

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



VLIV PARAMETRŮ NA TEPLOTNÍ POLE

PŘI NAVAŘOVÁNÍ PLAZMATEM

Influence of parameters on temperature field during plasma surfacing

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Václav Zugárek

Vedoucí práce: Ing. Pavel Rohan Ph.D., IWE

Praha, 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zugárek** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **408618**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vliv parametrů na teplotní pole při navařování plazmatem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Influence of parameters on temperature field during plasma surfacing**

Pokyny pro vypracování:

- seznámit se s problematikou navařování plazmatem (PTA)
- provést literární rešerši na téma účinek parametrů při navařování plazmatem
- seznámit se s problematikou měření teploty termočlánky, termokamerou
- provést porovnávací měření při navařovacím procesu

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

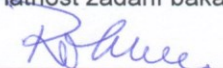
**Ing. Pavel Rohan Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2017**

  
Podpis vedoucí(ho) práce

  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

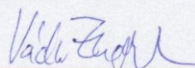
  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

10.5.2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně za použití uvedených informačních zdrojů pod vedením Ing. Pavla Rohana, Ph.D., IWE.

---

Datum

---

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji panu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., IWE za odborný, profesionální a vstřícný přístup, cenné připomínky, rady, za jeho čas na konzultace a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Děkuji společnosti KSK, s.r.o. za možnost pracovat na moderním navařovacím zařízení. Děkuji všem pracovníkům ústavu strojírenské technologie fakulty strojní za rady a doporučení. Rád bych také poděkoval svým přátelům, kolegům, komunitě webu strojar.com a své rodině za podporu po celou dobu studia.

# ANOTAČNÍ LIST

## Název

Vliv parametrů na teplotní pole při navařování plazmatem

## Anglický název

Influence of parameters on temperature field during plasma surfacing

## Rok

2017

## Typ

Bakalářská práce

## Autor práce

Václav Zugárek

## Vedoucí práce

Ing. Pavel Rohan Ph.D., IWE

## Pracoviště

Fakulta strojní ČVUT v Praze, Ústav strojírenské technologie (U12133)

## Studijní program/obor

Výroba a ekonomika ve strojírenství / Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

## Klíčová slova

svařování plazmatem, teplotní pole, návar, termočlánek, měření teploty, mikrotvrdost

## Anotace

Bakalářská práce se zabývá studiem vlivu navařovacích parametrů na teplotní pole návarů zhotovených metodou plazmového navařování. Teoretická část obsahuje rozbor měření teploty uplatněné při technologii navařování plazmatem. Experimentální část se zabývá problematikou měření teplotního pole a vlivu teploty na návary v závislosti na parametrech navařovacího procesu.

# ANNOTATION LIST

## **Name (Czech)**

Vliv parametrů na teplotní pole při navařování plazmatem

## **English name**

Influence of parameters on temperature field during plasma surfacing

## **Year:**

2017

## **Type**

Bachelor thesis

## **Author**

Václav Zugárek

## **Supervisor**

Ing. Pavel Rohan Ph.D., IWE

## **Workplace**

Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague, Department of Manufacturing Technology (U12133)

## **Study program/field of study**

Production and Economics in Mechanical Engineering / Technology, Materials and Economy in Engineering

## **Key words**

plasma arc welding, temperature field, weld deposit, termocouple, microindentation hardness

## **Annotation**

The bachelor thesis investigates the influence of welding parameters on the temperature field of welding deposits made by Plasma Transferred Arc Welding method. The theoretical part contains a temperature measurement analysis which applies to plasma welding technology. The practical part examines the problems of measuring the temperature field and the influence of heat on the weld cladding deposits depending on the Plasma Transferred Arc Welding process parameters.

# OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	2
ÚVOD.....	3
1 DEFINICE POJMŮ.....	4
2 TEPLOTA.....	6
2.1 TEPLOTNÍ POLE.....	6
2.2 TEPLOTNÍ CYKLUS.....	7
2.3 MĚŘENÍ TEPLOTY.....	10
2.3.1 Termočlánek.....	10
Měření teplotního cyklu termočláanky.....	11
2.3.2 Bezdotykové měření teploty.....	12
2.3.3 Termokamera.....	15
3 NAVAŘOVÁNÍ PLAZMATEM.....	16
4 POSTUP PRÁCE A PŘÍSTROJE.....	19
4.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE.....	19
4.2 POSTUP MĚŘENÍ.....	22
5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A DISKUZE.....	28
5.1 PRVNÍ SADA VZORKŮ.....	28
5.2 DRUHÁ SADA VZORKŮ.....	31
5.3 TŘETÍ SADA VZORKŮ.....	35
6 ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ.....	36
7 ZDROJE INFORMACÍ.....	37

## **SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

### **PAW**

Plasma Arc Welding (anglická zkratka). Svařování plazmatem.

### **PTA**

Plasma-Transferred Arc welding (anglická zkratka). Navařování plazmatem.

### **TIG**

Tungsten Inert Gas (anglická zkratka). Svařování wolframovou netavící se elektrodou v ochranné inertní atmosféře. Tato metoda je též známá pod zkratkami WIG – Wolfram Inert Gas (německá zkratka) a GTAW – Gas Tungsten Arc Welding (americká zkratka).

### **MIG**

Metal Inert Gas (anglická zkratka). Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné inertní atmosféře.

### **MAG**

Metal Active Gas (anglická zkratka). Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné aktivní atmosféře.

### **SAW**

Svařování pod tavidlem. V technické praxi bývá též užívána zkratka APT (svařování automatem pod tavidlem).

### **IR**

Infrared, resp. Infrared Radiation (anglická zkratka). Infračervené záření (druh elektromagnetického záření s vlnovou délkou přibližně 0,75 až 1,3  $\mu\text{m}$ ).

### **HV**

Vickers Hardness. Tvrdost podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1). Zkouška spočívá ve vnikání zkušebního tělesa (diamantového čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136°) do zkoumaného materiálu při definovaném zatížení. Měří se délka úhlopříček vtisku.



## ÚVOD

Zvyšující se nároky na produktivitu, kvalitu a kapacitu výrobních procesů, zejména v hromadné a sériové výrobě, vedou k nutnosti investovat do výzkumu, vývoje, optimalizace a zařazení do praxe nových technologických metod, které výrobcům umožní splnění těchto požadavků, získání lepší pozice na trhu a zejména snížení nákladů spojených s výrobním procesem.

Navařování je progresivní technologií, která nachází široké možnosti uplatnění v oblasti povrchových úprav, obrábění kovů, renovací objemu součástí. Může přispět k prodloužení životnosti výrobních zařízení, přípravků a nástrojů, ale též samotných výrobků.

V obecné rovině je však společným problémem prakticky všech navařovacích, resp. svařovacích metod způsob distribuce tepla generovaného zdrojem do základního materiálu a vznik tepelně ovlivněné oblasti v okolí místa svařování. Právě ono vnesené teplo může mít negativní vliv na vlastnosti součástí, neboť v různé míře dochází k nežádoucím změnám struktury a mechanických vlastností základního materiálu. Množství vneseného tepla však lze do značné míry ovlivnit vhodnou úpravou svařovacích parametrů. Zjištění, jaké parametry mají na teplotní pole vliv může být proto velmi přínosné.

# 1 DEFINICE POJMŮ

## *Navarování*

Navarování je technologický proces vytváření vrstev nanášením přídavného materiálu na povrch součásti působením tepla anebo tlaku. Cílem navarování je zvětšení objemu součásti, často za účelem doplnění určitých vlastností, které samotný základní materiál součásti nevykazuje. Příkladem může být navarování vrstev různých tloušťek pro zvýšenou odolnost vůči korozním vlivům provozního prostředí, abrazivnímu opotřebení, kondukcii tepla, dosažení elektrické vodivosti, chemické odolnosti, pro zajištění žáruvzdornosti, požadované tvrdosti, drsnosti atp. Technologie navarování však také nachází uplatnění v oblasti oprav poškozených součástí. Rovněž z ekonomického hlediska je velmi přínosná. V řadě technických aplikací je technologicky či ekonomicky nevhodné pro zajištění požadovaných vlastností nahrazovat materiál v celém objemu součásti, když lze obdobných parametrů dosáhnout úpravou povrchových vrstev.

Technologie navarování lze rozdělit podle použitého zdroje tepla. Mezi běžně používané zdroje lze zařadit například plamen, elektrický oblouk, plazmový oblouk, laserový či elektronový paprsek.

## *Svařování*

Svařování je technologický proces vytváření pevného nerozebíratelného spojení materiálů působením tepla anebo tlaku [1], [2]. Svařováním se vytváří spojení především kovových součástí, nicméně lze spojovat i některé nekovy (např. plastické hmoty, sklo). Spojovat dohromady lze i kovy a nekovy. [2] Zatímco navarování slouží primárně k vytváření vrstev na povrchu součásti, svařování je užíváno ke spojování součástí.

Cílem svařování je zhotovení spoje, který bude vykazovat požadované vlastnosti a splňovat požadavky dané provozními podmínkami. Spoj by měl obecně vykazovat stejné nebo vyšší vlastnosti, jako okolí spoje. Spojení lze vytvořit s přídavným materiálem i bez přidaného materiálu, přičemž přídavný materiál musí vykazovat vlastnosti, které umožní vytvoření spojení se základním materiálem. Především musí být tavící teplota přídavného materiálu stejného řádu jako u základního materiálu, v opačném případě není pravděpodobně možné spojení vytvořit. Forma a způsob dodávání přídavného materiálu závisí do značné míry na metodě svařování. Mezi nejčastější podoby přídavného materiálu patří drátové elektrody nebo prášek.

## ***Plazma***

Plazma je ionizovaný elektricky vodivý plyn, čtvrté skupenství hmoty.

Plazma je tvořeno elektrony, ionty a neutrálními částicemi, které se za vysokých teplot pohybují neuspořádaně. Molekuly jsou disociovány, atomy ionizovány. Při dopadu na relativně chladný povrch materiálu dochází k uvolnění zachycené energie ve formě rekombinovaného tepla. [3]

Ve fyzice a v technologii navařování, resp. svařování, je psáno „plazma“ (s písmenem Z), přičemž skloňování probíhá podle rodu středního. Anglická literatura používá pro označení plazmatu termín „plasma“ (psáno s písmenem S). V lékařských vědách je (krevní) „plasma“ psána s písmenem S a skloňování probíhá podle rodu ženského.

## ***Plazmatron***

Obloukový generátor plazmatu – plazmový hořák.

## 2 TEPLOTA

Teplotu je možné definovat jako charakteristickou vlastnost tepelného stavu hmoty. Teplota vyjadřuje míru vnitřní energie systému, tedy jak horký či chladný je předmět nebo prostředí. Se zvyšujícím se množstvím tepla absorbovaného materiálem roste kinetická energie jeho atomů a roste teplota. [4]

Dokument mezinárodní teplotní stupnice ITS-90, sestavený na zasedání Comité International des Poids et Mesures a platný od roku 1990, definuje 17 pevných teplotních bodů látek (rovnovážné stavy pevných, kapalných a plynných fází), na jejichž základě jsou stanoveny jednotky a stupnice. [5] V dnešní době užívanými jednotkami jsou zejména Kelvin (značený K) a stupeň Celsia (značený °C). V technické praxi, v oblasti navařování je používána jednotka stupeň Celsia.

### 2.1 TEPLOTNÍ POLE

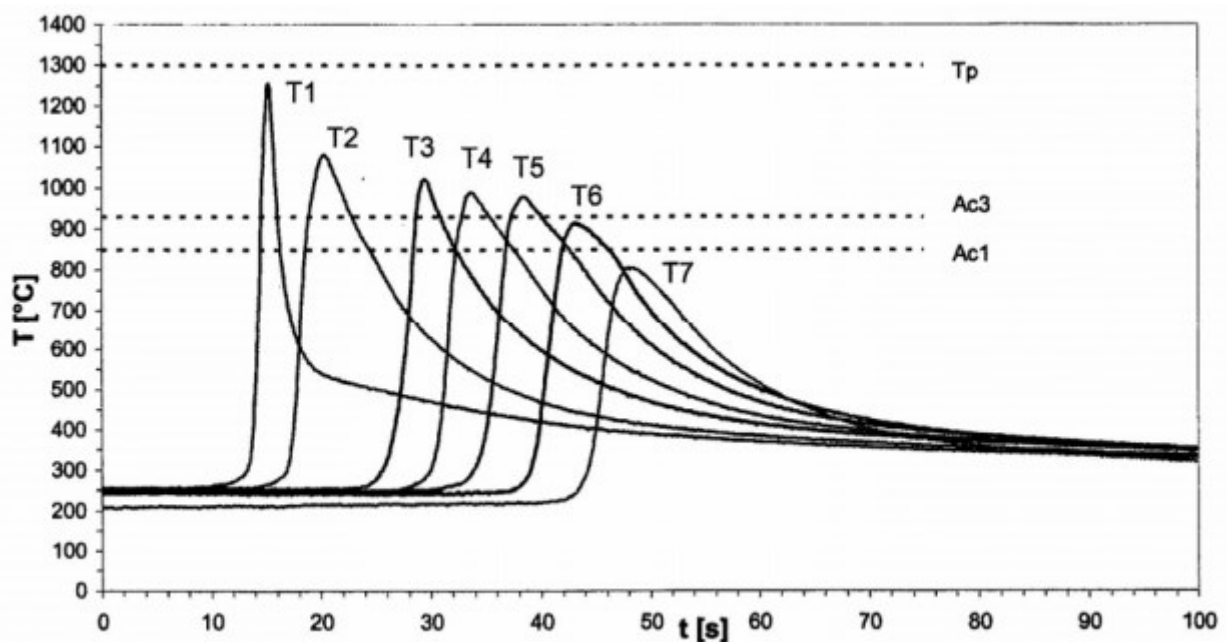
Během navařování dochází k intenzivnímu lokálnímu ohřevu na vysoké teploty. Vnesené teplo způsobuje natavení základního materiálu a vznik svarové lázně. V důsledku tepelné vodivosti materiálu dochází k ohřevu okolní oblasti. [2] V pevných látkách se teplo šíří zejména vedením, tj. na základě mikroskopického pohybu částic. Šířením vneseného tepla od zdroje do základního materiálu vzniká teplotní pole.

Důsledkem vysokých teplot a jejich změn během navařovacího procesu jsou fázové přeměny základního i přídavného materiálu, fyzikálně chemické reakce, změny struktury v oblasti návaru a vznik vnitřních napětí a deformací zapříčiněné změnami objemu. [2] Na geometrii a vlastnosti teplotního pole mají vliv fyzikální vlastnosti základního materiálu a svařovací parametry. Jako příklad lze uvést tepelnou vodivost materiálu, jeho měrnou hmotnost, rozměry součásti či podmínky přívodu a odvodu tepla. [6] Pohybuje-li se zdroj tepla konstantní rychlostí (teplota libovolného bodu závisí na poloze a času), vzniká nestacionární teplotní pole. Naopak, setrvává-li zdroj na místě (např. při bodovém svařování), vzniká stacionární teplotní pole. [6]

Rozložení a časový průběh teplot v teplotním poli lze určit zjednodušeně analytickým nebo numerickým řešením rovnice vedení tepla anebo měřením např. termočlánky či termovizí.

## 2.2 TEPLOTNÍ CYKLUS

Teplotní cyklus popisuje průběh teplot v místě svarového spoje v závislosti na čase. Grafickým znázorněním tohoto průběhu, vynesení do grafu, lze získat charakteristiku, která je typická pro každou svařovací metodu. Vznik teplotního cyklu je zapříčiněn přiváděným a vedeným teplem, působícím v oblasti svarového spoje. „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.“ [7]



↑ Obr. 1 Příklad průběhu teplotních cyklů [7] [2]

Parametry nejčastěji charakterizující teplotní cykly: [2]

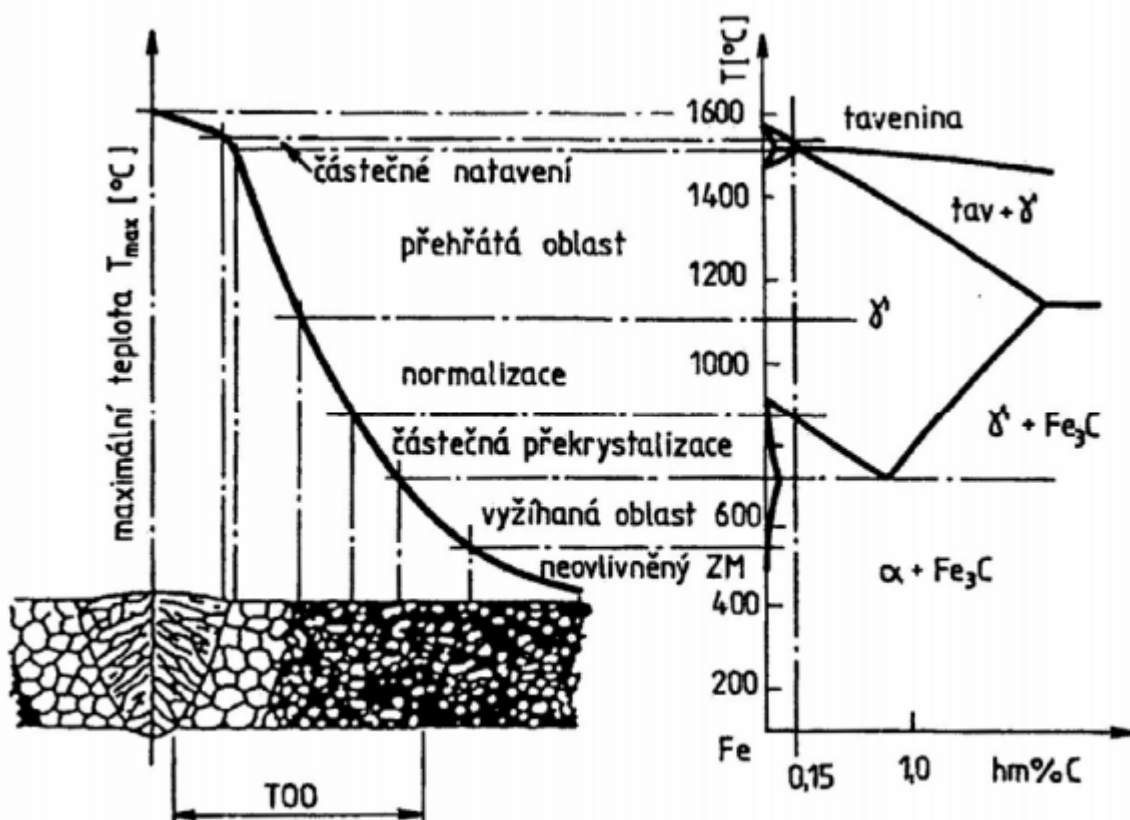
- Rychlost nebo čas ohřevu na maximální teplotu
- Čas výdrže nad teplotami  $Ac_1$ ,  $Ac_3$  a teplotou přehřátí  $T_p$
- Maximální dosažená teplota cyklu  $T_{max}$

Pro první fázi teplotního cyklu je charakteristická rychlost ohřevu z počáteční teploty na maximální teplotu. Tato rychlost ohřevu závisí na použité technologii svařování, na intenzitě zdroje tepla a na fyzikálních vlastnostech materiálu. [2] V oblasti chování ocelí při různých rychlostech ohřevu způsobuje velká rychlost ohřevu teplotní hysterizi bodů strukturní přeměny oceli ( $\alpha \rightarrow \gamma$ ), ovlivňuje kinetiku přeměny a stupeň homogenizace tuhého roztoku. Je-li rychlost ohřevu dostatečně vysoká, může existovat ještě při teplotě 1 000 °C netransformovaný ferit. [7]

„Chemické složení se vyrovnává difúzí uhlíku z austenitu do feritu. Následně dochází k transformaci feritu na austenit. I když je koeficient difúze uhlíku ve feritu při těchto teplotách mnohem vyšší než koeficient difúze uhlíku v austenitu, je přesto homogenizace austenitu i při vysokých rychlostech ohřevu dostatečná a jemné zrno struktury zůstává zachováno.“ [7]

„Druhou fází teplotního cyklu – maximální teplotu nebo čas setrvání nad určitou vysokou teplotou můžeme pokládat za míru zhrubnutí (růstu zrna).“ [2] Zhrubnutí zrna je tím větší, čím delší je tento čas. [2]

Během ochlazovací fáze teplotního cyklu dochází k ovlivnění zejména strukturní přeměny  $\gamma \rightarrow \alpha$  a difuzi vodíku. Vyšší rychlost ochlazování v oblasti transformačních teplot zvyšuje pravděpodobnost tvorby nerovnovážných struktur (např. martenzitu). Naopak nižší rychlost ochlazování při teplotách pod 300 °C zvyšuje pravděpodobnost úniku vodíku z oblasti svarového spoje. [2]



↑ Obr. 2 Vliv teplotního cyklu na strukturu svarového spoje [7] [2]

Teplotní ovlivnění a chemické složení materiálu při navařování většinou ovlivní růst zrn. Zhrubnutí zrna ovlivňuje vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti. Výrazným způsobem zhoršuje plasticitu (vrubovou a lomovou houževnatost), zvyšuje náchylnost k praskání, brzdí kinetiku rozpadu austenitu a v kovech bez polymorfni přeměny snižuje pevnost dané oblasti [2].

↓ Tab. 1 Orientační šířky jednotlivých pásem tepelně ovlivněné oblasti [2]

Technologie svařování	Šířka tepelně ovlivněné oblasti [mm]		
	nad A <sub>1</sub>	nad A <sub>3</sub>	přehřátá oblast
Ruční obloukové svařování (111)	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
MIG (131), MAG (135)	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
SAW (121)	3 až 15	0,3 až 2	0,1 až 0,5
Elektrostruskové svařování (72)	5 až 50	1 až 10	0,5 až 5
Svař. elektronovým paprskem (51)	0,3 až 1	0,1 až 0,3	0 až 0,1
Svařování plazmou (15)	0,3 až 1	0,1 až 0,3	0 až 0,1

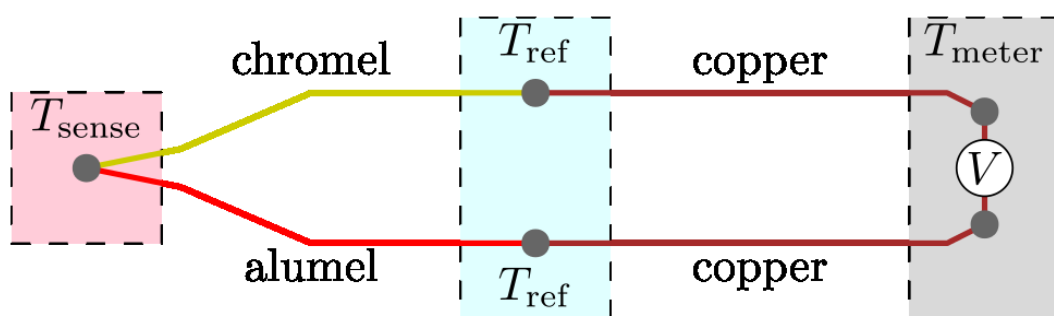
## 2.3 MĚŘENÍ TEPLoty

Teplota je měřena zprostředkovaně na základě fyzikálních jevů, jakými je např. roztažnost, termoelektrické napětí, vyzařování, ovlivnění optického prostředí vlivem tepla apod. Nejběžněji užívané teploměry (např. rtuťové, lihové) staví na principu změny objemu kapaliny v závislosti na teplotě, která je odečtena ze stupnice dle výšky hladiny. Tento typ teploměrů má však omezenou reakční dobu, přesnost a rozsah měřitelných teplot. V oblasti navařování je proto častěji aplikováno měření teploty pomocí termočlánků a přístrojů založených na měření emisivity záření, jejichž teplotní rozsah může být podstatně větší. Metody lze rozdělit na dotykové (kontaktní) a bezdotykové (bezkontaktní).

### 2.3.1 Termočlánek

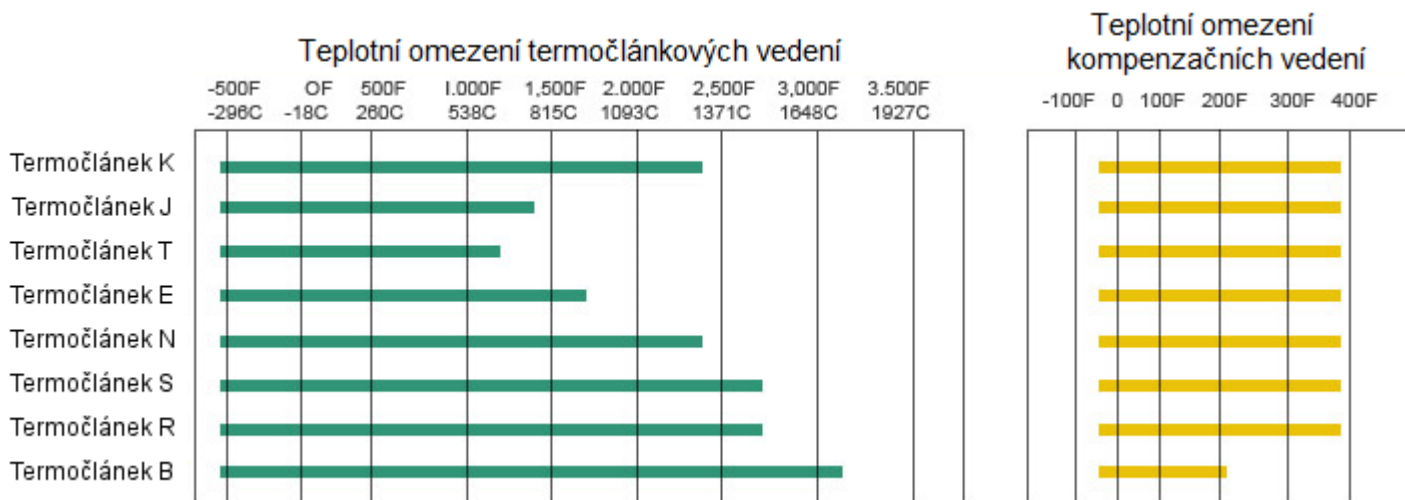
Termočlánek nebo též termoelektrický článek je senzor určený ke kontaktnímu měření teploty. Měření teploty termočlánkem využívá tzv. Seebeckův jev, který popisuje převod tepelné energie na elektrickou. „Tento jev jako první pozoroval estonsko-německý fyzik Thomas Johann Seebeck (1770-1831) v roce 1821.“ [8]

Termočlánek sestává z uzavřeného obvodu tvořeného dvěma různými homogenními kovovými vodiči, jejichž konce jsou vodivě spojené. [9] Jednomu spoji se říká „horký konec“ a právě v místě tohoto spoje je teplota měřena. Naopak druhý konec vedení termočlánku se nazývá „studený konec“ a slouží jako místo referenční teploty. Mají-li oba konce stejnou teplotu, je výsledné termoelektrické napětí v obvodu rovno nule, avšak pokud se teplota jednoho z konců změní, dojde k novému rozdělení nosičů volného náboje ve spoji. Mezi horkým a studeným koncem vzniká různé kontaktní napětí. V obvodu vzniká termoelektromotorické napětí a elektrický proud v důsledku teplotního gradientu, který je zapříčiněn právě rozdílným materiálem vodičů. Na základě závislosti naměřeného termoelektrického napětí na rozdílu teplot je tak možné stanovit teplotu. [8] [10]



↑ Obr. 3 Schéma obvodu termočlánku typu K [11]



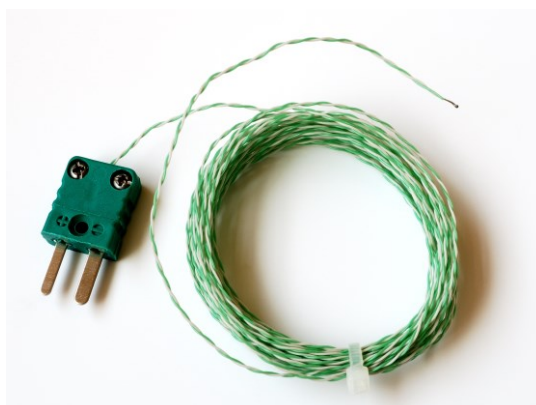


↑ Obr. 4 Porovnání teplotních limitů různých typů termočláňků [12]

## Měření teplotního cyklu termočláňky

Průběh teplotního cyklu je možné stanovit buď měřením nebo výpočtem.

Nejpřesnější měření teplotního cyklu lze provést termočláňky. Typ termočláňku je volen dle vzdálenosti od hranice oblasti natavení, ve které se bude měření provádět. Termočláňek může být umístěn buď na povrch základního materiálu měřeného předmětu anebo přímo do zhotovené dutiny (kanálu), tak aby byla jeho vzdálenost od hranice ztavení co nejkratší. Velikost termočláňku je volena tak, aby byl spoj termočláňku s místem měření co nejmenší, aby se omezilo měření pouze průměrné hodnoty teploty z plochy svarového spoje. Termočláňky malých průměrů mají také malou tepelnou setrvačnost (tepelný obsah), čímž přispívají k větší přesnosti měření. [2]



↑ Obr. 5 Termočláňek typu K s malým konektorem ALMEMO [13]

Kromě termočláňků lze rozložení teplot ve svarovém spoji stanovit také bezkontaktně, pomocí termovize, avšak s podstatně menší přesností.

### 2.3.2 Bezdotykové měření teploty

Pro některé aplikace jsou dotykové teploměry nevhodné. Příkladem takových aplikací může být potřeba snímání teploty rotující součásti během obrábění, rychlého měření teploty v sériové výrobě nebo zjišťování tepelných ztrát izolací budov. Jsou-li teploty příliš vysoké (nad 1 300 °C), stávají se dotykové teploměry zcela nepoužitelnými nebo mají velmi omezenou životnost. V takových případech je vhodné použít bezdotykové teploměry.

Výhody bezdotykového měření teploty: [14]

- Rychlost měření v řádu milisekund
- Měření teploty pohybujících se objektů
- Měření teploty vzdálených předmětů
- Měřit lze v nebezpečných či nedostupných prostorech
- Měření vysokých teplot (nad 1 300 °C)
- Nedochází k ovlivnění měřeného objektu
- Bez rizika kontaminace a mechanického poškození povrchu měřeného objektu

Nevýhody bezdotykového měření teploty: [14]

- Měřený objekt musí být pro senzor opticky (infračerveně) viditelný
- Optika senzoru musí být chráněna před prachem a kondenzací kapalin
- Nutnost korekce parazitního odraženého záření
- Nejistoty měření závisí na chybě emisivity povrchu měřeného objektu a na chybě propustnosti prostředí mezi senzorem a měřeným objektem
- Nutnost opakované kalibrace
- Pořizovací náklady

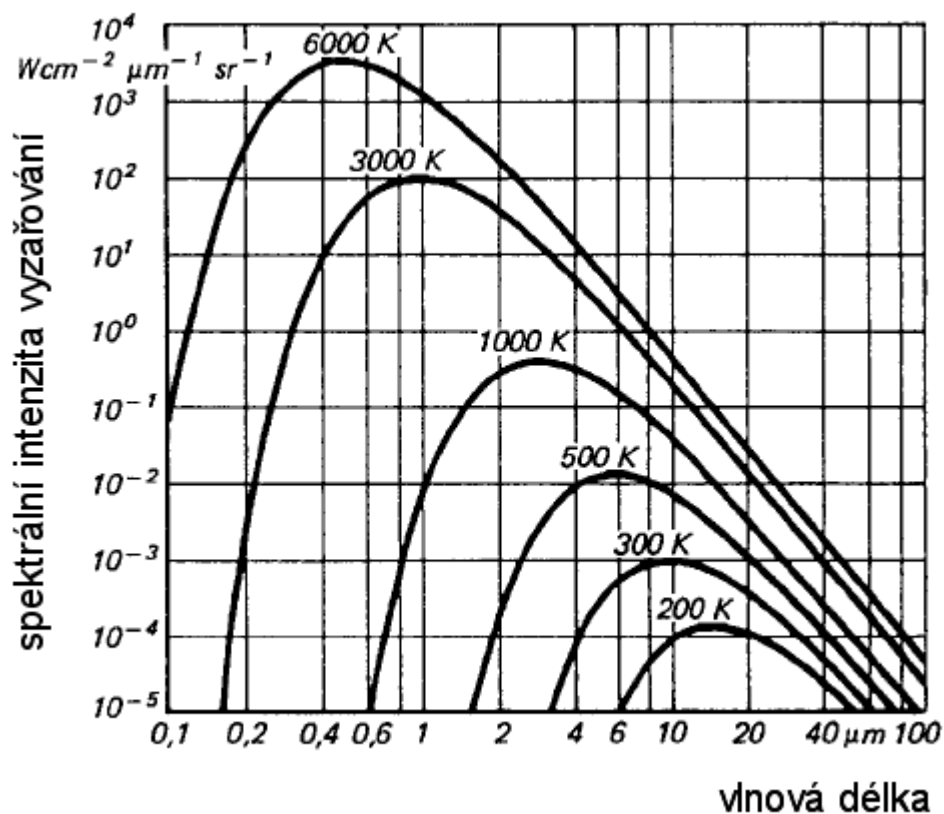
Každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula (0 K, tj.  $-273,15\text{ °C}$ ) vyzařuje ze svého povrchu elektromagnetické záření, které má původ v přeměně části energie chaotického tepelného pohybu částic tělesa v energii tohoto záření. [10] Emitované záření (fotony) se pohybují rychlostí světla a podléhají zákonům optické fyziky. Vlnové délky spektra vyzařování se pohybují od 0,7 do 1 000  $\mu\text{m}$  a pokrývají tak tzv. infračervenou oblast spektra. Lidským okem jej nelze zcela<sup>1</sup> vidět, protože elektromagnetické záření (viditelné světlo) zaznamatelné

---

<sup>1</sup> Tělesa při vysokých teplotách (nad 600 °C) vyzáří malé množství viditelného záření, které lidské oko vnímá jako červenou až bílou barvu.

lidským okem se nachází v intervalu cca 400 až 700 nm. Infračervenou část spektra však lze zachytit přístroji. [14] [10]

Na diagramu znázorňujícím závislost vyzařování ideálního, tzv. černého tělesa na jeho teplotě (viz diagram 1) je vidět, že s rostoucí teplotou dochází k posuvu maxima vyzařování směrem ke kratším vlnovým délkám. K překryvu křivek nedochází. Energie vyzařování v celé šíři pásma vlnových délek (oblast pod křivkami) roste se 4. mocninou. Na základě závislosti mezi tepelným zářením a teplotou povrchu byl odvozen a roku 1879 fyziky Ludwigem Boltzmannem a Jožefem Stefanem publikován vztah pro celkovou intenzitu elektromagnetického záření. Dnes je známý jako Stefan-Boltzmannův zákon:  $M_0 = \sigma \cdot T^4$ , kde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  je Stefan-Boltzmannova konstanta a  $T$  je termodynamická teplota tělesa. [10] Diagram ilustruje, že na základě záření lze jednoznačně určit teplotu. [14]



↑ Diagram 2 Vyzařovací charakteristiky černého tělesa v závislosti na jeho teplotě [15]

Wienův zákon posuvu říká, jak již bylo naznačeno, že s rostoucí teplotou se maximum spektrální intenzity posouvá ke kratším vlnovým délkám. [10] Podle tohoto posuvu odpovídá rozsah vlnových délek měřicímu teplotnímu rozsahu pyrometru (bezdotykovému teploměru).

Množství vyzařené energie příslušející jednotlivým vlnovým délkám popisuje tzv. Planckův vyzařovací zákon, formulovaný německým fyzikem Maxem Planckem v roce 1900. [16] Těchto poznatků bylo využito při konstrukci bezdotykových teploměrů.

Zařízení pro bezdotykové měření teploty lze rozdělit na přímo měřící (pyrometry) a zobrazovací zařízení (termovizní systémy).

Pyrometry jsou bezdotykové – infračervené (IR) – teploměry, které pracují přesněji při větších rozdílech vyzařování při určitém teplotním rozdílu. Rozlišit lze pyrometry spektrální, pásmové (fotoelektrické), radiační, jasové aj.

Mnoho těles vyzařuje (emituje) při stejné teplotě méně energie než černé těleso stejné teploty. Poměr skutečné intenzity vyzařování tělesa a intenzity vyzařování černého tělesa se stejnou teplotou se nazývá emisivita (značí se  $\epsilon$ ). Emisivita kovů závisí na vlnové délce a na teplotě. Optimální vlnová délka pro vysoké teploty kovů se pohybuje v rozmezí kolem 0,8 až 1  $\mu\text{m}$ . Možné jsou také vlnové délky 1,6  $\mu\text{m}$ , 2,2  $\mu\text{m}$  a 3,9  $\mu\text{m}$ . Ideální černé těleso má emisivitu rovnu maximální hodnotě 1. Tělesům, jejichž emisivita je menší než jedna, se říká „šedá tělesa“. Velikost emisivity závisí nejen na emitovaném záření, ale je ovlivněna také odrazy záření či zářením přejatým při průchodu měřeným objektem. Lesklé, zoxidované či zvrásněné povrchy mohou ovlivnit hodnotu emisivity více než materiál sám o sobě. Pro různé materiály a různé teplotní intervaly je proto nutné toto kompenzovat. Pro kalibraci pyrometrů jsou využívány teplotní kalibrátory, které mají přesně definovanou emisivitu. Reálné černé těleso lze v praxi aproximovat dutinou s malým vstupním otvorem. Záření vstupující do dutiny a odrážející se od vnitřních stěn je stěnami při každém odrazu pohlcováno. Vlastnosti záření, které uniká otvorem ven se pak velmi blíží vlastnostem absolutně černého tělesa. [10] [14]

### 2.3.3 Termokamera

Je-li potřeba zjistit nejen teplotu povrchu v konkrétním místě objektu, ale rovněž zmapovat celé teplotní pole, přichází na řadu přístroje pracující se zobrazovacími metodami. Termovizní systémy (termokamery) pracují na stejném principu jako pyrometry, avšak jejich zorné pole se postupně zaměřuje hned na několik bodů měřeného objektu. Rozklad obrazu pozorovaného pole může být opticko-mechanický či elektronický. Konstrukčně jsou termokamery ve své podstatě podobné konstrukci digitálních fotoaparátů. Optiku tvoří většinou spojná čočka z germania, která kromě soustředění dopadajícího elektromagnetického záření, funguje také jako filtr elektromagnetického spektra. Na povrchu čočky je tenká antireflexní vrstva, která zabraňuje odrazu infračerveného záření. [17] Zachycená energie infračerveného záření vyzařovaného z plochy měřeného objektu je soustředěna na detektor záření. Rozlišit lze tepelné (fungující na principu změny elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího IR záření) a kvantové fotonové detektory (zjednodušeně řečeno fungují na principu počítání kvant fotonů). Informace o intenzitě zachyceného záření je digitálně zpracována a převedena na snímek, tzv. termogram. Rozlišení termogramu je dáno rozlišením detektoru. Nutnou podmínkou pro praktické měření je, že měřený objekt musí vyplňovat celou měřenou plochu, aby nedocházelo k nepřesnostem měření vlivem zachycení teplotního záření z pozadí objektu. [14] [17]

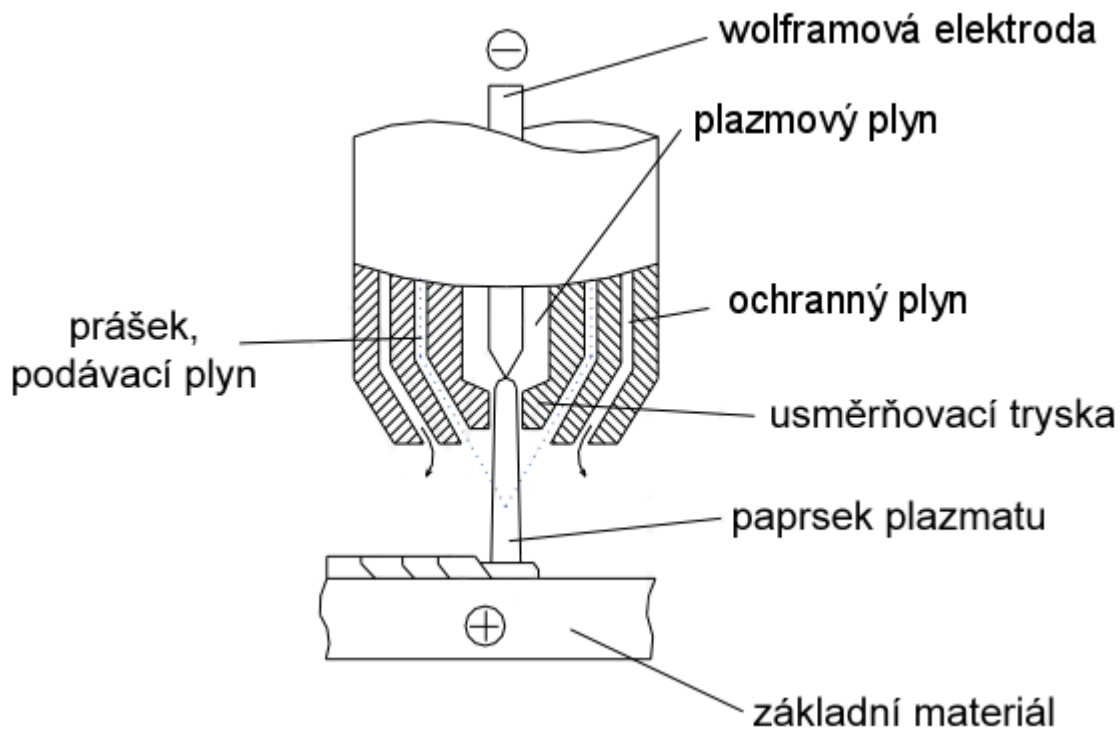
### **3 NAVAŘOVÁNÍ PLAZMATEM**

Navářování plazmatem (PTA) je moderní produktivní metoda, která se vyvinula z metody TIG. Při svařování metodou TIG se využívá přenosu tepla mezi wolframovou netavicí se elektrodou a základním materiálem svařovaného dílu. Metoda PAW je do jisté míry velmi podobná. Wolframová elektroda byla zachována, ale změnil se způsob přenosu tepla a podoba hořáku (výstup hořáku je užší, keramický výstup byl nahrazen kovovou tryskou).

#### **PRINCIP NAVAŘOVÁNÍ PLAZMATEM**

Základním principem metody PTA v oblasti navařování kovových materiálů je využití zúženého elektrického oblouku, vytvořeného mezi wolframovou elektrodou a svařovaným dílem, k zahřátí plazmového plynu a jeho přeměnu v plazmat. Díky kompresnímu účinku výstupní trysky je plazmový oblouk koncentrovaný, usměrněný, má vysokou hustotu energie a velkou výstupní rychlost. V důsledku vysoké tepelné intenzity dochází k okamžitému natavení základního materiálu. Roztavený kov ve vzniklé svarové lázni je rozháněn do stran od plazmového proudu, čímž je získána podoba „klíčové dírky“. Velikost klíčové dírky a zda dojde k jejímu zformování záleží na navařovacích parametrech.

Wolframová elektroda má podlouhlý válcový tvar, který je na svém jednom konci zabroušen do špičky. Špička slouží k omezení průměru elektrického oblouku vytvořeného mezi elektrodou a základním materiálem součásti. [18] Zasazena je do vnitřní objímky, do středu těla hořáku (plazmatronu). Obtékána je plazmovým plynem. Okolo vnitřní objímky je rovnoměrně distribuován přídatný materiál ve formě prášku, který je usměrňován před špičkou wolframové elektrody. Zde dochází k jeho natavení v úzkém proudu plazmatu.



↑ Obr. 6 Schéma konstrukce plazmatronu pro metodu PTA [18] (upraveno)

Rozlišit lze tzv. nepřenesený oblouk (non-transferred arc), přenesený oblouk (transferred arc) a kombinovaný oblouk. Jelikož je wolframová elektroda uložena hluboko v těle hořáku, není běžně možné zapálit elektrický oblouk kontaktně se základním materiálem. Namísto toho je oblouk vytvořen za pomoci tzv. pilotního oblouku (pilot arc). Někdy bývá také označován jako nepřenesený (non-transferred arc). Vzniká v důsledku napěťového výboje nízké intenzity mezi wolframovou elektrodou a měděnou anodou, která zároveň slouží jako usměřovací tryska. Při následném zapojení hlavního zdroje energie, zvýšení průtoku plazmového plynu, usnadňuje zformování hlavního, tzv. přeneseného, oblouku (transferred arc), který hoří mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem předmětu. [18]

Přídavný práškový materiál je skladován v uzavřených nádobách, z nichž je přesypáván do zásobníku navařovacího automatu. Zásobník zajišťuje rovnoměrné dávkování. Do hořáku je prášek přiváděn trubičkami, kterými je poháněn podávacím plynem. Tento podávací plyn může být inertní, aktivní anebo směsí obou zmíněných typů. Ochranu svarové lázně před korozními vlivy vnějšího prostředí zajišťuje ochranný plyn. Jako plazmový i ochranný plyn je nejčastěji používán argon. [18]

Parametry ovlivňující skrze teplotní pole kvalitu výsledného návaru jsou zejména rychlost průtoku plazmového, ochranného i podávacího plynu, velikost svařovacího proudu, rychlost navařování a pracovní vzdálenost trysky od součásti. Zásadní vliv však mohou mít i další parametry, např. složení plynů a plazmy, příprava povrchu součásti, předehřev, přídavný materiál, konstrukce plazmatronu anebo geometrie špičky wolframové elektrody. Je-li elektroda opotřebovaná (během navařování dochází k jejímu opalu), může plazmový oblouk hořet nestabilně a nerovnoměrně, což se projeví na kvalitě návaru. V této souvislosti je důležitý i průměr škrťacího otvoru usměrňovací trysky. Jeho velikost ovlivňuje nejen způsob proudění plazmatu, ale rovněž teplotu a koncentraci oblouku. [18] V neposlední řadě mají na kvalitu návarů a průběh navařovacího procesu vliv také znalosti a zkušenosti svářeče (operátora).

Výhody navařování plazmatem: [18] [19]

- Automatizace celého navařovacího procesu
- Úzká oblast natavení
- Minimální rozstřík
- Možnost vytvoření rovnoměrné vrstvy návaru (snížení nákladů na následné obrábění)
- Vysoká kvalita návaru
- Tenká přechodová vrstva mezi základním materiálem a návarem
- Snížení množství vneseného tepla a minimalizace tepelně ovlivněné oblasti

Nevýhody navařování plazmatem: [19]

- Vysoká teplota (může negativně ovlivnit základní materiál)
- Produkce intenzivního záření
- Obtížnost optimalizace navařovacích parametrů
- Cena práškového přídavného materiálu (je dražší, ve srovnání s elektrodou nebo drátem)



## 4 POSTUP PRÁCE A PŘÍSTROJE

### 4.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

#### *Plazmový navařovací automat PPC 250 R6 [20] [21]*

K tvorbě návarů byl použit průmyslový navařovací automat PPC 250 R6, zapůjčený společností KSK, s.r.o. Plazmový automat umožňuje navařování především rotačních součástí metodou PTA s práškem. Automat má 6 říditelných os: polohovací systém hořáku je říditelný ve 4 osách (X, Y, Z, N) a polohovadlo stolu ve 2 osách (C, R). Průměr stolu je 300 mm a jeho nosnost maximálně 70 kg. Řízení navařovacího procesu je realizováno prostřednictvím počítače. Navařovací cyklus lze naprogramovat anebo řídit ručně. Programování lze realizovat metodou „předved’ a proved’“ (teach-in). Nastavení navařovacích parametrů probíhá přes systémovou konzoli – skrze dotykový displej v kombinaci s hardwarovou klávesnicí.

Zásobník přídavného materiálu ve formě prášku, kterého pojme až 10 kg, zajišťuje za podpory hnacího plynu rovnoměrnou distribuci prášku přes hadičky, směšovač prášku až do plazmatronu. Dávkování lze kalibrovat prostřednictvím řídicího programu. Výrobce doporučena zrnitost prášku je 50 až 200  $\mu\text{m}$ .



↑ Obr. 7 Plazmové navařovací centrum PPC 250 R6 [22]

## ***Měřicí ústředna ALMEMO 5690-2M [23] [24]***

K měření teplotního pole byla použita programovatelná měřicí ústředna ALMEMO 5690-2M od německého výrobce, společnosti AHLBORN. Programování lze provádět prostřednictvím podsvětleného grafického displeje s rozlišením 128 × 128 bodů, nebo softwarem AMR-Control. „Měřené hodnoty jsou ukládány na MMC kartu s kapacitou min. 32 MB (6,4 mil. hodnot) ve standardním formátu FAT16.“ [24]

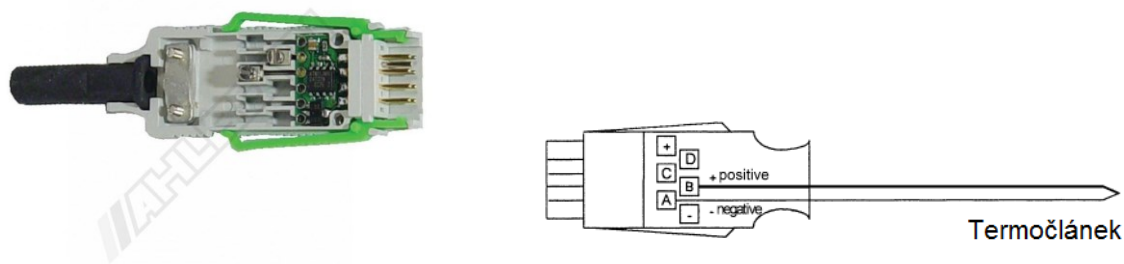


↑ Obr. 8 ALMEMO 5690

## ***Konektory NiCr-Ni (K) ALMEMO ZA 9020-FS Thermo E4 [25]***

Konektor pro připojení termočlánků k měřicí ústředně ALMEMO.

Měřicí rozsah -200 až +1 370 °C, rozlišení 0,1 K.



↑ Obr. 9 Konektor ALMEMO ZA 9020-FS [26] [25]

### ***Kabelové termočláanky MTC 12 (12-40-80-0) typu K (NiCr-Ni) [27]***

Kabelový termočlánek s neizolovaným měřicím spojem od společnosti Mavis Nový Bor s.r.o.

Třída přesnosti 2 dle ČSN EN 60 584:  $\pm 2,5$  °C, měřicí teplotní rozsah -40 až 1 200 °C.

Izolace GHGH oval – keramické vlákno  $2 \times 0,5$  mm, max. pracovní teplota + 600 °C, termoelektrický spoj bez izolace.

### ***Zařízení pro navařování termočláanků BT 2 [28]***

Zařízení slouží ke svařování termočláanků pomocí kondenzátorového výboje. Díky vestavěnému akumulátoru je svařování možné i v místech bez přívodu síťového napětí. Svařovat lze dráty a termočláanky do průměru 1,4 mm.

Zařízení pro navařování termočláanků BT 2	
Maximální průměr drátu	1,4 mm
Přibližný počet výbojů při plném nabití akumulátoru	800
Nabíjecí proud	150 mA
Napájecí napětí	230 V (AC)
Nabíjecí doba akumulátoru	cca 5 hodin
Rozměry	130 × 140 × 75 mm
Váha	2,5 kg
Krytí	IP 23
Pracovní poloha	libovolná



↑ Obr. 10 Zařízení pro navařování termočláanků BT 2 [28]

## 4.2 POSTUP MĚŘENÍ

Měření teplot během navařovacího procesu bylo provedeno na sedmi vzorcích. Pro každý vzorek byly nastaveny jiné navařovací parametry. Teploty byly měřeny pomocí termočlánků a zaznamenány v automatickém režimu ukládání měřící ústřednou. Na každý vzorek bylo použito deset termočlánků. Při volbě tloušťky podložky pro navařování bylo přihlédnuto k nutnosti zajistit neprotavení materiálu při navařování a zároveň dostatečnou rychlost odezvy termočlánků.

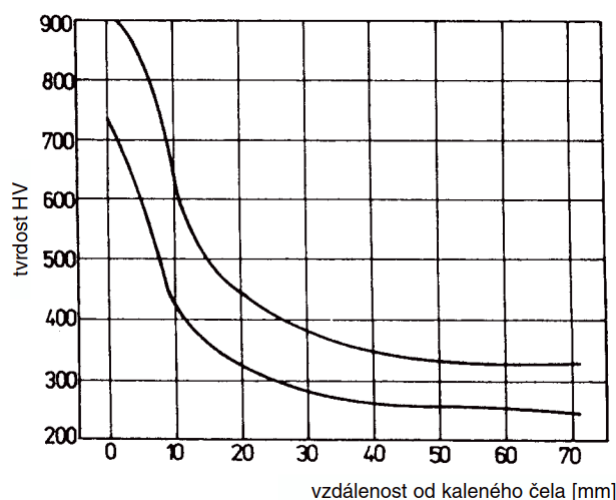
Z těchto důvodů byly jako vzorky pro navařování zvoleny destičky o rozměrech přibližně  $98 \times 12 \times 6$  mm. Za referenční základnu pro rozměření umístění navařovací housenky, rozmístění termočlánků a usazení vzorku do přípravku v pracovním prostoru navařovacího centra, byla zvolena nejdelší strana vzorku. Tato strana byla zbrušena do roviny.

Základním materiálem vzorků je ušlechtilá křemíko-chromová pružinová ocel ČSN 41 4260. Jeho svařitelnost byla před započítím vlastního měření ověřena experimentálně na několika pokusných vzorcích.

↓ Tab. 2 Vlastnosti materiálu ČSN 41 4260

Chemické složení ČSN 41 4260 (základní materiál) [hm. %] dle typického složení [29]							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,5–0,6	0,5–0,8	1,3–1,6	0,5–0,7	max. 0,5	max. 0,3	max. 0,035	max. 0,035

Chemické složení ČSN 41 4260 (základní materiál) [hm. %] dle RTG analýzy složení						
Fe	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu
96	0,6	0,5	≈ 2	0,6	0,05	0,1



↑ Diagram 3 Pás prokalitelnosti materiálu ČSN 41 4260

Jako přídatný materiál pro navařování byla použita rychlořezná ocel HSS 23 (ČSN skupina 19 8XX) ve formě prášku (Heat No. 255844)<sup>2</sup>, jehož chemické složení je uvedeno v následující tabulce (tabulka 3). Prášek byl získán od společnosti KSK, s.r.o., se sídlem v České Třebové. Zvolen byl s ohledem na předcházející měření a právě probíhající projekty v oblasti.

↓ Tab. 3 Chemické složení HSS 23

Chemické složení HSS 23 (přídatný materiál) [hm. %] dle analýzy [30]												
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	W	B	N	O	Fe
1,3	0,2	0,36	0,016	0,011	4,05	5,19	3,18	6,07	0,000 6	0,047	0,018	zůst.

Velikost zrn prášku se pohybuje v rozmezí 63–180  $\mu\text{m}$ . [30]

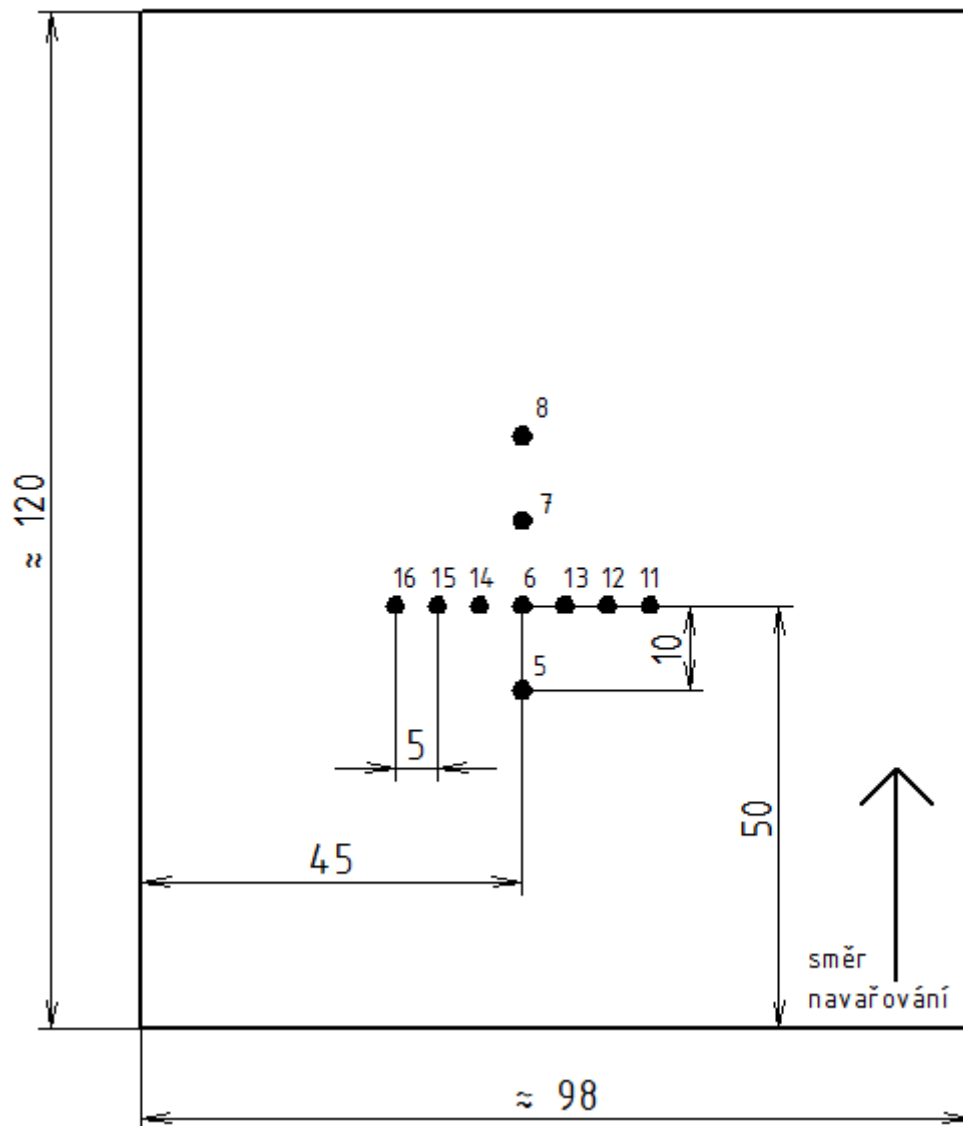


↑ Obr. 11 Prášek HSS 23 [31]

<sup>2</sup> V době psaní této práce byl tento prášek veřejně nedostupný.

Jako plazmový, podávací i ochranný plyn pro experiment byl použit argon 4.8 (značení odpovídá čistotě 99,998 %).

Součástí přípravy měření teplotního pole bylo umístění termočlánků. Na kovové destičky (vzorky) byla vyražena čísla sloužící pro jejich jednoznačnou identifikaci. Na očištěnou stranu vzorku bylo naznačeno maticové uspořádání poloh pro následné umístění termočlánků. Pozice byly odměřovány od zarovnané (referenční) strany vzorku. Rozestupy termočlánků činily příčně 5 mm a podélně 10 mm. Středový termočlánek byl umístěn ve vzdálenosti 45 mm od zarovnané hrany a 50 mm od „dolní“ hrany (viz obrázek 12). Po naznačení poloh následovala příprava a umístění termočlánků.

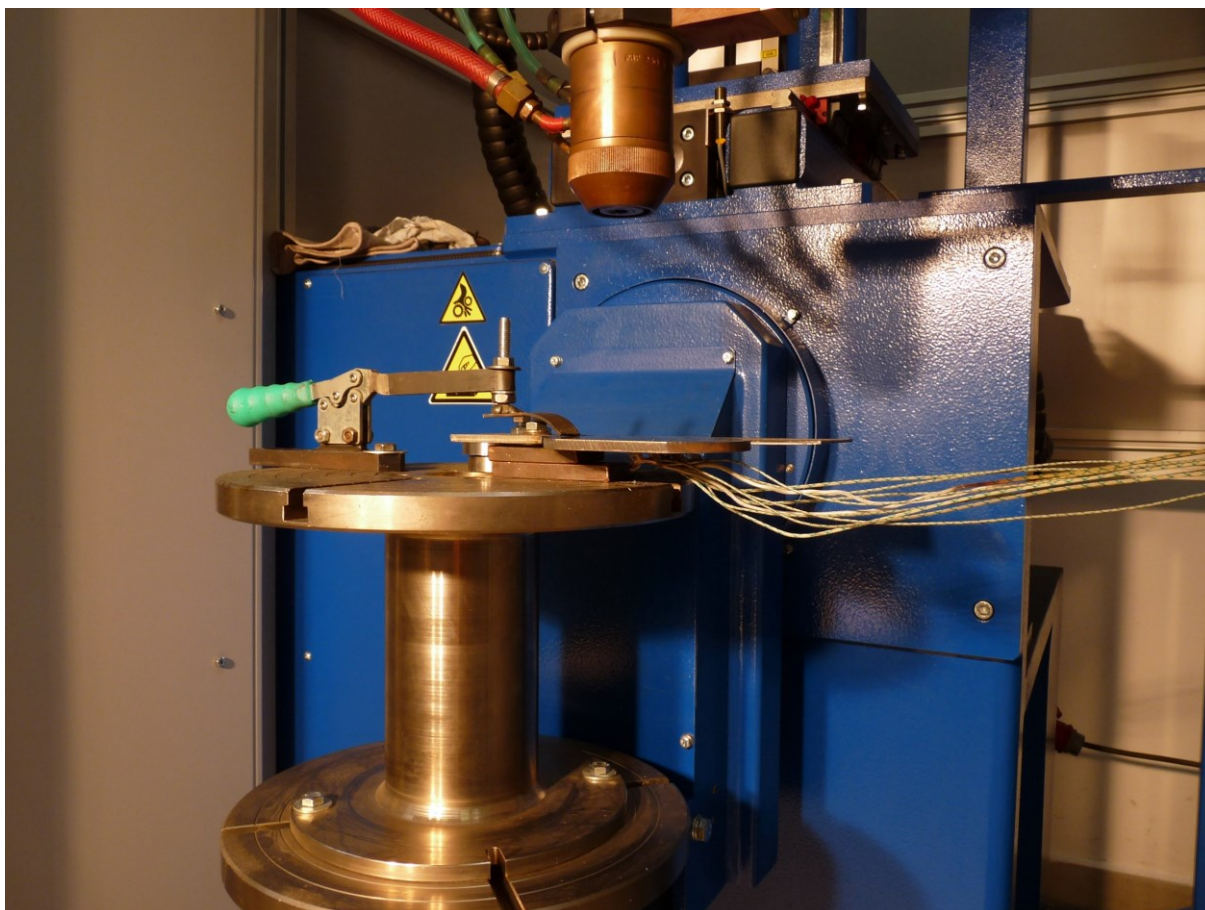


↑ Obr. 12 Schéma uspořádání termočlánků

Výroba termočlánků probíhala následovně: z konce termočlánekového vedení byla za pomoci odlamovacího nože, nebo jiného vhodného nástroje, odstraněna izolace v délce přibližně 10 mm. Izolaci je nutné odstranit jen v nezbytné míře, protože izolace je nepostradatelnou ochranou drátu tvořícího jádro vedení vůči teplotu z navařovacího procesu a vůči rušivým vlivům okolního prostředí. Na obnažených koncích drátů byl následně za pomoci grafitové elektrody vytvořen bodový svar charakteristického kulového tvaru. Tím vznikl termočlánek, který je schopen měřit teplotu.

V dalším kroku následovalo postupné umístění hotových termočlánků na připravené pozice na vzorku. Kvůli snadnější manipulaci se vzorkem, vytvoření pevného spojení, přesného a stabilního umístění a zajištění co nejlepšího kontaktu se základním materiálem vzorku, byly termočlánky připevněny bodovými svary. Ještě před přivařením termočlánků je vždy vhodné ověřit jejich funkčnost orientačním měřením a vizuální kontrolou, což bylo provedeno. Již během přivařování termočlánků bylo nutné dbát na jejich přesné umístění a zejména na kvalitu jejich spojení se základním materiálem. Umístění termočlánků musí zajistit pevný, kovový kontakt termočlánků s měřeným místem. Pevnost spojení je možné ověřit ohybem – správně připevněný termočlánek by neměl odpadnout. Termočlánky se také nesmí mezi sebou dotýkat, protože by to ovlivnilo měřené hodnoty. Po osazení všech termočlánků, srovnání vedení a vizuální kontrole vzorku byla termočláneková vedení připravena k zapojení do měřicí ústředny.

Následovalo založení vzorku s přivařenými termočlánky do upínacího přípravku v pracovním prostoru navařovacího centra a vizuální kontrola správnosti upnutí. Správné a pevné upnutí vzorku je důležité, kvůli zajištění jeho neměnné polohy během navařovacího procesu a také proto, aby byla navařovací housenka umístěna na předem definované místo, tj. do osy, ve které jsou umístěny termočlánky. Termočláneková vedení byla skrz vstupní konektory termočlánků propojena kompenzačním vedením s měřicí ústřednou. Obecně je doporučeno použití krátkých termočlánků. Poměrně dlouhá termočláneková vedení byla použita z důvodu nutnosti umístění měřicí ústředny vně pracovní komory stroje, aby se zabránilo jejímu poškození, rušení a také za účelem snížení rizika poškození kompenzačního vedení a citlivých konektorů.



↑ Obr. 13 Vzorek s termočlánky upnutý v pracovném prostoru stroje

Měřicí ústředna musela být během měření odpojena od elektrické sítě, tj. napájena jen vlastní baterií. Toto se ukázalo být důležité, protože v případě, že zůstala ústředna zapojena do sítě, docházelo k nežádoucímu rušení měřených signálů. Zaznamenané hodnoty byly ukládány na SD kartu. Měřicí ústředna byla nastavena tak, že teploty z termočlánků byly snímány v intervalu 0,16 s.

Před započítím navařování je ručním ovládním měřicí ústředny provedena kontrola nastavení, ověřena správnost zapojení termočlánků a jejich schopnost snímat teplotu, která v době kontroly odpovídá teplotě okolního prostředí. Pokud se naměřené teploty okolního prostředí z jednotlivých termočlánků od sebe takřka nelišily, byly termočlánky považovány za funkční a schopné správně měřit teplotu i během navařovacího procesu. Následovalo spuštění plazmového navařovacího automatu – zapnutí napájení, zapnutí přívodu svařovacího plynu, vyrovnání jeho tlaku, kontrola množství práškového přídavného materiálu v zásobníku, načtení a kontrola programu navařovacího procesu, kontrola trajektorie plazmového hořáku. Po spuštění pilotního oblouku a ustálení plamene bylo možné zahájit samotné navařovací práce.



Průběh navařování byl řízen automaticky na základě programu, zadaného prostřednictvím ovládacího terminálu plazmového navařovacího centra. Program obsahoval pokyn k navedení plazmového hořáku z výchozí polohy nad začátek návarové housenky, navaření materiálu v podélném směru od místa počátku, oddálení hořáku od základního materiálu a přejezd zpět do výchozí polohy. Navařování proběhlo bez předeřevu základního materiálu. V rámci experimentu byly pro jednotlivé vzorky měněny parametry programu – frekvence svařovacího proudu (viz. tabulka 4).

Zaznamenávání hodnot z termočlánků bylo spuštěno před zahájením navařovacího procesu a ukončeno bylo poté, co teplota vzorku klesla u všech termočlánků pod 200 °C. Hodnoty byly následně z SD karty přesunuty do počítače a importovány do tabulkového procesoru Microsoft Excel 2016, ve kterém byly dále zpracovány.

Tímto způsobem bylo realizováno měření první sady vzorků, kvůli zjištěným nedostatkům bylo nutno měření opakovat. Celkem byly zhotoveny tři sady vzorků, přičemž důkladnějšímu zkoumání byla podrobena pouze druhá sada vzorků.

Vzorky samotné byly po navaření zbaveny termočlánků, vizuálně prohlédnuty a fotograficky zdokumentovány. Pomocí pásové pily byly rozřezány tak, aby zůstala jen část s návarem. Cílem bylo zmenšit objemové rozměry destiček tak, aby se vešly do pracovního prostoru metalografické rozbrušovací pily a bylo je možné zpracovat do formy metalografických výbrusů.

Metalografické výbrusy návarů byly podrobeny zkoušce tvrdosti podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1). Měření bylo provedeno na mikrotvrdoměru Buehler IndentaMet 1104. Mikrotvrdot byla měřena v hloubce 1 mm od nejvyšší části povrchu návarové housenky, přičemž v této hloubce byly umístěny vždy alespoň tři vtisky na každou stranu od pomyslného středu (celkem minimálně 7 vtisků). Rozestupy vtisků činili maximálně 0,5 mm. Zatížení bylo nastaveno na hodnotu 1 K (1 kg) po dobu 11 sekund. Pro každý vtisk bylo odečteno několik hodnot, z nichž byl později vypočítán aritmetický průměr. Vtisky všech vzorků byly přeměřeny vedoucím práce. Zpracování hodnot bylo opět provedeno v aplikaci Microsoft Excel 2016.

Struktura materiálu návarů a jejich kvalita byly pozorovány mikroskopem, přičemž byly pořízeny jejich snímky.

## 5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A DISKUZE

Během experimentu byly navařeny tři sady vzorků.

### 5.1 PRVNÍ SADA VZORKŮ

První sada vzorků zhotovená při tomto experimentu odhalila běžná opotřebení částí plazmatronu, kvůli nimž bylo nutné experiment opakovat s novou sadou vzorků. Anoda plazmatronu byla opotřebovaná, což mělo za následek vznik nerovnoměrného návaru s hlubším závarem. Měření proto bylo neporovnatelné se vzorky zhotovenými v dřívější době (práce Moniky Boxanové).

Návarové housenky první sady vzorků byly v některých případech nerovnoměrné a skloněné na stranu. Snímky zhotovených metalografických výbrusů vytvořených návarů byly porovnány se snímky metalografických výbrusů zhotovených v dřívější době, zhruba rok před tímto experimentem. Tyto dříve zhotovené vzorky návarů byly vytvořeny obdobným postupem a s velmi podobnými parametry jako návary zhotovené při tomto experimentu. Předpokládalo se, že nové snímky budou zařaditelné mezi snímky dříve vytvořené a vytvoří ucelenou řadu. Velikost, tvar a průvar vzorků se však od dříve vytvořených vzorků lišily natolik, až byly téměř neporovnatelné a nezařaditelné, resp. netvořily očekávanou logickou řadu. Dospělo se k přesvědčení, že muselo dojít k ovlivnění měření něčím, s čím se při návrhu experimentu nepočítalo. Postupným zkoumáním bylo zjištěno, že příčinou bylo běžné opotřebení plazmatronu a porušení těsnosti přívodu ochranného plynu.

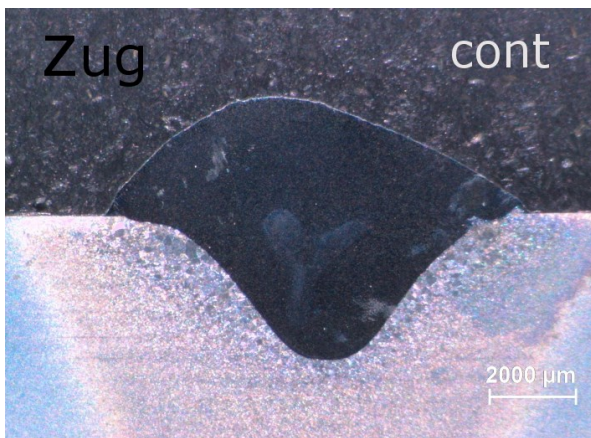


↑ Obr. 14 Opotřebená anoda (tryska) plazmatronu

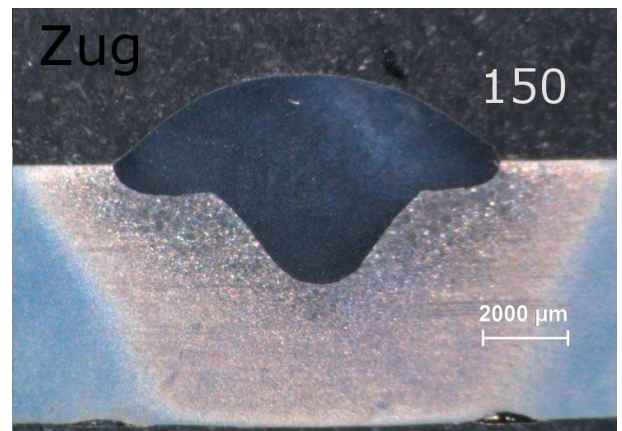
Během navařování bylo možné pozorovat odklon proudu plazmatu, podobný foukání oblouku<sup>3</sup>. Během zhruba ročního provozu došlo k postupnému propálení otvoru anody na průměr cca 4 mm. To zapříčinilo rozdílnou a nerovnoměrnou distribuci tepla do materiálu a tím i nerovnoměrný sklon návarové housenky (patrný např. na obrázku č. 15) a změnu tvaru návaru. Tato situace se v technické praxi běžně řeší výměnou anody, což bylo provedeno i v tomto případě.

---

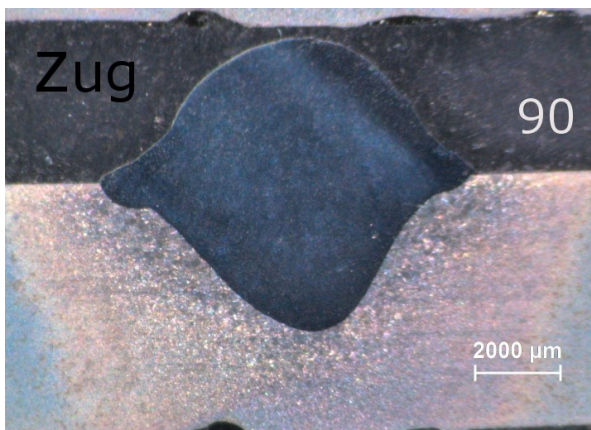
<sup>3</sup> Foukání oblouku – odklon elektrického oblouku vlivem magnetických polí. Dochází při něm k ohřevu jiného místa, než kam dopadá roztavený kov.



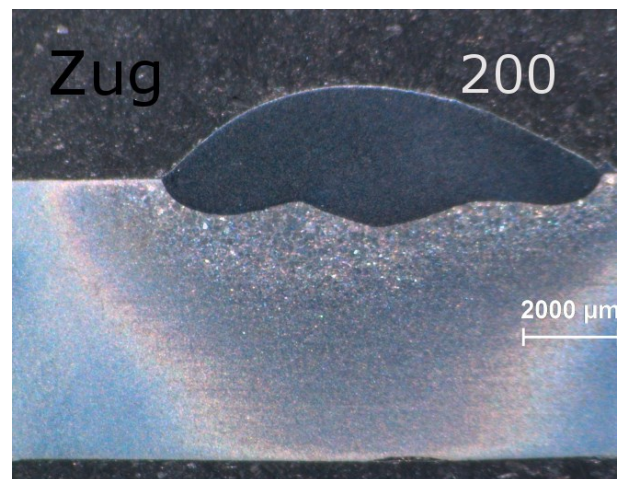
↑ Obr. 15 Snímek návaru – kontinuální navařování



↑ Obr. 17 Snímek návaru – 150 Hz



↑ Obr. 16 Snímek návaru – 90 Hz



↑ Obr. 18 Snímek návaru – 200 Hz

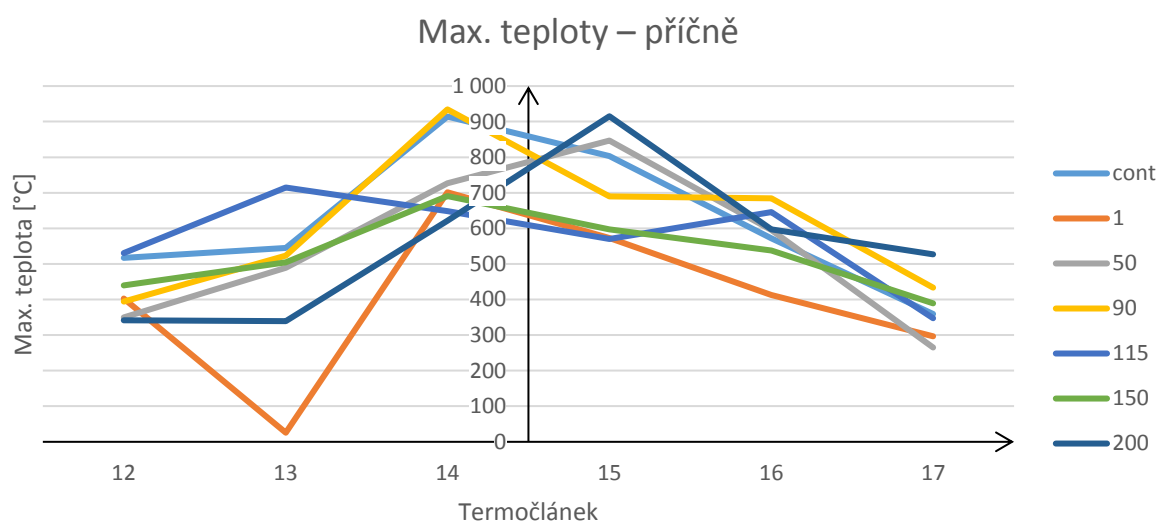
Snímky metalografických výbrusů návarů ukazují, že se zvyšující se frekvencí došlo k menšímu průvaru a menšímu promísení návarového kovu se základním materiálem. Patrná je také jemnější struktura v tepelně ovlivněné oblasti okolo návaru. Rozdílný tvar návaru byl zapříčiněn zejména opotřebenou anodou.

## 5.2 DRUHÁ SADA VZORKŮ

Měření teplotního pole bylo opakováno s novou sadou vzorků, se stejnými parametry (viz. tabulka 4) jako v případě první sady vzorků.

↓ Tab. 4 Parametry 2. sady vzorků

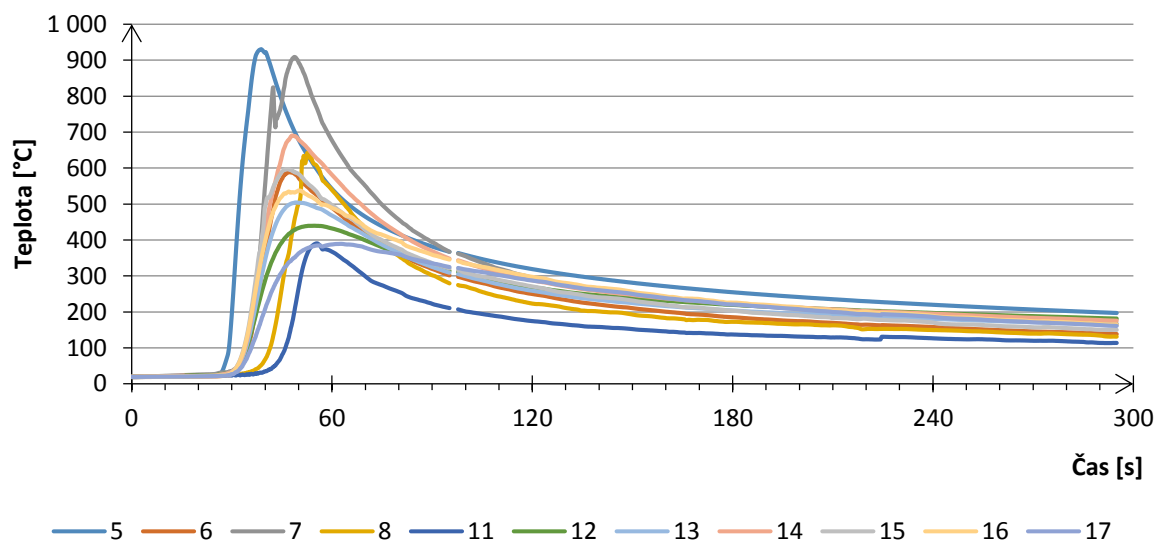
Vzorek	Frekvence [Hz]	Pulzní navařovací proud [A]	Rychlost posuvu	Rychlost podávání
1	cont	160/konst.	2,5 mm/s	15 g/min
2	1	240/80		
3 s	50			
4	90			
5	115			
6	150			
7	200			



↑ Graf 1 Maximální teploty příčného řezu návarovou housenkou

Na grafu č. 1 jsou vidět naměřené maximální teploty pro pozice v příčném směru návarové housenky. Vzorky navařené pulzním navařovacím proudem vykazují v průměru nižší teploty než vzorek navařený v kontinuálním režimu. Patrná je také porucha termočláneku č. 13 u vzorku č. 2 (1 Hz).

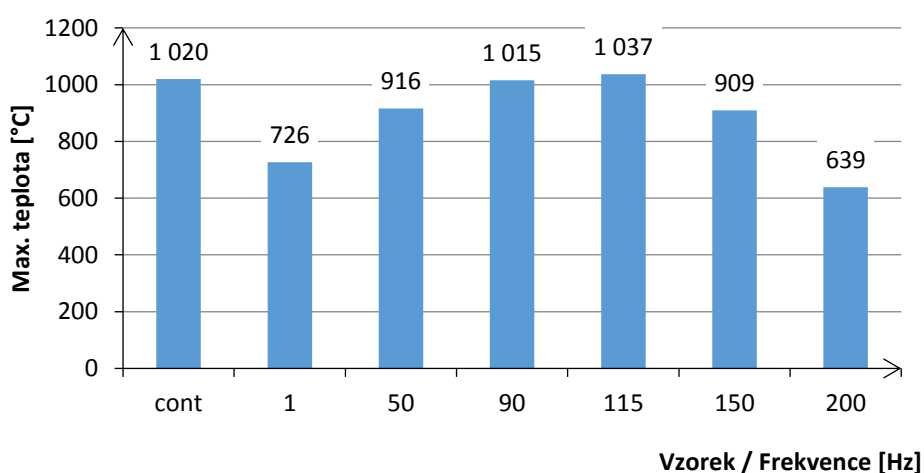
## Průběh teplot – 150 Hz



↑ Graf 2 Průběh teplot vzorku 150 Hz

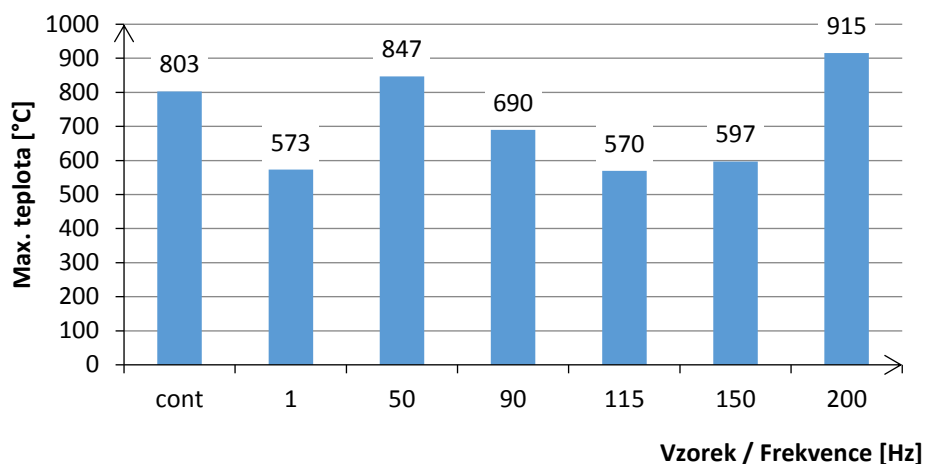
V grafu č. 2 je u všech termočláneků patrný rychlý nárůst teploty na maximální teplotu. Výsledky měření pomocí termočláneků se ukázaly být nespolehlivé. Ku příkladu v grafu č. 2 se porucha záznamu projevila přerušenými křivkami. Navzdory pečlivé přípravě, některé termočláanky během měření přestaly měřit či zaznamenávaly „nesmyslné“ hodnoty, nepoužitelné pro následné zpracování. Akceptovatelné jsou pouze hodnoty z termočláneků umístěných na pozici č. 7 a č. 15.

## Max. teploty – termočlánek č. 7



↑ Graf 3 Maximální teploty naměřené termočlánekem č. 7 v závislosti na frekvencích

## Max. teploty – termočlánek č. 15



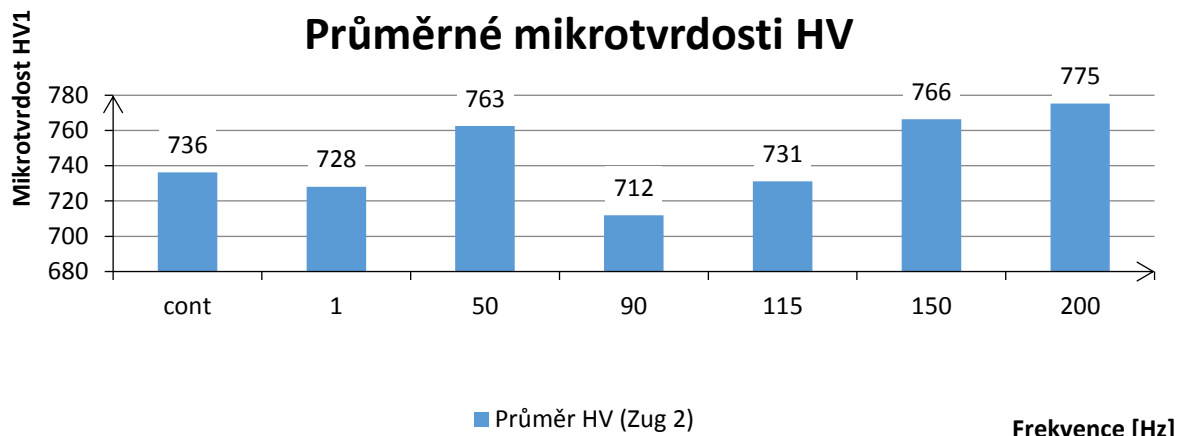
↑ Graf 4 Maximální teploty naměřené termočlánekem č. 15 v závislosti na frekvencích

Rozložení max. teplot naměřených termočlánekem č. 15 (viz graf 4) částečně odpovídá grafickému znázornění hodnot zjištěných mikrotvrdostí (viz tabulka 5).

V rámci experimentu byla změřena mikrotvrdost vzorků v příčných řezech návarovou housenkou. Naměřené mikrotvrdosti všech vzorků (2. sada) jsou uvedeny v následující tabulce.

↓ Tab. 5 Naměřené mikrotvrdosti vzorků

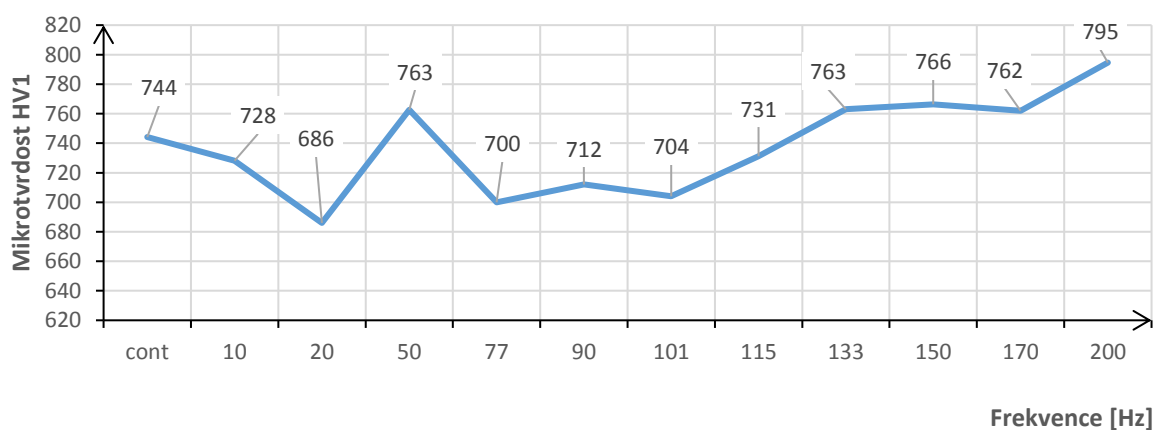
Vzorek	Frekvence [Hz]	Průměrná mikrotvrdost HV1
1	cont	736
2	1	728
3 s	50	763
4	90	712
5	115	731
6	150	766
7	200	775



↑ Graf 5 Průměrné hodnoty mikrotvrdotí jednotlivých vzorků

Porovnáním těchto mikrotvrdotí s pásem prokalitelnosti základního materiálu oceli ČSN 41 4260 lze zjistit, že u vzorků došlo k nárůstu tvrdosti vlivem prokalitelnosti materiálu během navařovacího procesu. Na grafu č. 5 je vidět, že nejvyšších mikrotvrdotí bylo dosaženo při vyšších frekvencích svařovacího proudu. Získané hodnoty mikrotvrdotí byly doplněny o hodnoty z předchozích měření Moniky Boxanové a byly zpracovány do grafické podoby (viz graf 6).

### Závislost mikrotvrdoti HV na frekvenci navařovacího proudu



↑ Graf 6 Závislost průměrné mikrotvrdoti HV na frekvenci navařovacího proudu – 2. sada vzorků doplněná o hodnoty z předcházejících měření Moniky Boxanové

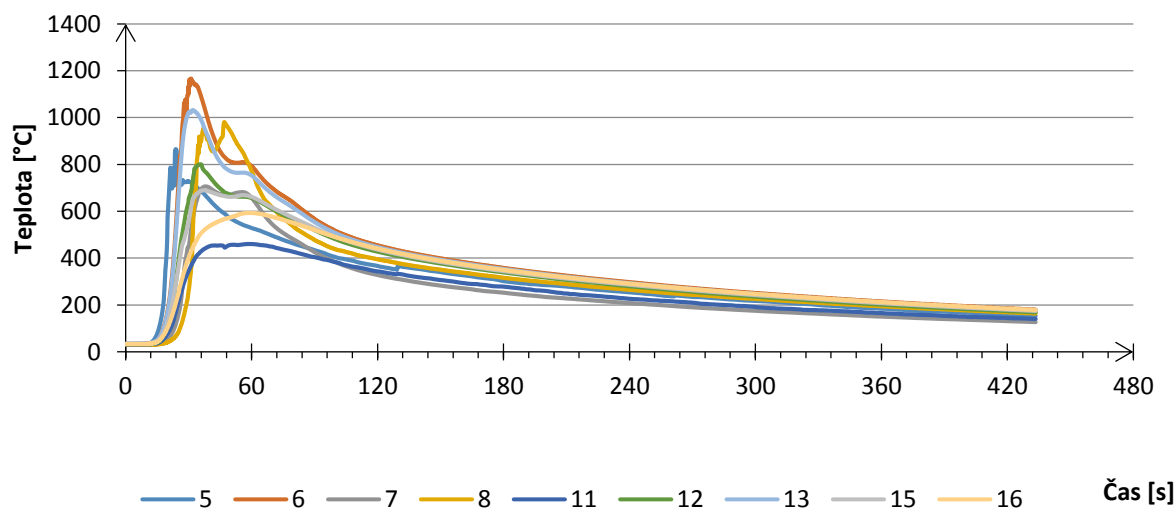
Na grafu č. 6 je patrný nárůst mikrotvrdoti návarů v závislosti na použité frekvenci. Od frekvenčního pásma mezi 20 a 77 Hz lze pozorovat rostoucí průměrnou mikrotvrdot vzorků. Pro frekvenci 50 Hz je naměřená hodnota průměrné mikrotvrdoti značně vyšší než okolní hodnoty.



### 5.3 TŘETÍ SADA VZORKŮ

Navaření třetí sady vzorků bylo realizováno během experimentu prováděného v rámci bakalářské práce kolegy Jakuba Křížka. Navařování bylo prováděno se stejnými parametry, jaké byly použity při pracích na předchozích sadách vzorků. Délka návaru a trajektorie plazmového hořáku však byly upraveny a přizpůsobeny odlišným rozměrům zkušebních vzorků (destiček), které činily  $94 \times 67 \times 5$  mm. Návarová housenka byla lehce kratší a umístěná blíže k okrajům destičky, avšak rozmístění termočlánků bylo zachováno. Rozestupy činily 5 mm příčně a 10 mm podélně. Vzdálenost středního termočlánku od delší hrany byla 34 mm, od kratší 54 mm. Do konečné fáze navařovacího procesu byl navíc zařazen přejezd hořáku od konce housenky zpět na její začátek, tj. navaření druhé vrstvy. To se projevilo ve způsobu distribuce tepla. Zpracování naměřených hodnot a jejich vyhodnocení ukázalo, že spolehlivost naměřených hodnot se vůči předchozím sadám vzorků nezlepšila. Počet chybně měřících termočlánků se dokonce zvýšil.

#### Průběh teplot – 150 Hz



↑ Graf 7 Průběh teplot vzorku 150 Hz – třetí sada

Teplotní cyklus vzorku z třetí sady navařeného při frekvenci 150 Hz je znázorněn na grafu č. 7. Teploty zaznamenané termočlánkem na pozici 14 nejsou v grafu zobrazeny, kvůli poruše termočlánku. Přejezd hořáku z konce návaru se projevil opětovným zvýšením teploty a zpomaleným dochlazením. Průměrná maximální teplota se oproti vzorku ze druhé sady zvýšila přibližně o 200 °C, což by mohlo souviset s odlišnými rozměry vzorku.

## 6 ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ

Cílem bakalářské práce bylo seznámení s měřením teploty termočlánky a termokamerou, seznámení s technologií navařování plazmatem, vlivem navařovacích parametrů na teplotní pole a provedení porovnávacího měření. Teoretická část byla věnována problematice měření teploty, teplotnímu poli a teplotním cyklům při svařování. Další část řešerše se zabývala technologií navařování plazmatem. Nabyté poznatky o dané technologii a o měření teploty pomocí termočlánků byly následně využity při experimentu. Původním záměrem bylo provést měření teplotního pole nejen termočlánky, ale také termokamerou. Vzhledem ke složitosti a rozsahu experimentálních prací při měření termočlánky však bylo nemožné uskutečnit spolehlivé a porovnatelné měření termokamerou.

V experimentální části byl zkoumán vliv navařovacích parametrů na teplotní pole. Zhotoveny byly celkem tři sady vzorků. Zpracování a vyhodnocení dat získaných při měření termočlánky se ukázalo býti problematické kvůli jejich nespolehlivosti. Zvýšenou pozornost je třeba věnovat správnému upevnění termočlánků a odstínění celého termočlánekového vedení. Navzdory nespolehlivosti dat byl potvrzen předpoklad, že různé frekvence navařovacího proudu mají vliv na tepelné ovlivnění materiálu a podobu návaru. Při navařování pulzními režimy byly naměřené max. teploty nižší než v případě navařování kontinuálním režimem.

Provedeno bylo také měření mikrotvrdosti návarů, při němž byla zjištěna souvislost změn struktury vyvolaných vysokými teplotami s frekvencemi navařovacího proudu. Makrostruktura materiálu a kvalita návarů byla prozkoumána mikroskopem. Návary zhotovené navařováním v pulzním režimu při vyšších frekvencích vykazaly vyšší mikrotvrdost než v případě navařování kontinuálním režimem.

## 7 ZDROJE INFORMACÍ

- [1] KOLAŘÍK, Ladislav. Technologie svařování: Úvodní přednáška. In: *Ústav strojírenské technologie, ČVUT v Praze* [online]. Praha: Ústav strojírenské technologie, ČVUT v Praze, 2015 [cit. 2016-11-16]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/predmety/detail/111>
- [2] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [3] VEVERKA, Jan. Svařování mikroplasmou. *Omnitech: Sortiment svařovací techniky a služby* [online]. Tetčice: OMNITECH spol. s r.o., b.r. [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: [http://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani\\_mikroplasmou.html](http://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani_mikroplasmou.html)
- [4] ZIMMERMAN, Andrew. Temperature Definition in Science. In: *ThoughtCo* [online]. ThoughtCo, 2017 [cit. 2017-07-24]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/temperature-definition-in-science-2699014>
- [5] ISBN 92-822-2108-3. *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*. Luisant, Francie: Consultative Committee for Thermometry (CCT), 1989.
- [6] MÁŠOVÁ, Pavla. *Možnosti regulace vneseného tepla – experimentální ověření* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-08-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/18948>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ladislav Daněk.
- [7] NĚMEC, Karel. *Vliv vneseného tepla na vlastnosti a strukturu svarového spoje duplexní oceli*. Brno, 2010. Dostupné také 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. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ladislav DANĚK.

- [8] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Seebeckův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. Praha: Jaroslav Reichl a Martin Všeticka, 2017 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [9] *ThermocoupleInfo: Reotemp Instruments* [online]. San Diego: REOTEMP Instrument Corporation, 2011 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://www.thermocoupleinfo.com/>
- [10] SOPKO, Bruno, Ladislav SAMEK a František ČERNÝ. *Fyzika II*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3194-2.
- [11] Thermocouple circuit Ktype including voltmeter temperature: File:Thermocouple circuit Ktype including voltmeter temperature.svg. In: *Wikimedia Commons* [online]. San Francisco: Nanite, 2014 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/Thermocouple\\_circuit\\_Ktype\\_including\\_voltmeter\\_temperature.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/Thermocouple_circuit_Ktype_including_voltmeter_temperature.svg)
- [12] Thermocouple Temperature Limit: Thermocouple Temperature Limit Comparison. In: *Reotemp Instruments* [online]. San Diego: REOTEMP Instrument Corporation, 2011 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://www.thermocoupleinfo.com/images/limit-comparison.jpg>
- [13] Thermocouple K (2). In: *Wikimedia Commons: File:Thermocouple K (2).jpg* [online]. San Francisco: Harke, 2009 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Thermocouple\\_K\\_%28%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Thermocouple_K_%28%29.jpg)
- [14] GRUNER, Klaus-Dieter. *The Principles of Noncontact Temperature Measurement: Infrared Theory* [online]. Raytek, 2016, (102016555141) [cit. 2017-07-29]. Dostupné z: [http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/9250315\\_ENG\\_D\\_W.PDF](http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/9250315_ENG_D_W.PDF)
- [15] GRUNER, Klaus-Dieter. Vyzařovací charakteristiky černého tělesa v závislosti na jeho teplotě. In: *QTEST: měřící a přístrojová technika* [online]. Nový Bydžov: QTEST, 2014 [cit. 2017-07-29]. Dostupné z: [http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/img/princip-mereni/teorie\\_fig03.gif](http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/img/princip-mereni/teorie_fig03.gif)

- [16] Planck's radiation law. In: *Encyclopædia Britannica* [online]. Encyclopædia Britannica, 2016 [cit. 2017-07-30]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/Plancks-radiation-law>
- [17] SOVA, Jan. Konstrukce termokamery. In: *Termokamera* [online]. Praha: Workswell, 2011 [cit. 2017-07-30]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [18] D'OLIVEIRA, A.S.C.M., R.S.C. PAREDES a R.L.C. SANTOS. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2006, **171**(2), 167-174 [cit. 2017-07-29]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.269. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605006448>
- [19] PLAZMOVÉ NAVAŘOVÁNÍ (PTA - Plasma Transferred Arc). *Servis armatur* [online]. Paskov: Servis armatur, 2012 [cit. 2017-07-30]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=plasma-powder-surfacing>
- [20] KSK – Plazmové navařovací automaty: PPC 250 R6. *KSK – Plazmové navařovací automaty: PPC 250 R6* [online]. Česká Třebová, Česká Republika: KSK, s.r.o., 2016 [cit. 2016-11-16]. Dostupné z: <http://www.kskct.cz/plazmove-automaty/>
- [21] PPC 250 R3,5,6: Develop Ineo+224e-20150721113252. In: *KSK – Plazmové navařovací automaty: PPC 250 R6* [online]. Česká Třebová, Česká Republika: KSK, s.r.o., 2016 [cit. 2016-11-16]. Dostupné z: <http://ksk.stario.cz/wp-content/uploads/2016/03/PPC-250-R356.pdf>

- [22] PPC 250 R 6. In: *KSK – Plazmové navařovací automaty: PPC 250 R6* [online]. Česká Třebová: KSK, s.r.o., 2016 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.kskct.cz/wp-content/uploads/2014/12/PPC-250-R-6.jpg>
- [23] Data acquisition system ALMEMO® 5690-2M: Operating instructions, v4.0. In: *ALMEMO 5690-2M měřicí ústředna až se 100 univerzálními měřicími vstupy: ALMEMO® 5690* [online]. Praha: AHLBORN měřicí a regulační technika spol. s r.o., 2012 [cit. 2016-11-16]. Dostupné z: <http://www.ahlborn.com/download/anleitung/eng/56902e.pdf>
- [24] MĚŘICÍ ÚSTŘEDNA ALMEMO 5690-2M. In: *Ahlborn: ALMEMO 5690-2M měřicí ústředna až se 100 univerzálními měřicími vstupy* [online]. Praha: AHLBORN měřicí a regulační technika s.r.o., 2009 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: <http://www.ahlborn.cz/out/pictures/wysiwigpro/ALMEMO%205690-2M-bc.pdf>
- [25] Input connectors and adapter cables: ALMEMO® Connector for Thermocouple Types K, N, J, T. In: *ALMEMO® Connecors for temperature* [online]. Ahlborn, 2016 [cit. 2017-07-24]. Dostupné z: <http://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap02/eng/Thermoe.pdf>
- [26] Vstupní ALMEMO-konektor pro termočlánky K. In: *AHLBORN* [online]. Praha, b.r. [cit. 2017-07-24]. Dostupné z: <http://www.ahlborn.cz/out/pictures/z1/196za9020fs.jpg>
- [27] MTC12 Termočlánky kabelové – Datový list: Měřicí a regulační technika MAVIS Nový Bor s.r.o. In: *Mavis Nový Bor – měřicí, regulační a kalibrační technika: MTC 12 – kabelové termočlánky* [online]. Nový Bor: MAVIS Nový Bor s.r.o., 2016 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: [http://www.mavis.cz/download.php?group=produkty1\\_soubory&id=149](http://www.mavis.cz/download.php?group=produkty1_soubory&id=149)
- [28] Svartservis group – Příslušenství: Zařízení pro navařování termočlánků BT 2. *Svartservis group* [online]. Ostrava: Svartservis group, 2010 [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: <http://www.svartservis.cz/produkty-prislusenstvi.php>

- [29] ČSN 41 4260. *Ocel 14 260 Si-Cr*. Úřad pro normalizaci a měření, 1988. Dostupné také z: [http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled\\_normy.php?norma=414260-csn-41-4260&kat=27348](http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled_normy.php?norma=414260-csn-41-4260&kat=27348)
- [30] *Inspection certificate EN 10204-3.1: Inspection certificate/Delivery note no.: 45007/1*. Česká Třebová: KSK s.r.o., 2015.
- [31] ROHAN, Pavel, Tomáš KRAMÁR a Jaroslav PETR. HSS DEPOSITION BY PTA – FEASIBILITY AND PROPERTIES. In: *Advances in Science and Technology Research Journal* [online]. Praha, 2016, **10**(29), s. 57-61 [cit. 2017-06-21]. DOI: 10.12913/22998624/61933. ISSN 2080-4075. Dostupné z: <http://www.journalssystem.com/astj/HSS-DEPOSITION-BY-PTA-FEASIBILITY-AND-PROPERTIES,61933,0,2.html>

Citace zpracovány aplikací Citace PRO verze 3.3.0, dostupné z: <https://www.citacepro.com>

## Seznam obrázků

Obr. 1 Příklad průběhu teplotních cyklů.....	7
Obr. 2 Vliv teplotního cyklu na strukturu svarového spoje.....	8
Obr. 3 Schéma obvodu termočlásku typu.....	10
Obr. 4 Porovnání teplotních limitů různých typů termočlásků.....	11
Obr. 5 Termočlásek typu K s malým konektorem ALMEMO.....	11
Obr. 6 Schéma konstrukce plazmatronu pro metodu PTA.....	17
Obr. 7 Plazmové navařovací centrum PPC 250 R6.....	19
Obr. 8 ALMEMO 5690.....	20
Obr. 9 Konektor ALMEMO ZA 9020-FS.....	20
Obr. 10 Zařízení pro navařování termočlásků BT 2.....	21
Obr. 11 Prášek HSS 23.....	23
Obr. 12 Schéma uspořádání termočlásků.....	24
Obr. 13 Vzorek s termočlásky upnutý v pracovním prostoru stroje.....	26
Obr. 14 Opatřebená anoda (tryska) plazmatronu.....	29
Obr. 15 Snímek návaru – kontinuální navařování.....	30
Obr. 16 Snímek návaru – 90 Hz.....	30
Obr. 17 Snímek návaru – 150 Hz.....	30
Obr. 18 Snímek návaru – 200 Hz.....	30