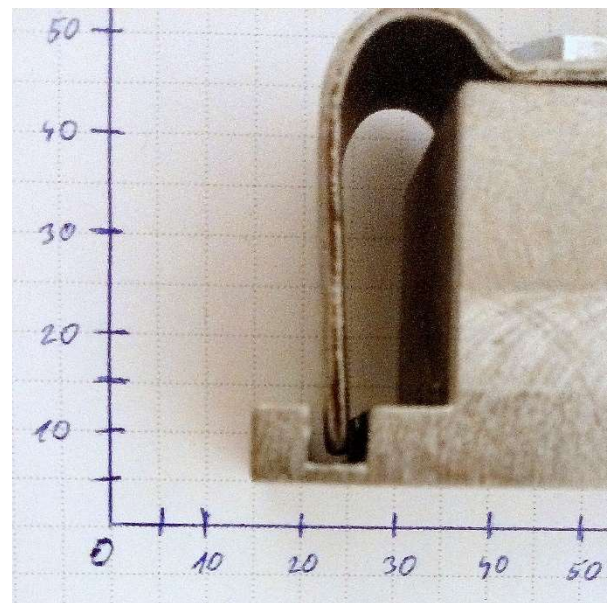
$$\bar{X} < 2,2[\text{mm}]$$

Okrajová podmínka 2,2mm byla stanovena graficky metodou podobnosti trojúhelníků aplikovanou na trajektorii vysunutí páky. Z toho plyne, že konečná šířka drážky je 2,2 mm.

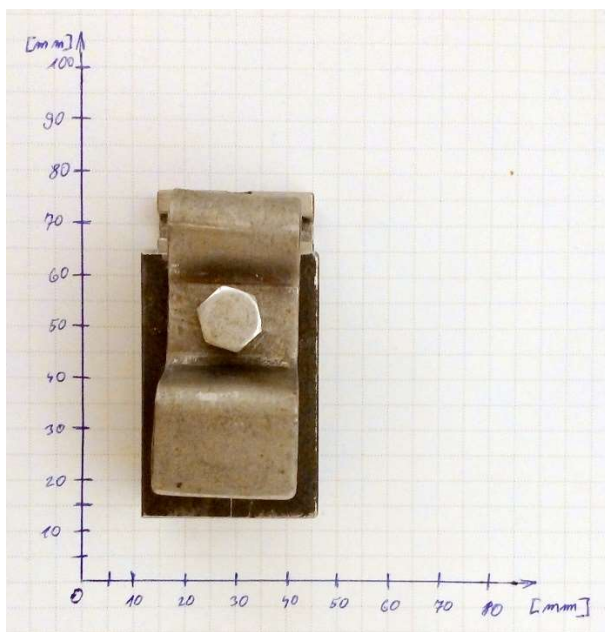
Podle návrhu Alternativy 2 byl vyroben prototyp přípravku. Tento prototyp sloužil zejména k ověření funkčnosti páky a ověření zda vybraná pružina vyvíjí dostatečnou přitlačnou sílu, potřebnou k udržení dvou drátů při svařování.



Obrázek 26-Boční pohled prototypu



Obrázek 28-Detail drážky

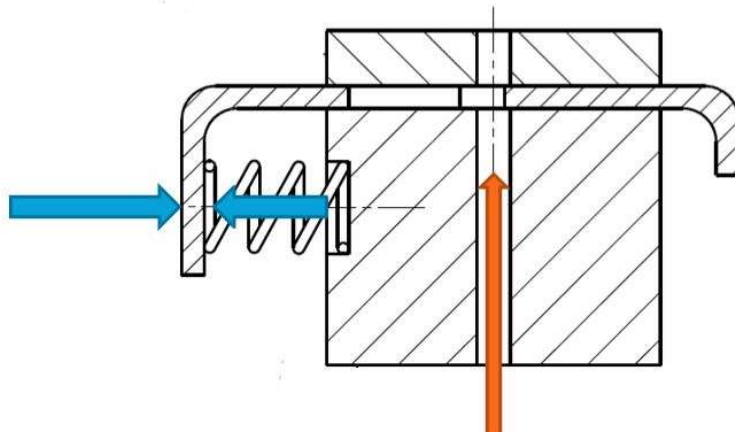


Obrázek 27-Přední pohled prototypu



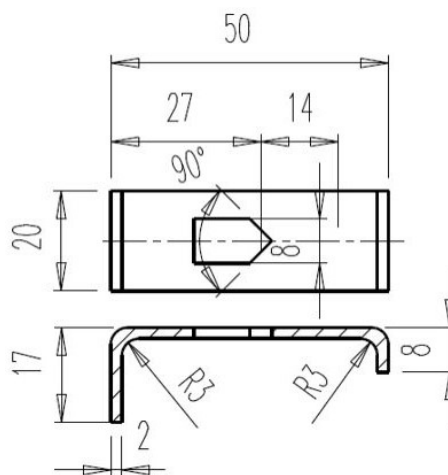
Obrázek 29-Pohled shora

Výrobou přípravku byla ověřena funkčnost a vyrobitelnost přípravku. Také se potvrdila správnost volby tuhosti pružiny, která vyvíjí dostatečně velkou sílu k udržení polohy obou drátů termočlánu v přípravku. Z vyrobeného prototypu vyplynulo i několik závad. Pro výrobu bylo potřeba zbytečně moc materiálu a zbytečně složitě byla navržena také páka držící svařovaný termočlánek. Těleso prototypu bylo vyrobeno z běžné konstrukční oceli, avšak těleso přípravku bylo navrženo z mědi. Takové řešení by při stejném využití materiálu bylo velmi nákladné. Tedy z důvodů ekonomičnosti a jednoduchosti konstrukce byla Alternativa 2 zavrhnuta a na základě zjištěných poznatků byla vyvinuta Alternativa 3.



Obrázek 30-Princip funkce přípravku Alternativa 3

Na obrázku 30 je ukázán princip fungování třetího návrhu přípravku. Přípravek se skládá z ocelového tělesa, měděného víka, pěti pružin a pěti tlačítek. V tělese jsou vyfrézované drážky pro vedení tlačítek a svisle vyvrtaná díra pro vedení drátů termočlánu. Dráty jsou v tělese drženy tlačítkem, ve kterém je vyrobená drážka šipkovitého tvaru, viz obrázek 31.



Obrázek 31-Nákres tlačítka

Celou sestavu přidržuje přišroubované měděné víko s otvory pro dráty termočlánu.

Tato Alternativa 3 byla zvolena jako konečná verze pro tvorbu přípravku. Konečný přípravek se od Alternativy 3 liší zejména tělesem, které nemá tvar hranolu, ale je vyrobeno pouze z L profilu, a tlačítkem, ve kterém není vyrobena složitá drážka tvaru šipky, ale je v tlačítku pouze vyvrtaná díra o průměru 6 mm.



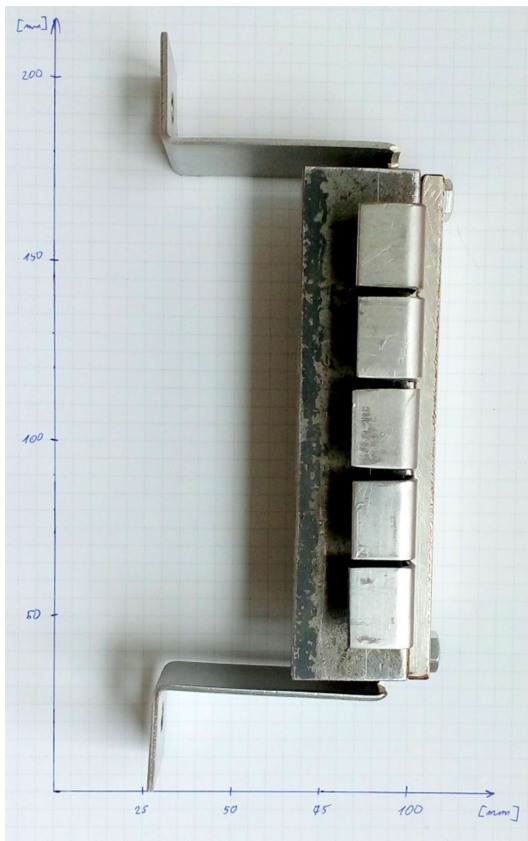
Obrázek 32-Model přípravku



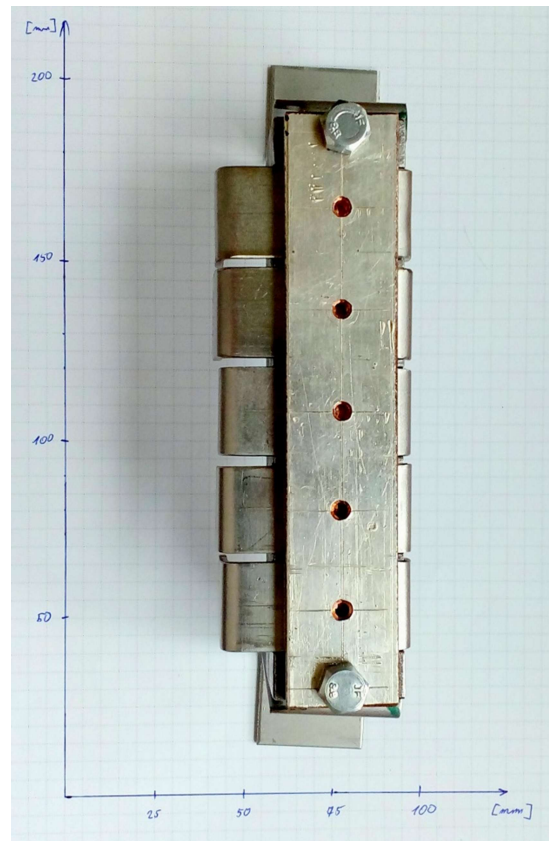
Obrázek 33-Model přípravku zezadu

Na obrázcích 32 a 33 je model konečné verze přípravku, který vyplývá z návrhu Alternativy 3. Finální výrobu celého přípravku pro svařování termočlánků předcházela ještě výroba druhého prototypu. Druhý prototyp se skládal pouze z tělesa pro jeden termočlánek, jednoho tlačítka a pružiny. Druhý prototyp, stejně jako první, sloužil k ověření funkčnosti a vyrobitelnosti. Všechny požadavky na funkčnost, vyrobitelnost i ekonomiku konstrukce byly splněny. Na základě 3D modelu, výrobních výkresů a poznatků z druhého prototypu byl vyroben přípravek na svařování termočlánků mikroplazmou.





Obrázek 34-Přípravek pohled z boku



Obrázek 35-Přípravek pohled shora

## 8 Zařízení pro svařování termočlánků

Celkové zařízení je umístěno v mezifakultní laboratoři svářečských technologií ústavu strojírenské technologie fakulty strojní ČVUT v Praze. Zařízení se skládá z následujících komponent.

### 8.1 Svařovací zdroj Microplasma 50

Microplasma 50 je invertorový stejnosměrný svařovací zdroj, který je chlazený vodou přes externí chladicí modul.

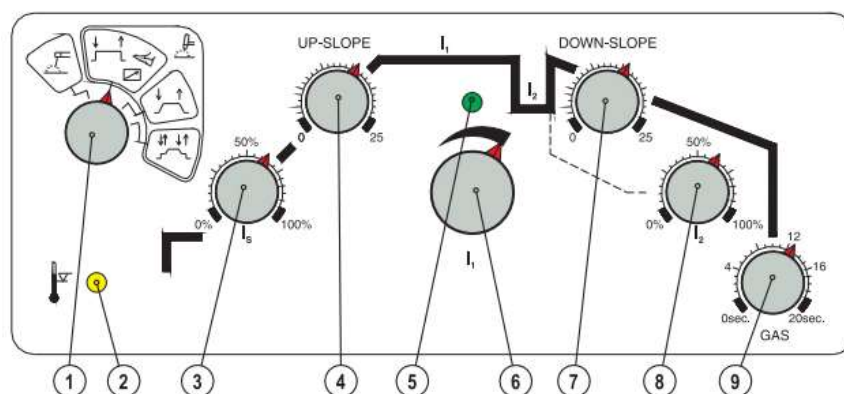


Obrázek 36-Svařovací zdroj Microplasma 50

<b>Rozsah nastavení svařovacího proudu</b>	0,1 A - 50 A
<b>Proud pomocného oblouku</b>	1 A - 10 A
<b>Napětí naprázdno</b>	95 V
<b>Síťová frekvence</b>	50 Hz / 60 Hz
<b>Síťová pojistka (pomalá)</b>	1 x 16 A
<b>Síťové napětí (tolerance)</b>	1 x 230 V (-40 % - +15 %)
<b>Max. přípojovací výkon</b>	1,6 kVA
<b>cos <math>\phi</math></b>	0,99
<b>Stupeň účinnosti</b>	86 %
<b>Rozměry přístroje DxŠxV v mm</b>	520 x 550 x 480
<b>Krytí</b>	IP 23
<b>Třída izolace</b>	H

Tabulka 6-Technické údaje Microplasma 50 [20]

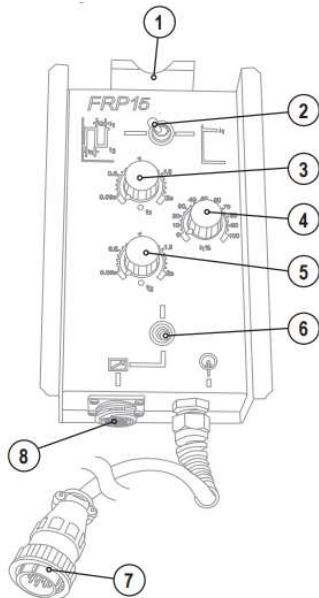
Svařovací parametry se nastavují na ovládacím panelu zdroje, který je na obrázku 37. Svařovací zdroj umožňuje několik způsobů ovládání, ruční nebo nožní ovládání a ovládání přímo na zdroji. Pro experimentální svařování v laboratoři bylo využito nožního ovladače.



Obrázek 37-Ovládací panel zdroje [21]

- |   |   |
|---|---|
| 1. ruční/2taktní/2taktní s náběhem a doběhem proudu/4taktní s náběhem a doběhem | 5. Kontrolka tlačítka hořáku              |
| 2. Kontrolka přehřívání svařovacího hořáku                                      | 6. Nastavení svařovacího proudu           |
| 3. Spouštěcí proud [%] z hlavního proudu  | 7. Ovladač doby doběhu                    |
| 4. Ovladač doby náběhu proudu   | 8. Ovladač sníženého proudu               |
|   | 9. Ovladač doby zbytkového proudění plynu |

Zařízení bylo ještě doplněno o externí ovladač FRP 15, který umožňuje využít časovaného pulzování proudu. To bylo výhodné využít pro zadaný experiment z důvodu svařování pěti termočlánků při konstantním příčném posuvu plazmového hořáku. Na hlavním panelu tedy panelu na svařovacím zdroji byl nastaven hlavní svařovací proud a snížený proud. Snížený proud byl nastaven na hodnotu 0%, aby bylo dosaženo pauzy ve svařování mezi jednotlivými termočlánky.



Obrázek 38-Schéma ovladače FRP15 [22]

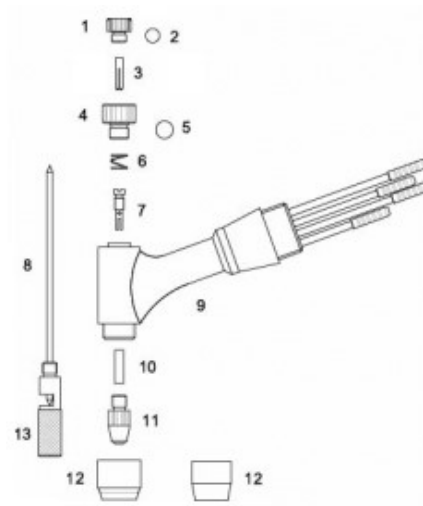


Obrázek 39-Foto FRP15

- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| 1. Držák                                  | 5. Časovač doby trvání pauzy        |
| 2. Přepínač pulzace                       | 6. Přepínač operace jiného ovladače |
| 3. Časovač doby trvání pulzu              | 7. 14ti pólový konektor             |
| 4. Ovladač redukce svařovacího proudu v % | 8. 14ti pólová zásuvka              |

## 8.2 Mikroplazmový hořák

K mikroplazmovému svařování se využívají hořáky s kombinovaným zapojením. Strojní a ruční hořák se konstrukčně liší pouze ergonomií uchopení. Strojní hořáky jsou více přizpůsobeny pro upínání do manipulátorů. Strojní hořáky nemají přímo na těle žádné ovládací prvky a jsou kombinovány s nožním ovladačem. Tento způsob ovládání svařování zvyšuje přesnost nastavovaného svařovacího proudu. Pro experimentální zařízení v laboratoři byl využit strojní mikroplazmový hořák PJB50, který je popsán na obrázku 40.



Obrázek 40-Složení mikroplazmového hořáku PJB50 [23]

- |                              |                                 |
|------------------------------|---------------------------------|
| 1. Upínací čepička elektrody | 8. Elektroda                    |
| 2. O kroužek                 | 9. Tělo hořáku                  |
| 3. Kleština                  | 10. Středící keramická trubička |
| 4. Kleštinové pouzdro        | 11. Tryska                      |
| 5. O kroužek                 | 12. Ochranná keramická hubice   |
| 6. Pružina                   | 13. Nastavovací přípravek       |
| 7. Vedení elektrody          |                                 |

### 8.3 Chladicí zařízení UK 500

Pro vodní chlazení svařovacího hořáku v laboratoři je využito vzduchem chlazeného chladicího zařízení od firmy EWM-Group UK 500. Chladicí přístroj je vybaven výměníkem tepla, jehož chladicí výkon je přímo závislý na okolní teplotě. To znamená, že čím je nižší okolní teplota, tím je nižší teplota přiváděného vzduchu do výměníku a tím je vyšší chladicí výkon přístroje. Tlak chladicího prostředku je kontrolován tlakovým spínačem. Nedostatek chladicího prostředku je signalizován kontrolkou na přední straně chladicího přístroje. [24]



Obrázek 41-Chladicí zařízení UK500



#### 8.4 Weldycar carriage

Weldycar carriage je přenosný samostatný čtyř-kolový svařovací traktor, určený pro mechanizaci svařování metodou MIG/MAG. Avšak pro experiment byl upnut mikroplazmový hořák PJB50. Svařovací traktor je vhodný pro využití při svařování vnějších i vnitřních dlouhých podélných svarů. Traktor je napájený 14V baterií nebo napájecím kabelem do sítě 230V. [25]



Obrázek 42-Svařovací traktor Weldycar [25]



Obrázek 43-Ovládání Weldycar [25]

Na obrázku 43 je zobrazen ovladač svařovacího traktoru, kde:

- A. Ovladač rychlost
- B. Ovladač směru pojezdu
- C. Vypínač

#### 8.5 Upnutí přípravku

Vyrobený přípravek je upnut na pevné ocelové desce s drážkami tvaru písmene T pomocí dvou šroubů s šestihrannou hlavou a matic. Přípravek je orientován rovnoběžně s dráhou svářecího traktoru Weldycar a tlačítkem od obsluhy pro pohodlnější manipulaci s přípravkem. Pod podložku matice jednoho z upínacích šroubů je zaveden zemnicí kabel. Výsledné uspořádání tedy zahrnuje dvě tlakové lahve s argonem, svařovací zdroj Microplasma 50 s nožním spouštěním, mikroplazmový hořák PJB50, chladicí zařízení UK500, ovladač pulzů FRP15, svařovací traktor Weldycar, upínací desku a přípravek pro upínání termočlánků. Toto uspořádání je zobrazeno na obrázku 44.



Obrázek 44-Výsledné uspořádání experimentu

## 9 Výroba a vyhodnocení vzorků

Základním úkolem bylo stanovit vhodné parametry pro svařování drátů o průměru 1mm. Parametry byly stanovovány postupně zkušebním svařováním tak, aby výsledný svar (svarová kulička) byla tvarově co nejmenší, ale stále kvalitně svařena.

### 9.1 Postup přípravy svařování

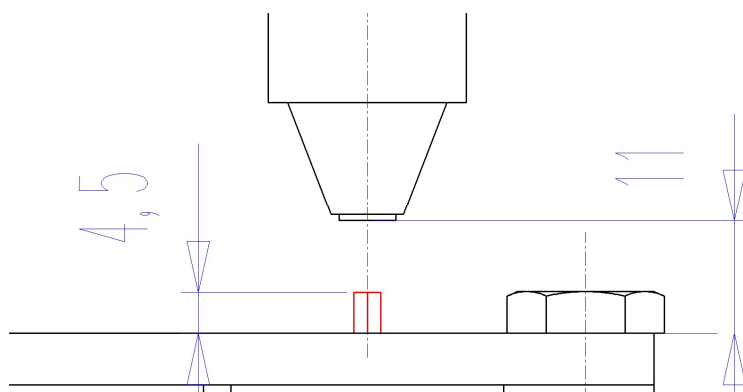
Vlastní postup svařování nejdříve musí předcházet příprava vzorků a upnutí do přípravku. Bylo zjištěno, že je velice důležité, aby byly oba dráty stejně dlouhé a při upnutí v přípravku se dotýkaly. To znamená, že je nutné konce drátů zastříhnout a popřípadě narovnat. Značný vliv na správné spojení obou drátů mají také mastnoty a nečistoty. Proto byly konce drátů očištěny acetonem těsně před vlastním svařováním. Jednotlivé vzorky byly svařeny z polotovarů přibližně 50cm dlouhých drátů navlečených v bužírce a na jednom konci opatřených konektorem. Polotovar byl určen pro výrobu termočlánků typu K.



Obrázek 45-Vzorek termočlánku [26]

## 9.2 Stanovení svařovacích parametrů

Postup práce s přípravkem se sestával ze založení drátů zespoda skrz upínací otvor při stisknutém tlačítku. Uvolněním tlačítka pak došlo k upnutí drátů v přípravku. Dráty byly upnuty s výletem přibližně 4,5 mm. Pro jednodušší a rychlejší upínání se jedná o hodnotu přibližně stejně velkou jako je hodnota výšky hlavy šroubu umístěného na okraji přípravku. Mikroplazmový hořák byl napolohován do osy svařování a do výšky 11 mm.



Obrázek 46-Schéma upnutí drátů

Po zapnutí svařovacího zdroje byly nastaveny počáteční svařovací parametry. Výsledný svar ovlivňuje několik hlavních svařovacích parametrů: svařovací proud  $I_1$ , doba trvání impulzu  $t_1$  a průtok plazmového plynu  $m$ . Vlastní svařování bylo spuštěno nožním spínačem, kdy se spustil předfuk argonové ochranné atmosféry, pak následoval vlastní svařovací impulz a dofuk ochranné atmosféry.

Z tabulky 7 vyplývá, že všechny tři hlavní svařovací parametry mají vliv na konečný tvar a velikost svarové kuličky. Průtok plazmového plynu ovlivňuje zejména tvar, kdy svařovací proud a čas impulzu mají vliv na velikost svaru. V řádku A tabulky 7 nedošlo ke svaření drátů termočlánku. To bylo zapříčiněno nízkým svařovacím proudem v kombinaci s malým průtokem plazmového plynu. V řádcích F a G je patrné, že pro zaručené svaření je výhodné stanovit si dva svařovací parametry jako pevné a jeden jako proměnný.

	$I_1$ [A]	$t_1$ [s]	$\dot{m}$ [l/min]	$I_2$ [A]	Výsledek	Max. rozměr svaru [mm]
<b>A</b>	2,8	0,7	0,3	0		-
<b>B</b>	4,2	0,7	0,4	0		2,13
<b>C</b>	3,15	0,4	0,3	0		1,47
<b>D</b>	3,15	0,5	0,3	0		1,67
<b>E</b>	3,15	0,7	0,4	0		1,82
<b>F</b>	4,5	0,5	0,3	0		1,73
<b>G</b>	3,15	0,5	0,3	0		1,58

Tabulka 7-Odlazení svařovacích parametrů

### 9.3 Výroba zkušebních vzorků


Z odlazovacího experimentálního procesu byly stanoveny svařovací podmínky pro svaření zkušebních vzorků, viz tabulka 8. Svařovací proud byl určen jako proměnná a doba svařovacího impulzu a průtok plazmového plynu byly nastaveny jako pevné hodnoty. Stejného výsledku by bylo možné dosáhnout i určením doby impulzu jako proměnné, avšak to prodlužuje dobu svařování a může ovlivňovat kvalitu svaru.

$I_1$ [A]	$t_1$ [s]	$\dot{m}$ [l/min]
1,8 - 9	0,5	0,4

Tabulka 8-Svařovací parametry


Svařeny byly čtyři skupiny vzorků po 3-4 kusech. Pro každou skupinu vzorků byl nastaven jiný svařovací proud. To mělo za následek různě veliké svary. Tento jev byl požadován pro zjištění vlivu velikosti svaru na měření teploty termočlánkem. Tento vliv byl ověřen při kontrolním měření.

Skupina 1		
$I_1 = 4,5$ A	$t_1 = 0,5$ s	$\dot{m} = 0,4$ l/min
č. vzorku	Max. rozměr	
1	1,62	
2	1,86	
3	1,84	




Tabulka 9-1. skupina vzorků

Skupina 2		
$I_1 = 3,15$ A	$t_1 = 0,5$ s	$\dot{m} = 0,4$ l/min
č. vzorku	Max. rozměr	
1	1,59	
2	1,67	
3	1,58	
4	1,56	



Tabulka 10-2. skupina vzorků

Skupina 3		
$I_1 = 1,8$ A	$t_1 = 0,5$ s	$\dot{m} = 0,4$ l/min
č. vzorku	Max. rozměr	
1	1,63	
2	1,52	
3	1,59	

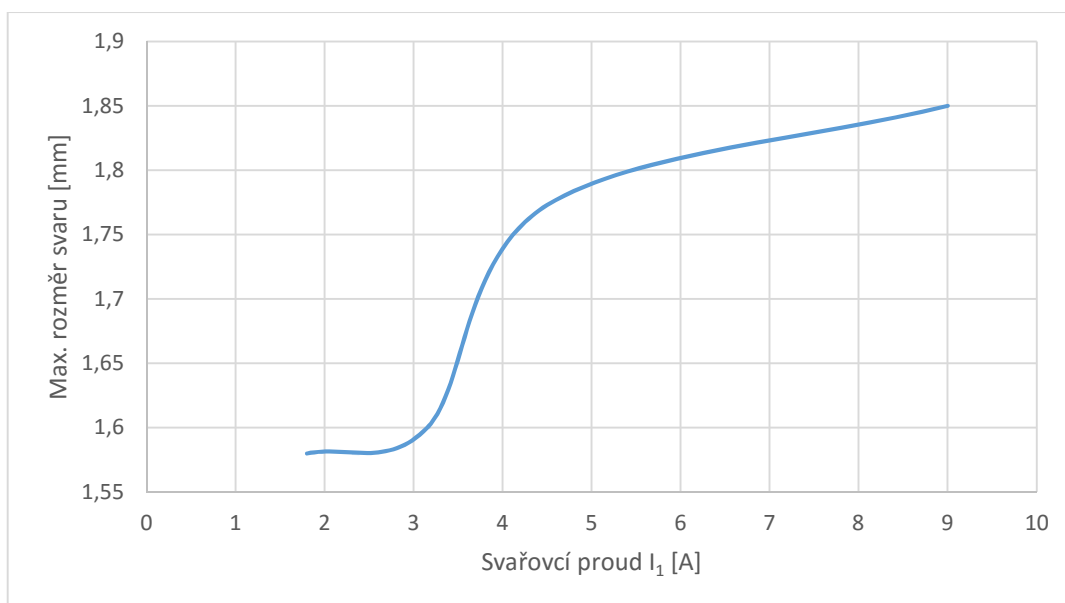


Tabulka 11-3. skupina vzorků

Skupina 4		
$I_1 = 9 \text{ A}$	$t_1 = 0,5 \text{ s}$	$\dot{m} = 0,4 \text{ l/min}$
č. vzorku	Max. rozměr	
1	1,70	
2	1,92	
3	1,93	



Tabulka 12-4. skupina vzorků



Graf 3-Průběh velikosti svaru

V grafu 3 je popsán aproximovaný vývoj velikosti svarové kuličky v závislosti na velikosti svařovacího proudu.

## 10 Kontrolní měření

Hlavním úkolem kontrolního měření bylo provést kalibraci svařených termočlánků a ověřit vliv velikosti svarového spoje na výslednou naměřenou teplotu a vliv na rychlost měření teploty, tedy na dobu odezvy. Kontrolní měření bylo provedeno v kooperaci s Ing. Michalem Brejchou, Ph.D. z Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze. Kontrolní měření bylo rozděleno na měření teploty při ustáleném stavu, tedy kalibraci, a na měření přechodových jevů, tedy měření doby odezvy.

## 10.1 Kalibrace termočlánků

Kalibrace vyrobených termočlánků byla provedena porovnáním naměřených teplot termočlánků vyrobených s naměřenými teplotami termočlánkem referenčním. Referenční termočlánek byl nakoupen od firmy Lab Facility. Měření bylo uskutečněno v laboratoři Fakulty elektrotechnické.

K měření byl vyroben vyhřívaný přípravek pro vytváření měřených teplot. Do přípravku byly upnuty tři vyrobené termočlánky, každý z jiné skupiny, a jeden referenční. Termočlánky byly připojeny přes převodník KIC Explorer do počítače. Teploty byly měřeny v rozsahu od cca 23°C do 550°C.



Obrázek 47-KIC Explorer [27]

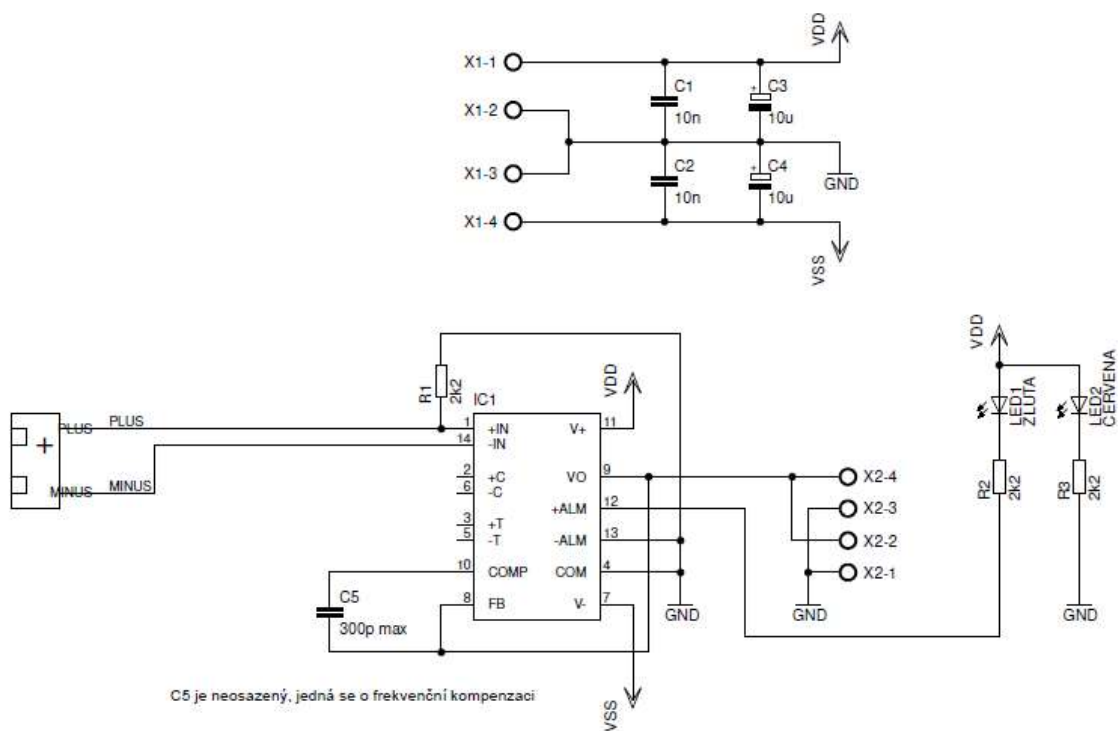
### 10.1.1.1 Postup měření:

- 1) Nastavení parametrů zdroje – proud, napětí
- 2) Ohřívání přípravku 23°C – 550°C
- 3) Odečítání hodnot
- 4) Zaznamenávání hodnot do PC
- 5) Vyhodnocení

### 10.1.1.2 Použité komponenty:

- 1) Laboratorní zdroj Statron
- 2) Vyhřívaný přípravek
- 3) 1x referenční a 3 vyrobené termočlánky
- 4) PC
  - a. Program v PC – KIC 2000
  - b. Převodníková karta KIC Explorer
  - c. Grafické zpracování v programu MS Excel



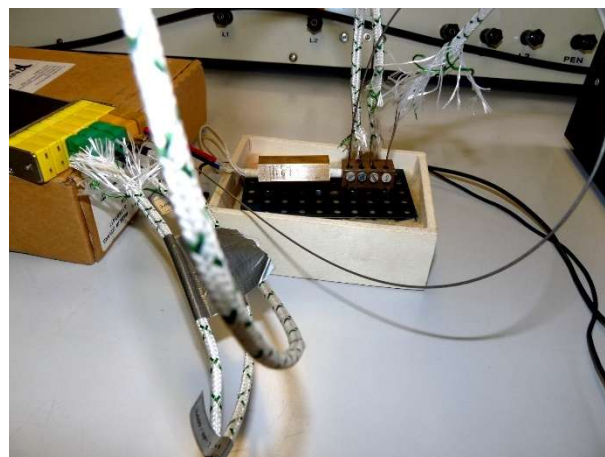


Obrázek 48-EI. schéma přípravku kontrolního měření [Ing. Brejcha Ph.D.]

Z kalibračního měření vyplynulo, že výsledná odchylka naměřených hodnot vyrobených termočlánků se od referenčních hodnot liší zanedbatelně. Při porovnání naměřených hodnot mezi jednotlivými skupinami vyplývá, že velikost nebo tvar svarového spoje nemá vliv na měření teploty v ustáleném stavu.



Obrázek 49-Kalibrace termočlánků [Ing. Brejcha Ph.D.]



Obrázek 50-Vyhřívavý přípravek [Ing. Brejcha Ph.D.]

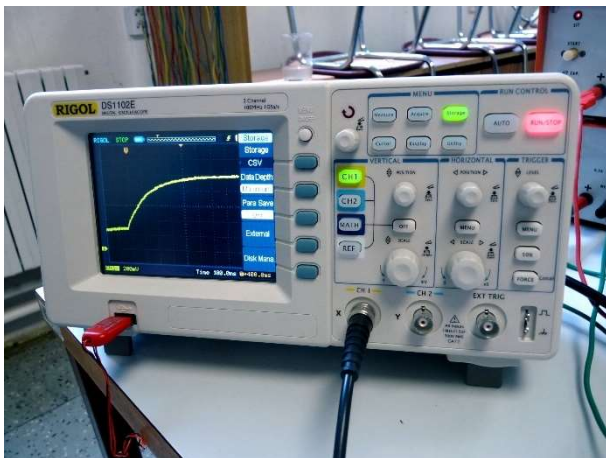


## 10.2 Měření přechodových jevů

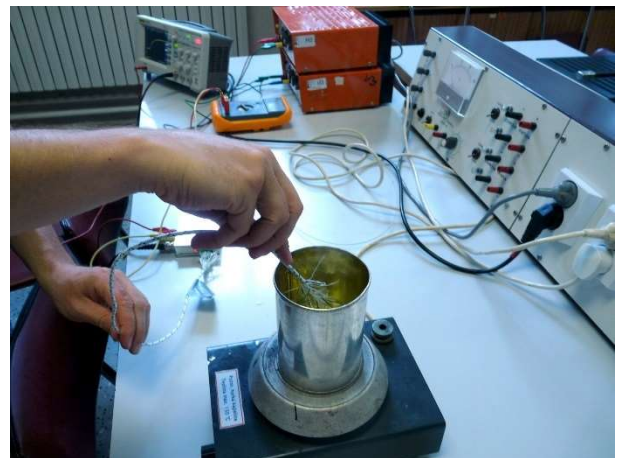
Při měření přechodových jevů bylo cílem zjistit vliv velikosti svarového spoje na časovou konstantu  $\tau$ , tedy na dobu odezvy termočlánu.

Na zkoumaný termočlánek byl připojen osciloskop, který zaznamenal měření. Z osciloskopu byl záznam o měření stažen do programu v počítači. Výsledky z měření byly převedeny do programu MS Excel a zde následně zpracovány a vyhodnoceny.

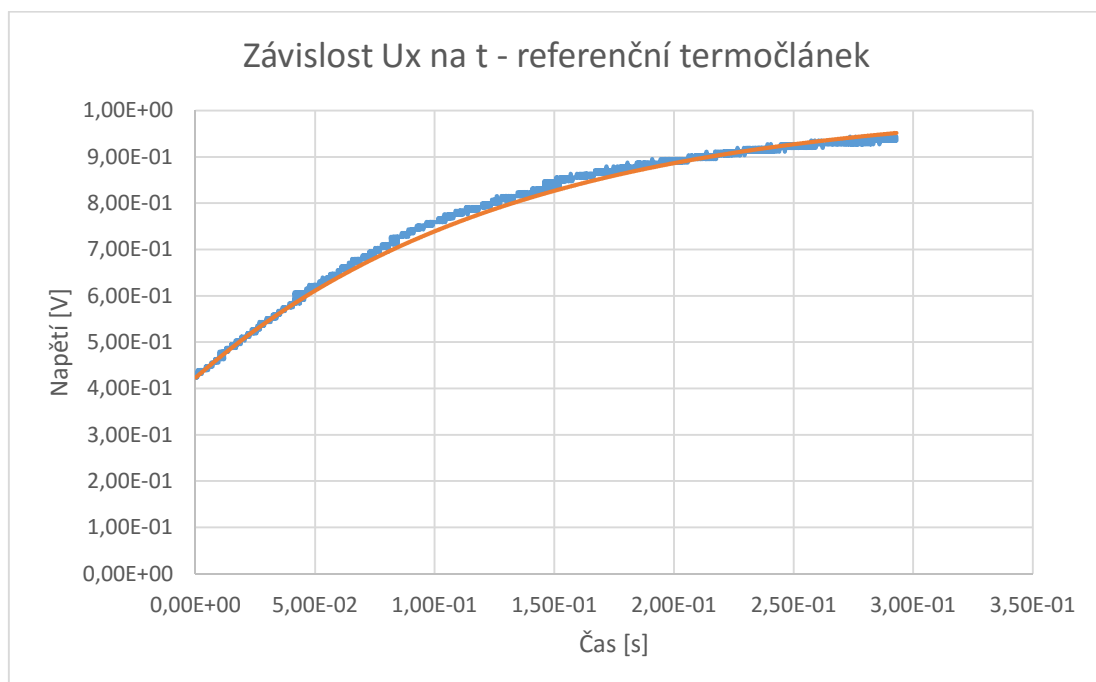
Měření bylo uskutečněno rychlým vkládáním termočlánu z teploty okolí do nádoby s vodou o teplotě 100°C. K udržení teploty 100°C byla kádinka udržována ve stálém varu.



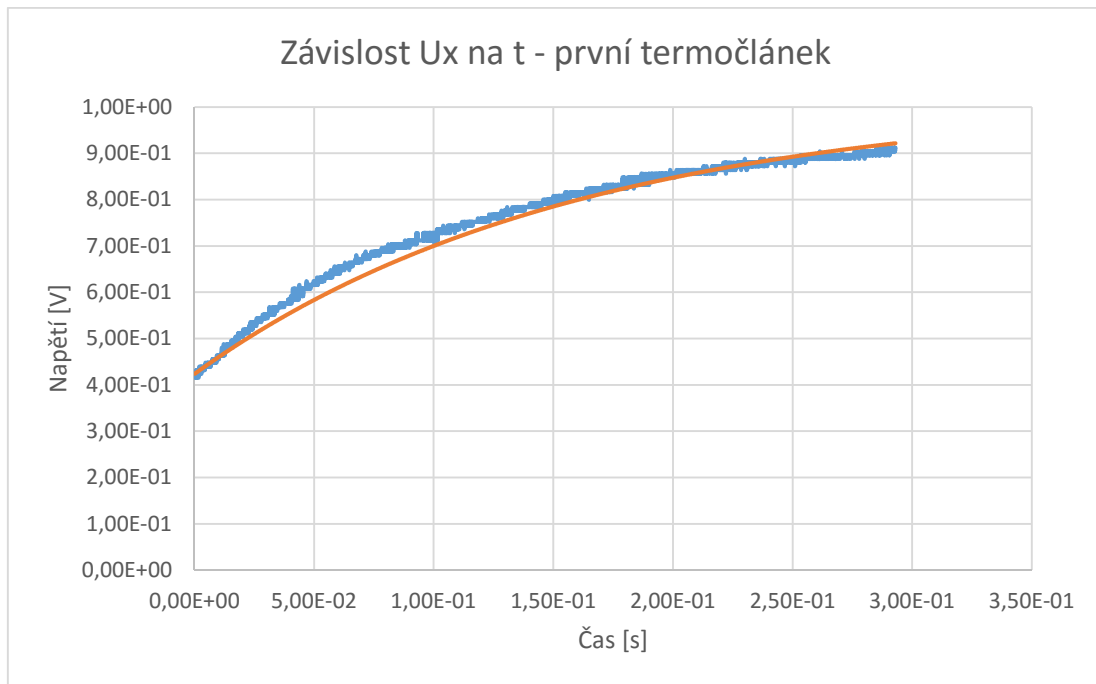
Obrázek 51-Záznam osciloskopem [Ing. Brejcha Ph.D.]



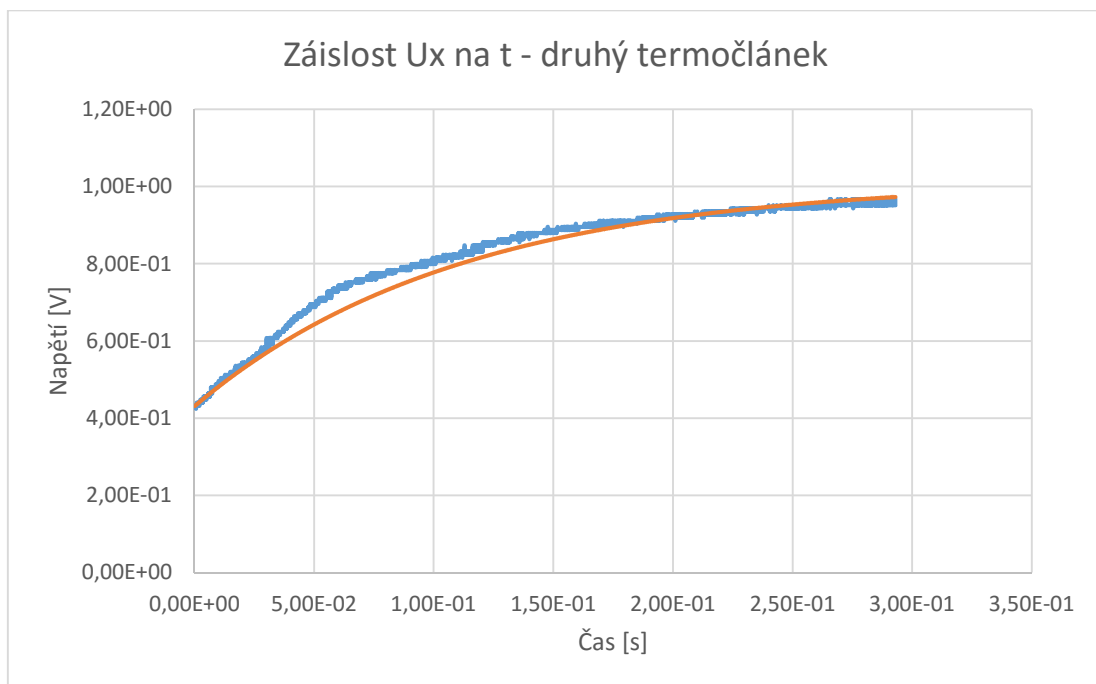
Obrázek 52-Měření doby odezvy [Ing. Brejcha Ph.D.]



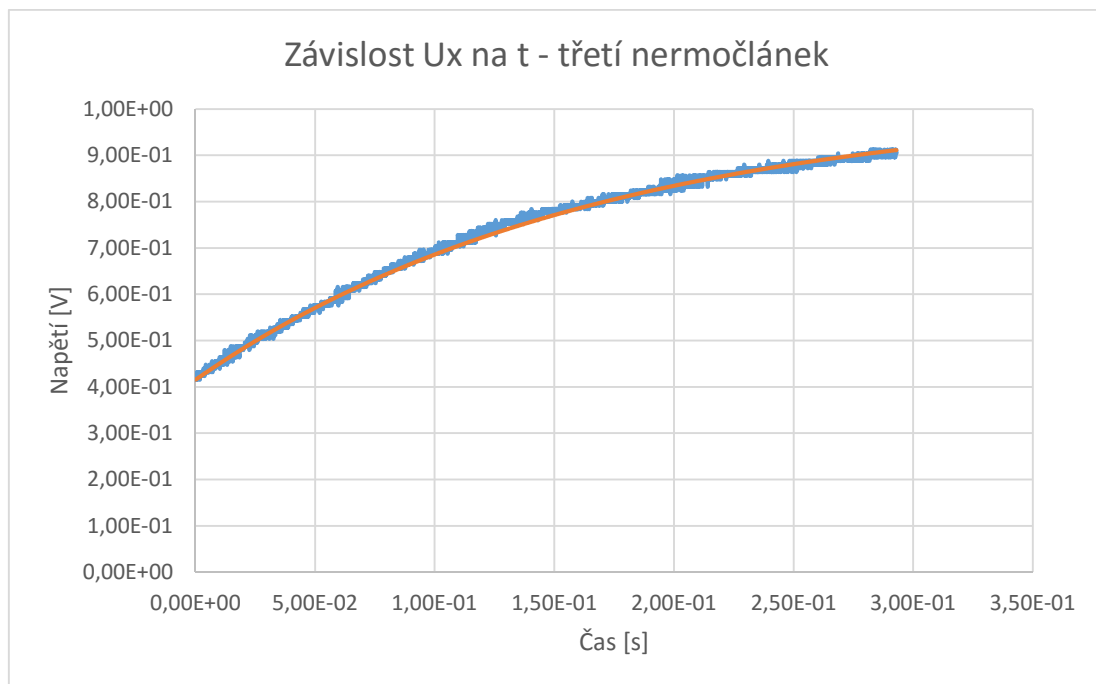
Graf 4-Referenční termočlánek [Ing. Brejcha Ph.D.]



*Graf 5-První termočlánek [Ing. Brejcha Ph.D.]*



*Graf 6-Druhý termočlánek [Ing. Brejcha Ph.D.]*



Graf 7-Třetí termočlánek [Ing. Brejcha Ph.D.]

Z naměřených hodnot byla stanovena časová konstanta  $\tau$  pro každý termočlánek. Časová konstanta  $\tau$  představuje dobu odezvy měřícího termočlátku a byla stanovena výpočtem dle:

$$Y = \ln\left(\frac{U_{100} - U_x}{U_{100} - U_{poc}}\right)$$

$$\tau = \frac{\sum(t \cdot t)}{\sum(Y \cdot t)}$$

$$U_{100} = 1,015 \text{ V}, U_{poc} = 0,416 \text{ V}$$

Po dosažení vyšly časové konstanty pro každý termočlánek, viz tabulka 13.

Termočlánek	Časová konstanta $\tau$ [s]
Referenční	0,131
1. – skupina 3	0,159
2. – skupina 2	0,111
3. – skupina 4	0,167

Tabulka 13-Časové konstanty  $\tau$

## 11 Shrnutí a závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo navrhnout řešení možného využití metody mikroplazmového svařování k mechanizované výrobě termočláneků. Práce je rozdělena do několika částí. První část se zabývá teoretickým úvodem do problematiky svařování termočláneků, možnosti svařování termočláneků a fyzikálními principům.

V druhé části je pak popsán návrh přípravku pro svařování pěti termočláneků najednou. Přípravek je upevněn k desce stolu a samotné svařování je mechanizováno svařovacím traktorem. Celý proces svařování se povedlo úspěšně odzkoušet a zajistit uspokojivou opakovatelnost. Avšak opakovatelnost výroby pěti termočláneků najednou vyžaduje velkou míru šikovnosti obsluhy, protože s daným uspořádáním mechanizace nelze zajistit synchronizované spuštění svařovacího procesu a pojezdu traktoru. Další nepříjemnost vzniká samotným ovladačem pulzace, který umožňuje pomlku mezi jednotlivými pulzy maximálně 2s. Tato doba je moc krátká pro dofuk ochranné atmosféry v místě svaru. To by mohlo mít vliv na kvalitu svaru, kterou by bylo vhodné ověřit metalografickou zkouškou. Oba tyto problémy by bylo možné eliminovat užitím řídicí jednotky, která by umožňovala využití svařovacího traktoru i lepšího řízení impulzů.

Třetí část bakalářské práce se zabývá velikostmi svarů a jejich vlivům na měření teploty. Bylo zjištěno, že velikost svaru se zvětšuje s rostoucím svařovacím proudem, dobou trvání impulzu a průtokem plazmového plynu. Kontrolní měření pak prověřilo vliv velikosti svarů na měřené teploty. Z prvního měření vyplynulo, že velikost svaru nijak neovlivní výslednou naměřenou hodnotu termoelektrického napětí. Druhé měření mělo za úkol ověřit vliv svaru na časovou konstantu, tedy na dobu odezvy termočláneků. Bylo potvrzeno, že čím je menší velikost svaru, tím je menší časová konstanta.

Shrneme-li tyto všechny poznatky, lze říci, že v této práci bylo nalezeno vyhovující řešení soustavy pro opakovatelné svařování termočláneků.

## 12 Bibliografie

- [1] Seebeckův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. Praha: Online Domain Tools, 2016 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [2] BC. MEJZLÍK, Michal. *NÁVRH A TVORBA LABORATORNÍ ÚLOHY S PELTIEROVÝM ČLÁNKEM* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15693](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15693). Diplomová práce. FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Macháček.
- [3] Thermocouples: Using thermocouples to measure temperature. *OMEGA* [online]. Stamford, Connecticut: OMEGA Engineering, INC., 2015 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.omega.com/prodinfo/thermocouples.html>
- [4] *Thermocouple Info* [online]. San Diego, CA: REOTEMP Instrument Corporation, 2011 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.thermocoupleinfo.com/>
- [5] HYRŠ, Jan. *Měření teploty termočlánky* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: [ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace). Bakalářská práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph. D.
- [6] CHILDS, Peter Thermocouples. *Practical Temperature Measurement* [online]. Elsevier, 2001, s. 98 [cit. 2016-04-14]. DOI: 10.1016/B978-075065080-9/50005-8. ISBN 9780750650809. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750650809500058>
- [7] BC. NĚMEC, Karel. *VLIV VNESENÉHO TEPLA NA VLASTNOSTI A STRUKTURU SVAROVÉHO SPOJE DUPLEXNÍ OCELI*. [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=26902](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26902). Diplomová práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.
- [8] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009, 240 s. ISBN 9788024820255.
- [9] SVAŘOVÁNÍ MIKROPLASMOU. *OMNITECH* [online]. Tetčice: Ing. Jan Veverka, OMNITECH spol. s r.o., 2016 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: [http://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani\\_mikroplasmou.html](http://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani_mikroplasmou.html)
- [10] *Method of manufacturing thermocouples: US3737996*. b.r.. USA. Přihlášeno 12. 6. 1973. ]
- [11] BC. STARÝ, Ondřej. *Výroba speciálních typů termočlánků mikroplazmovým svařováním*. Praha, ] 2012. Diplomová práce. FS ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Ladislav Kolařík, IWE.
- [12] HOT SPOT THERMOCOUPLE WELDER/TESTER: Product bulletin. In: *Technology marketing INC.* ] [online]. Salt Lake City, UT: Technology marketing INC., 2016 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.tmi-slc.com/File/ea0ef019-c360-4da9-a828-916b9c838067>

- [13 HotSpot PLUS Capacitive Discharge Stud & Thermocouple Welder. *DCC Corporation*  
] [online]. Pennsauken, NJ: DCC Corporation, 2013 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z:  
<http://www.dccccorporation.com/hotspotplus.html>
- [14 L60 Thermocouple & Fine Wire Welder. *LabFacility* [online]. West Sussex, UK: LabFacility,  
] 2016 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <https://www.labfacility.com/l60-thermocouple-fine-wire-welder-p276-pg95/#>
- [15 *Sisma Group* [online]. Piovene Rocchette (Vicenza) Italy: Sisma SpA, 2016 [cit. 2016-02-02].  
] Dostupné z: <http://www.sisma.com/>
- [16 *PROCESS WELDING SYSTEMS* [online]. Praha: ; Serving the World's Industries with Laser,  
] Plasma, TIG & MIG Welding Solutions, 2010 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z:  
<http://www.processwelding.com/>
- [17 Chromel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia  
] Foundation, 2001-2016 [cit. 2016-08-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chromel>
- [18 Alumel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation,  
] 2001 [cit. 2016-08-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Alumel>
- [19 *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr.*  
] vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 8085771853.
- [20 Microplasma 50. *EWM Group* [online]. Mündersbach Germany: EWM Group GmbH, 2016 [cit.  
] 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.ewm-group.cz/microplasma-50/>
- [21 Microplasma 50 Návod k obsluze. *EWM-Group* [online]. 2016, **2016**(1), 36 [cit. 2016-08-08].  
] Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/ewm-data/partner-web/Betriebsanleitungen/099-007010-EW512.pdf>
- [22 FRP15 Návod k obsluze. *EWM Group* [online]. 2016, **2016**(1), 17 [cit. 2016-08-08]. Dostupné z:  
] <https://www.ewm-sales.com/upload/099-008045-EW501.pdf>
- [23 *Tool Factory: Ausrüstkit 1,5 für PJB50/PJB50M* [online]. Deutschland: Tool Factory, 2010 [cit.  
] 2016-08-08]. Dostupné z: WWW: <http://www.toool-factory.com/Ausruestkit-1-5-fuer-PJB-50-PJB-50-M.htm>
- [24 UK500 Návod k obsluze. *EWM Group* [online]. 2016, **2016**(1), 20 [cit. 2016-08-08]. Dostupné z:  
] <https://www.ewm-sales.com/upload/099-008026-EWM12.pdf>
- [25 Weldycar Manual. *Air liquide welding* [online]. 2016, **2016**(1), 6 [cit. 2016-08-08]. Dostupné z:  
] <http://www.airliquidewelding.se/file/otherelement/pj/85/df/c0/05/weldycar4310429440032110973.pdf>
- [26 Termočlánek. In: *HotAir* [online]. Praha: HotAir.cz, 2016 [cit. 2016-08-08]. Dostupné z:  
] [http://www.hotair.cz/images/produkty/1/1698/termoclankova-sonda-typu-k-tp-01-s-kevlarovou-izolaci-pro-bga-stance-a-multimetry\\_0.jpg](http://www.hotair.cz/images/produkty/1/1698/termoclankova-sonda-typu-k-tp-01-s-kevlarovou-izolaci-pro-bga-stance-a-multimetry_0.jpg)

[27 KIC Explorer. In: *Smtnet.com* [online]. Portland, Maine: smtnet, 2016 [cit. 2016-08-11].  
] Dostupné z: <http://www.smtnet.com/media/images/KIC.Explorer-RF.jpg>

## 13 Seznam obrázků

Obrázek 1-Seebeckův okruh [1] .....	10
Obrázek 2-Bodový termočlánek [5].....	13
Obrázek 3-Plošný termočlánek [5] .....	13
Obrázek 4-Kombinovaný termočlánek [5].....	13
Obrázek 5-Víceúčelový termočlánek [5] .....	13
Obrázek 6-Provedení měřicího konce termočlátku [5].....	14
Obrázek 7-spoje termočládků [6].....	15
Obrázek 8-Příklad zapouzdřeného termočlátku [6] .....	15
Obrázek 9-Termočlánek MIMS [6] .....	16
Obrázek 10-Průběh teplotních cyklů [8].....	16
Obrázek 11- Vliv teplotního cyklu na strukturu svarového spoje [8] .....	17
Obrázek 12- Schéma měření teplotních cyklů [8] .....	18
Obrázek 13- Záznam teplotního cyklu pásma přehřátí s vyznačením začátku a konce přeměny $\gamma \rightarrow \alpha$ a záznam derivace teploty podle času [8] .....	18
Obrázek 14-Svařování mikroplazmou [9] .....	21
Obrázek 15-Svařování TIG [9] .....	21
Obrázek 16-Polohovací kotouč [10] .....	24
Obrázek 17-Schéma svařovacího procesu [10] .....	24
Obrázek 18-HotSpot Thermocouple Welder [13] .....	25
Obrázek 19-L60 Thermocouple & Fine Wire Welder [14].....	25
Obrázek 20-Zařízení pro svařování laserem [15].....	26
Obrázek 21-Plasmové zařízení na výrobu termočládků [16].....	26
Obrázek 22-Nákres přípravku Alternativa 1 .....	28
Obrázek 23-Nákres přípravku Alternativa 2 .....	29
Obrázek 24-Detail měřených termočládků .....	30
Obrázek 25-Detail drážky přípravku Alternativy 1 .....	31
Obrázek 26-Boční pohled prototypu .....	32
Obrázek 27-Přední pohled prototypu .....	32
Obrázek 28-Detail drážky .....	32
Obrázek 29-Pohled shora .....	32
Obrázek 30-Princip funkce přípravku Alternativa 3 .....	33
Obrázek 31-Nákres tlačítka .....	33
Obrázek 32-Model přípravku .....	34
Obrázek 33-Model přípravku zezadu .....	34
Obrázek 34-Přípravek pohled z boku .....	35
Obrázek 35-Přípravek pohled shora .....	35
Obrázek 36-Svařovací zdroj Microplasma 50 .....	35
Obrázek 37-Ovládací panel zdroje [21] .....	36
Obrázek 38-Schéma ovladače FRP15 [22] .....	37
Obrázek 39-Foto FRP15 .....	37

Obrázek 40-Složení mikroplazmového hořáku PJB50 [23].....	38
Obrázek 41-Chladicí zařízení UK500.....	38
Obrázek 42-Svařovací traktor Weldycar [25] .....	39
Obrázek 43-Ovládání Weldycar [25] .....	39
Obrázek 44-Výsledné uspořádání experimentu.....	40
Obrázek 45-Vzorek termočlátku [26] .....	40
Obrázek 46-Schéma upnutí drátů .....	41
Obrázek 47-KIC Explorer [27] .....	45
Obrázek 48-El. schéma přípravku kontrolního měření [Ing. Brejcha Ph.D.].....	46
Obrázek 49-Kalibrace termočládků [Ing. Brejcha Ph.D.] .....	46
Obrázek 50-Vyhřívavý přípravek[Ing. Brejcha Ph.D.].....	46
Obrázek 51-Záznam osciloskopem [Ing. Brejcha Ph.D.].....	47
Obrázek 52-Měření doby odezvy [Ing. Brejcha Ph.D.] .....	47

## 14 Seznam tabulek

Tabulka 1-Přehled termočládků [3], [4] .....	12
Tabulka 2-Orientační šířky pásem TOO [7].....	17
Tabulka 3-Svařování mikroplazmou [9].....	22
Tabulka 4-Svařování plazmou (materiál CrNi) [9].....	22
Tabulka 5-Naměřené hodnoty svarových spojů.....	30
Tabulka 6-Technické údaje Microplasma 50 [20].....	36
Tabulka 7-Odlazení svařovacích parametrů .....	42
Tabulka 8-Svařovací parametry.....	43
Tabulka 9-1. skupina vzorků .....	43
Tabulka 10-2. skupina vzorků .....	43
Tabulka 11-3. skupina vzorků .....	43
Tabulka 12-4. skupina vzorků .....	44
Tabulka 13-Časové konstanty $\tau$ .....	49

## 15 Seznam Grafů

Graf 1-Charakteristiky termočládků [3].....	11
Graf 2-Průměry jednotlivých svarových kuliček.....	31
Graf 3-Průběh velikosti svaru .....	44
Graf 4-Referenční termočlánek [Ing. Brejcha Ph.D.].....	47
Graf 5-První termočlánek [Ing. Brejcha Ph.D.] .....	48
Graf 6-Druhý termočlánek [Ing. Brejcha Ph.D.].....	48
Graf 7-Třetí termočlánek [Ing. Brejcha Ph.D.].....	49



## Seznam příloh

Návrhový výkres Alternativa 1 (06 – 2016 – 000)

Návrhový výkres Alternativa 2 (06 – 2016 – 005)

Návrhový výkres Alternativa 3 (06 – 2016 – 007)

Tabulka výběru pružin

Kompletní výkresová dokumentace navrženého přípravku

06 – 2016 – 100

06 – 2016 – 100-K

06 – 2016 – 111

06 – 2016 – 112

06 – 2016 – 110

06 – 2016 – 113