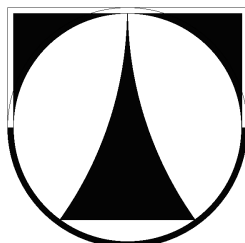


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie



**MONITOROVÁNÍ SVAŘOVACÍCH PARAMETRŮ U
METODY SVAŘOVÁNÍ MAG JAKO PROSTŘEDEK
ZAJIŠTĚNÍ KVALITY SVARU**

Disertační práce

Doktorand:	Ing. David Hrstka
Školitel:	doc. Ing. Heinz Neumann, CSc.
Vedoucí katedry:	prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Liberec, 2010



Poděkování:

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ing. Heinzi Neumannovi, CSc., za cenné rady, odborné diskuze a vedení v průběhu celého doktorského studia.

Děkuji také Ing. Zdeňkovi Hudcovi, Ph.D., za konzultace při řešení dizertační práce.

ANOTACE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce je zaměřena na analýzu vztahu veličin svařovacího procesu a kvality svaru u metody svařování 135. Na základě dat získaných monitorovacím systémem WeldMonitor je posuzována možnost predikce vad a nestability svařovacího procesu při vytváření koutových svarů. V práci je uveden metodický postup pro určování kvality svarových spojů na základě naměřených svařovacích veličin. Tyto postupy jsou následně ověřeny při realizaci experimentálních zkoušek. Výsledná data jsou vyhodnocena a jsou stanoveny regulační meze pro stabilitu svařovacího procesu s použitím Shewhartových regulačních diagramů. Uvedené metodické postupy lze použít pro stanovení a optimalizaci svařovacích procesů a zajistit tak kvalitu svarových spojů v souladu s platnými normami.

Teoretická část práce se věnuje především technologii obloukového svařování tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře, vlivu dílčích parametrů a podmínkám stability svařovacího procesu. Jsou uvedeny základní poznatky o systému jakosti v procesu svařování a postupy pro zabezpečování jakosti svarů. V této části práce je popsán i monitorovací systém WeldMonitor.

Experimentální část práce je zaměřena na získání a vyhodnocení průběhu naměřených veličin za daných podmínek a faktorů ovlivňujících kvalitu svarového spoje. Je především sledován a hodnocen vliv vzdálenosti kontaktní špičky od povrchu základního materiálu a určena kritická rychlost svařování. Je zde uvedena metodika experimentálních zkoušek a metodické postupy vyhodnocení jejich výsledků včetně analýzy svařovacích parametrů a metalografických výbrusů realizovaných svarů.

Analýza časových průběhů veličin svařovacích procesů z monitorovacího systému WeldMonitor umožnila teoretické zdůvodnění projevů nestability svařovacího procesu. Získané teoretické poznatky a praktické závěry jsou aplikovatelné jako prostředek pro zajištění kvality svarových spojů.

Klíčová slova: Svařovací proces, kvalita svaru, monitorovací systém, MAG, regulační diagram

DISSERTATION THESIS ANNOTATION

The present thesis focuses on the analysis of the relation between quantities of the welding process and weld quality during 135 welding method. A possibility of detection defects and instability of the welding process during fillet welds production is tested on the basis of the acquired input data from WeldMonitor programme. The thesis presents a methodical procedure for the determination of welds quality on the basis of measured welding quantities. These procedures are then verified by experimental tests. Resulting data are evaluated and regulation limits for the stability of a welding process by using Shewhart regulation diagrams are set. The given methodical procedures may be used to determine and optimise welding processes and thus to ensure welds quality in compliance with valid standards.

The theoretical part of the thesis mainly deals with the technology of arc welding process by melting electrode in active shield atmosphere, the influence of sectional parameters, and with stability conditions of welding process. It presents primary knowledge about quality system during welding process, as well as procedures to ensure weld quality. This section also describes the monitoring system WeldMonitor.

The experimental part focuses on the acquisition and evaluation of the measured quantities curves at given conditions, as well as factors which influence the quality of a weld joint. This section mainly monitors and evaluates the influence of the contact tip distance from the basic material surface and determinates the critical welding rate. It also lists the methodology of experimental tests and methodical procedures for the evaluation of their results, including the analysis of welding parameters and scratch patterns of the performed welds.

Time curves analysis of the quantities of a welding process by WeldMonitor monitoring system facilitated the theoretical reasoning concerning the welding process instability manifestation. The acquired theoretical knowledge as well as the practical results can be applied as an instrument to ensure the quality of weld joints.

Keywords: welding process, weld quality, monitoring system, GMAW, regulation diagrams



OBSAH

I. ÚVOD	10
II. Rešeršní část	13
1. Úvod	13
1.2 Historie obloukových metod svařování	13
2. Svařování metodou MAG (GMAW)	14
2.1 Přenos tekutého kovu při svařování v ochranných atmosférách.....	15
2.2 Svařovací proud, rychlost drátu	16
2.3 Výlet drátu, délka oblouku, vzdálenost kontaktní špičky	17
2.4 Napětí.....	18
2.5 Synergie	19
3. Rozbor podmínek stability procesu.....	19
3.1 Řídící síly přenosu kovu obloukem, statická teorie rovnováhy	20
3.2 Spojitá simulace dynamického chování MAG systému	21
3.3 Dynamická charakteristika zdroje.....	23
3.4 Vliv ochranného plynu.....	24
3.5 Vliv druhu materiálu	25
3.6 Oblasti stability procesu (ocel)	25
4. Moderní trendy obloukového svařování.....	27
4.1 Tandemové MAG svařování dvěma dráty	27
4.2 CMT proces	27
4.3 Kombinované svařování „Laserhybrid“	28
4.4 Svařovací proces s vysokovýkonným obloukem (ForceArc)	29
5. Nestabilita svařovacího procesu	30
5.1 Periodická nestabilita tavení a velikosti svarové lázně „Humping efekt“	30
5.2 Vliv ochranného plynu na periodickou nestabilitu tavení a velikosti svarové lázně	32



6. Proces svařování v systému jakosti	33
6.1 Vizuální kontrola svarů.....	35
6.2 Klasifikace geometrických vad.....	36
6.3 Určování stupňů kvality	37
7. Principy statistických metod zabezpečování jakosti.....	40
7.1 Základní typy regulačních diagramů	40
8. Monitorování a záznam veličin svařovacího procesu	44
8.1 Monitorovací systém WeldMonitor	44
8.2 Nové studie monitorování svařovacích procesů	48
8.2.1 Studie aplikace akustických signálů pro monitorování obloukového svařování...48	
8.2.2 Analýza optického spektra plazmy elektrického oblouku	50
8.2.3 Termografie pro on-line detekci vad svarových spojů	51
9. Dílčí výsledky a predikce experimentů	54
10. Plánování programu experimentů.....	67
10.1 Taguchiho metoda [41,42]	67
10.2 Metoda středové kompozice	68
10.3 Heuristické metody	69
11. Shrnutí teoretické části.....	69
11. Cíle disertační práce	70
12. Realizace cílů disertační práce.....	71
13. Studium vlivu výletu drátu na stabilitu procesu svařování	73
13.1 Proměnné svařovací parametry.....	73
13.2 Vyhodnocení metalografických výbrusů	75
13.3 Aplikace regulačních diagramů	76
13.4 Výsledky experimentů	82
13.5 Nestabilita svařovacího procesu na konci vzorku.....	94
13.6 Zhodnocení výsledků experimentů při studiu vlivu výletu drátu	96
14. Stanovení kritické rychlosti svařování.....	97
14.6. Mechanismus vzniku dutin ve svarovém kovu při kritické rychlosti svařování	111



15. Vědecký přínos pro rozvoj technologických oborů	116
16. Závěr	118
17. Literatura použitá k řešení	120
Příloha č. 1	125
Příloha č. 2	139
Příloha č. 3	142
Příloha č. 4	145

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

MIG, MAG, GMAW(135)	metody svařování drátem v ochranném plynu	
TIG, GTAW (141)	svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu	
CTWD	vzdálenost kontaktní špičky od povrchu základního materiálu	[mm]
DOE	Design of Experiments (návrh experimentů)	
CL	centrální přímka regulačního diagramu	
UCL	horní mez regulačního diagramu	
LCL	dolní mez regulačního diagramu	
WPS	specifikace postupu svařování	
pWPS	předběžná specifikace postupu svařování	
WPQR	protokol o kvalifikaci postupu svařování	
CMT	přenos studeného kovu	
U	svařovací napětí	[V]
U_0	napětí naprázdno	[V]
I	svařovací proud	[A]
R	elektrický odpor	[Ω]
v_d	rychlost podávání drátu	[m.min ⁻¹]
v_s	rychlost svařování	[m.min ⁻¹]
v_f	rychlost plynu	[m.s ⁻¹]
L	výlet drátu	[mm]
L_0	délka oblouku	[mm]
F_G	gravitační síla	[N]
F_γ	síla povrchového napětí	[N]
ρ	hustota	[kg.m ⁻³]
J	proudová hustota	[A.m ⁻²]
B	magnetická indukce	[T]
Fem	elektromagnetická síla	[N]
γ	povrchové napětí	[N.m]
R	poloměr kapky	[mm]
g	tíhové zrychlení	[m.s ⁻²]
F_s	aerodynamická síla plynu	[N]
C_D	aerodynamický koeficient	[-]
A_p	projekční plocha na ploše rovnoběžně s tokem kapaliny	[mm ²]
q	elektrický náboj	[C]
v	rychlost náboje	[m.s ⁻¹]
P_C	celková plocha svaru	[mm ²]
P_N	plocha návaru	[mm ²]



P_p	plocha dutiny ve svarovém kovu	[mm ²]
r	převýšení svaru	[mm]
a	výpočtová tloušťka koutového svaru	[mm]
z	hloubka závaru	[mm]
v	výška svaru	[mm]
w	šířka svaru	[mm]
b	odvėsna trojúhelníku	[mm]
c	odvėsna trojúhelníku	[mm]
σ	směrodatná odchylka	[-]
R	rozptyl výběru	[-]
Me	medián	[-]

I. ÚVOD

Svařování elektrickým obloukem je jedním z klíčových procesů v průmyslové výrobě. Ve strojírenství je svařování elektrickým obloukem za montáží a obráběním třetí největší technologická oblast. Zvláště pak dva druhy svařovacích procesů, svařování elektrickým obloukem odtavující se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře označenou evropskou zkratkou MAG a svařování elektrickým obloukem netavící se elektrodou v inertní atmosféře, označenou evropskou zkratkou TIG. Tyto technologie svařování jsou nejvíce používány v automatizovaném výrobním procesu [34]. V práci budou tyto metody uváděny číselným značením metod podle normy EN ISO 4063 a to metoda MAG- 135 a metoda TIG- 141.

Svařování je dynamický proces a jeho stabilita závisí na širokém okruhu faktorů. Svařovací proces musí být stabilní a musí zabezpečit, aby všechny zhotovené svary dosahovaly normou předepsané úrovně kvality pro provozní podmínky svařovaných konstrukcí. Pro dosažení této kvality je nutné vybrané veličiny svařovacích procesů monitorovat. Z hlediska použitelných nástrojů pro monitorování procesu je nejdostupnější záznamový hardware v moderních invertorových svařovacích zdrojích, který nabízí možnost zobrazení základních svařovacích parametrů na displeji svařovacího zdroje po skončení svařování a tak dochází ke kontrole nastavení svařovacích parametrů. Mezi dříve používanými systémy pro sledování procesních veličin byly např. **INFOWELD** ve svařovacích zdrojích firmy Migatronik, kde bylo možné sledovat pouze střední hodnotu svařovacího proudu a napětí, množství tepla vyvinutého v elektrickém oblouku bylo orientačně vypočteno. Dalším vývojem byl vytvořen systém firmy Fronius – **FROSYN**, který disponoval výstupem na tiskárnu, kde mohl být vytištěn protokol. Protokol obsahoval jak nastavení zdroje tak i další údaje - reálný čas záznamu, nastavení limitu odchylek svařovacích parametrů a jejich případné překročení. Složitější a přesnější zařízení jsou pak různé monitorovací systémy, které jsou ke svařovacímu zdroji připojeny externě. S vývojem automatizace byly aplikovány monitorovací systémy na svařovací roboty. Automatizace svařovacího procesu pomocí svařovacích robotů byla zahájena u mnoha podniků již před několika lety. V oblasti pružné automatizace se v uplynulých deseti letech učinil veliký pokrok mimo jiné i díky technologii off-line programování. Jedním z důležitých bodů pozornosti je přitom zjištění, že v problematice svařovacích zdrojů vznikla potřeba jiného typu zdroje pro robotické svařování než pro klasické ruční svařování. Vedle hledání zdroje proudu pro svařovací roboty vzrostl i význam vztahu mezi zdrojem proudu a svařovacím robotem. Vyšší požadavky, které se budou klást na zdroj proudu, tkví ve skutečnosti, že roboty budou vykonávat požadovanou

práci rychleji a přesněji. Spolu s vyskytujícími se výrobními odchylkami je rychlá reakce mezi zdrojem proudu a robotem nutná stejně, jako větší pracovní pole kombinací svařovacích parametrů, které poskytují požadované výsledky. Jako základní funkce některých svařovacích robotů je k dispozici **Weld Monitor Function**, která umožňuje kontrolovat, zda skutečně naměřené parametry zůstávají v předem stanovených mezích a tolerancích. Například dojde-li ve svaru k nějaké vadě, např. neprotavení kořene, zápalu atd. bude to mít také vliv na svařovací proud, a je to tedy možné detekovat. Vznikne-li v důsledku znečištění základního materiálu nestabilní svařovací oblouk, bude to mít rovněž vliv a lze to rovněž detekovat. Je možné v reálném čase zjistit všechny odchylky od naprogramovaných parametrů svařování a tím zajistit odpovídající kvalitu svařovaných dílů. Sledovanými parametry robotizovaného svařování jsou: svařovací proud, svařovací napětí, počet zkratů za sekundu, doba přerušení svařovacího oblouku, rychlost podávání svařovacího drátu, proud odebíraný motorem podavače drátu. Je-li překročena jediná z mezí, může například systém automaticky stanovit, že tento výrobek je třeba důkladně zkontrolovat, vyhodnotit chybu, její příčinu a opravit ji.

Nejvýznamnějšími parametry ovlivňující proces svařování elektrickým obloukem je svařovací napětí, svařovací proud a rychlost svařování. Online monitorování parametrů svařování nabízí zvýšení kontroly nad kvalitou svaru. Díky neustálému vývoji informační technologie a elektroniky je možné vylepšit systémy pro monitorování parametrů svařování. Jeden z mnoha monitorovacích systémů, který byl vyvinutý firmou DIGITAL ELECTRIC, se nazývá **WeldMonitor**. Tento systém je úspěšně aplikovaný jak ve vědeckém výzkumu, jako nástroj pro vysokoškolské studentské projekty, tak i ve výrobních procesech (průmyslové provozy) pro vyhodnocování a dokumentaci svařovacích parametrů.

Autorova publikační činnost týkající se tématu dizertační práce

- [1] HRSTKA, D. Vliv druhu ochranné atmosféry na efektivitu zhotovení koutového svaru. In *Zváranie 2007*. Tatranská Lomnica, 2007, s. 206-211.
ISBN 978-80-89296-01-9
- [2] NEUMANN, H. – HRSTKA, D. Kvalita koutových svarů u vysokovýkonného svařování metodou MAG. In *Zváranie 2007*, Tatranská Lomnica, 2007, s. 200-205.
ISBN 978-80-89296-01- 9
- [3] HRSTKA, D. Vliv směsi plynů na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG. *Příloha konstrukce 5*, 2007, s. 26-28, ISSN 1213-8762
- [4] HRSTKA, D. Vysokovýkonné svařování MAG při použití trubičkového drátu FILARC PZ 6102. *Technický týdeník 24*, 2007, s.8, ISSN 0040-1064
- [5] HRSTKA, D. Monitorování svařovacích parametrů systémem WeldMonitor při vysokovýkonném svařování metodou MAG. In *2. Mezinárodní vědecká konference- Nové poznatky v technologiích a technologické informace 2008*, 2008, Ústí nad Labem, Univerzita J. E. Purkyně, Ústí nad Labem, s. 56. ISBN 978-80-7044-969-1
- [6] HRSTKA, D. Optimalizace svařovacích parametrů metody MAG při použití trubičkového drátu FILARC PZ 6102. *Svět svaru 1*, 2008, Ostrava, Hadina-International, spol. s. r. o, s. 18-19. ISSN1214-4983.
- [7] NEUMANN, H. - HRSTKA, D. Monitorování svařovacího procesu a kvalita koutových svarů zhotovených metodou 135. In *XXIX. Dny svařovací techniky 2009*, 2009, s.25 Vamberk, ISBN 978-80-02-02138-4
- [8] HUDEC, Z. - HRSTKA, D. Řešení nadměrného svařování MAG koutových svarů. In *Prvý regionálny medzinárodný IIW kongres v strednej Európe*, 2009, Stará Lesná, s. 49 ISBN 978-80-88734-61-1

II. Rešeršní část

1. Úvod

Hlavními důvody úspěšnosti metody svařování 135 je vyšší produktivita ve srovnání s v minulosti velmi používanou metodou svařování např. 111, relativně snadné zvládnutí a využití při svařování většiny konstrukčních materiálů v širokém rozsahu tloušťek a konfiguraci svarových spojů. Vysoký odtavovací výkon spojený s optimální rychlosti svařování při použití různých směsných plynů zaručuje vysokou kvalitu svarových spojů.

Dosažení souladu mezi produktivitou, kvalitou a náklady při provozní aplikaci metody svařování 135 vyžaduje úzkou spolupráci a vzájemné porozumění všech subjektů vstupujících do tohoto procesu (obchodní oddělení, konstrukce, příprava výroby, technologie a vlastní výroba). Významnou úlohu hrají pracovníci, kteří svými znalostmi, zkušenostmi, kvalifikací a přístupem zajistí požadovanou kvalitu. I když je možno považovat metodu 135 při svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí za provozně zvládnutou, stále se vyskytují určité vady svarových spojů a jejich příčiny vzniku se musí nadále sledovat a najít řešení k předcházení jejich vzniku.

Na počátku je konstrukční řešení svařovaných dílů reprezentované výkresovou dokumentací, navržený základní materiál, umístění a velikosti svarových spojů a požadavky na jejich jakost. Příprava materiálu dělením a dosahovaná přesnost je další významný faktor. Sestavení svařovaných dílů stehováním nebo v přípravcích s možností polohování ovlivňuje kvalitu svarových spojů. Nutné je též dodržovat kvalitu základních, přídavných materiálů a technických plynů.

Je možno konstatovat, že vady ve svarových spojkách nelze 100% vyloučit a s výskytem přípustných vad je nutné počítat a předcházet jim. Dle stupně kvality, který podle požadavků na výrobek stanovuje konstruktér, jsou stanovena kritéria přípustnosti vad v souladu s normou ČSN EN ISO 6520 – Klasifikace vad svarových spojů a normou ČSN EN ISO 5817 – Klasifikace požadavků na kvalitu svarových spojů.

1.2 Historie obloukových metod svařování

Obloukový svařovací proces s plynovou ochranou měl svůj počátek již v roce 1940. Byl vyvinut jako prostředek zajišťující vyšší rychlosti svařování a tím vyšší produktivitu práce. Na počátku byla zavedena metoda 141, která využívá k roztavení materiálu elektrický oblouk, který hoří mezi netavicí se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Při této

metodě byl přídavný materiál přiváděn do svarového kovu ručně a rychlosti svařování tak nenabývaly očekávaných hodnot. Metoda 141 byla velmi dobře aplikována při použití tenkých tloušťek materiálu. Ve společnosti Air Reduction Company, byl vyvinutý první hliníkový drát, který byl kontinuálně přiváděn do svarové lázně s použitím inertní plynové ochrany se 100 % Argonu. Postupem vývoje byla uvedena metoda GMAW (MAG), která využívá k roztavení materiálu elektrický oblouk, který hoří mezi tavící se elektrodou a základním materiálem. Tato metoda se stala efektivnější a ziskovější pro svařování silnějších plechů, neboť se podstatně zvýšila rychlost svařování. V počátcích byla metoda GMAW aplikována s malými průměry hliníkové elektrody, vysokými hodnotami svařovacího proudu a použitím inertních ochranných plynů. Pro tuto metodu byl zaveden výraz „Metal Inert Gas“, svařování MIG. Rozvoj metody a nahrazení inertního plynu za aktivní vedlo k zavedení termínu „Metal Active Gas“, svařování MAG. V roce 1950, práce Lyubavshkiho a Novoshilova zahájila vývoj procesu, GMAW, aby mohly být použity větší průměry elektrod (0,9 až 1,6 mm). [35]

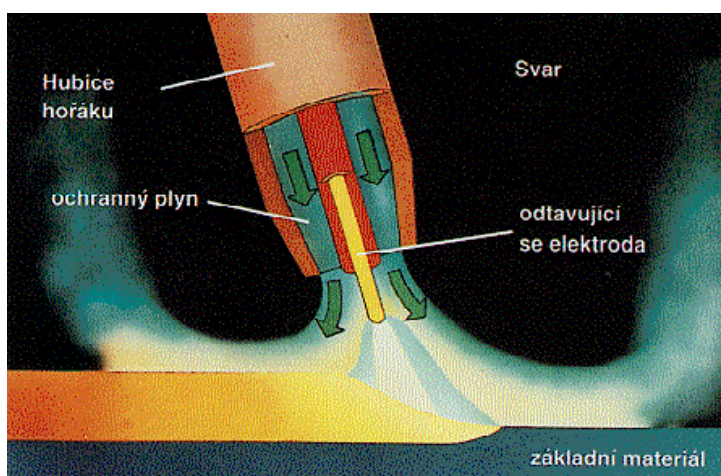
Vývojem bylo zaznamenáno mnoho pokroků v procesu GMAW. Patří do nich vývoj svařovacích zdrojů, podavačů přídavných materiálů spolu s dalším vývojem plněných elektrod a různých směsných ochranných plynů. V roce 1960 byl vyvinutý nový způsob přenosu přídavného kovu tzv. sprchový. Oproti předchozímu zkratovému režimu bylo možné rozšířit parametrickou oblast, kde byl oblouk stabilnější a nedocházelo tak k velkému rozstříku.

2. Svařování metodou MAG (GMAW)

Při svařování metodou 135 hoří elektrický oblouk mezi odtavující se elektrodou a základním materiálem. Elektroda je vedena k základnímu materiálu jako přídavný materiál přes podávací zařízení a taví se v elektrickém oblouku. Ochranný plyn obtéká okolo drátové elektrody a chrání elektrický oblouk před vlivy okolního prostředí. Jelikož se aktivní ochranná atmosféra podílí i na tvorbě vhodného prostředí, v němž hoří elektrický oblouk, lze úpravou jejího složení výrazně ovlivnit proces svařování. Metoda 135 je v současné době velmi rozšířeným způsobem svařování. Důvodem je značná flexibilita, snadná automatizace a tím i zvyšující se produktivita.

Důležitým činitelem vyskytujícím se při svařování metodou 135 je zajištění stability svařovacího procesu. Pod tento pojem se zahrnuje stabilita hoření oblouku, stabilita přenosu

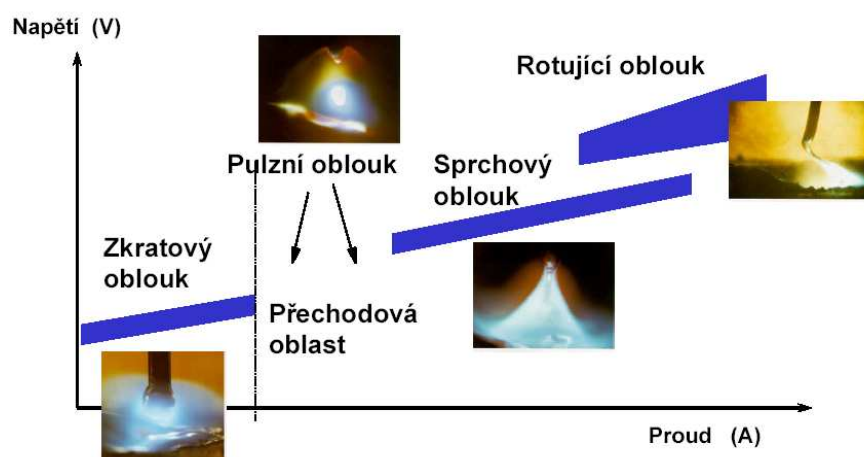
kovu, rozstřík a stabilita geometrie svaru. Stabilitu procesu lze dosáhnout vhodnou volbou parametrů svařování.



Obr. 2.1: Princip svařování MAG [1]

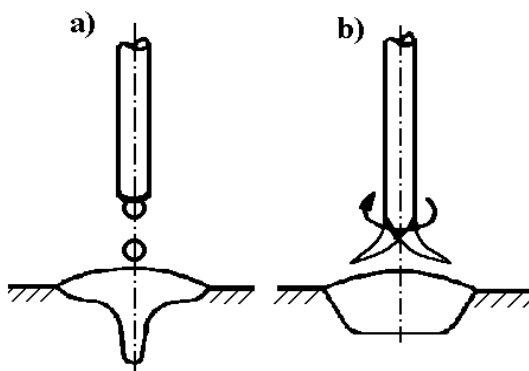
2.1 Přenos tekutého kovu při svařování v ochranných atmosférách

Způsob, jakým se dopravuje kov z konce odtavující se elektrody do svarové lázně, má výrazný vliv na celkový proces svařování: působí na stabilitu hoření elektrického oblouku, rozstřík tekutého kovu, kvalitu svaru a na možnosti polohování při procesu svařování. Přenos tekutého kovu je závislý na chemickém složení ochranného plynu, svařovaného materiálu, přídavného materiálu a na použitých svařovacích parametrech. Na obr. 2.2 jsou znázorněny jednotlivé způsoby přenosu kovu při svařování v ochranných atmosférách při použití plných svařovacích přídavných drátů.



Obr. 2.2: Základní rozdělení přenosu kovu při svařování [1]

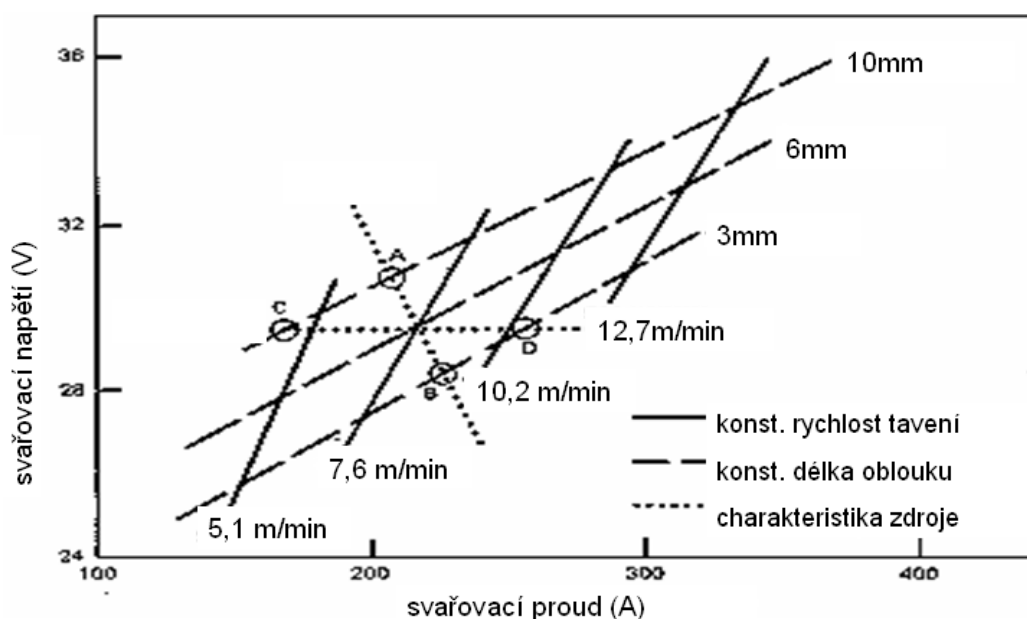
Když roste svařovací proud, velikost kapky se obvykle zmenšuje a frekvence přenosu kapek roste. Tvar nataveného konce elektrody se mění na kužel, z kterého se kapky oddělují. Když svařovací proud ještě víc vzroste, velikost kapky se dále zmenšuje, konec elektrody se mění na kužel s větší výškou kužele. Přes elektrický oblouk je strháván velmi jemný proud kapek a vytváří se sprchový přenos. U rotujícího oblouku jsou parametry tohoto typu přenosu kovu téměř stejné jako u předešlého procesu. Liší se ve zvýšeném napětí na oblouku a větší volné délce drátu nad 20 mm. Důsledkem vysoké hodnoty intenzity proudu a velké volné délky drátu je drát odporovým teplem přehříván téměř na teplotu tavení. Intenzivním magnetickým polem je konec drátu ve vysoce plastickém stavu roztáčen a odtavující se kapky kovu, vytvářejí kuželovou plochu. Rotující oblouk umožňuje větší závar do boku svarové plochy a vytváří se hluboký a široký svar.



Obr. 2.3: Tvar závaru při svařování a) sprchovým přenosem, b) rotujícím obloukem [1]

2.2 Svařovací proud, rychlost drátu

Proud I (A) je základní procesní proměnnou při obloukovém svařování. V procesu MAG na intenzitě proudu závisí nejen tavný výkon a hloubka závaru, ale také způsob (modus) přenosu kovu mezi elektrodou a plynem chráněnou svarovou lázní. Hodnotu svařovacího proudu nelze předem nastavit, protože prochází až po zapálení oblouku a tehdy je možné jej teprve seřídit nastavením rychlosti drátu (obr. 2.4).

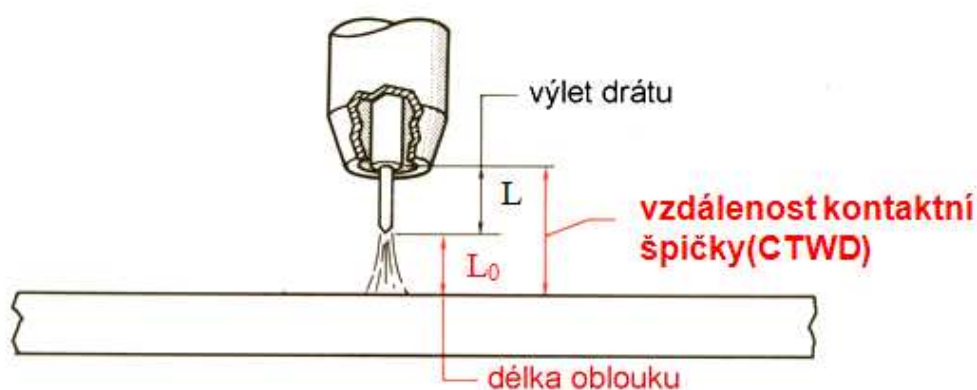


Obr. 2.4: Pracovní body C a D ploché charakteristiky znázorňují růst proudu při změně rychlosti drátu (plné čáry označují konstantní rychlosti tavení) [2]

Proud, přesněji proudová hustota na špičce drátu v místě anodové skvrny je základním faktorem tavení. Kladnou polaritou elektrody a plochou charakteristikou zdroje je svařování MAG koncipováno pro rychlé tavení tenkého drátu. Při posuvu pracovního bodu C po ploché statické charakteristice zdroje do pracovního bodu D, je zřejmé zvýšení svařovacího proudu při zvýšení rychlosti podávání drátu.

2.3 Výlet drátu, délka oblouku, vzdálenost kontaktní špičky

U MAG svařování je drát podáván do oblouku určitou rychlostí a té odpovídá velikost proudu při daném sklonu ploché charakteristiky zdroje. Plochá charakteristika má samoregulační charakter. Ten vyrovnává rozdíly délky oblouku L_0 během svařování automatickou změnou hodnoty proudu k dosažení rovnováhy. To ale platí bezesbýtku jen u vysoce vodivých materiálů. U ocelového drátu hraje důležitou roli odpor ve výletu drátu. Na rozdíl od ručně vedeného (poloautomatického) svařování MAG, při automatickém svařování máme pevně danou vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem L_C . Tato vzdálenost se skládá z délky oblouku L_0 a výletu drátu L (obr. 2.5 [3]).



Obr. 2.5: Rozdělení vzdálenosti kontaktní špičky na délku oblouku a výlet drátu

Změnou vzdálenosti špičky nebo rychlostí drátu můžeme výlet drátu i délku oblouku měnit. Při zvyšování rychlosti drátu, zvětšujeme výlet drátu na úkor délky oblouku. Zvětšením CTWD se zvyšuje délka oblouku a proud se snižuje vlivem zvýšeného odporu v obvodu v daném okamžiku tak, jak to plochá charakteristika vyžaduje. Tím se sníží tavný výkon. Délka oblouku L_0 určuje rozdělení hustoty proudu a jeho tlakového působení na povrch svarové lázně a tedy i její velikost a tvar. Příliš krátký oblouk způsobuje zkrat elektrody se svarovou lázní, menší intenzitu tavení základního materiálu, vysoký a úzký návar, nerovnoměrné vnášení tepla a větší možnost výskytu vad. Naopak příliš dlouhý oblouk způsobuje plochý, mělký návar, dovoluje oblouku větší pohyb, zvyšuje rozstřík a může způsobit porositu turbulencí vzduchu. Délka oblouku je základní podmínkou existence procesu a ekvivalentem napětí oblouku.

2.4 Napětí

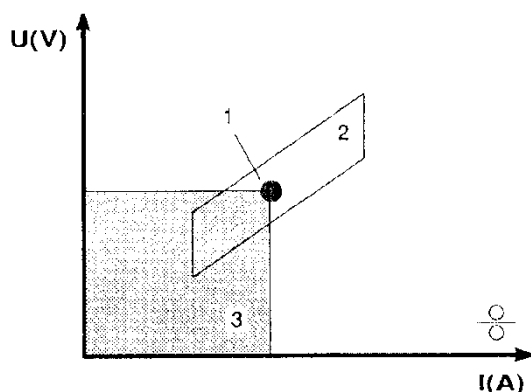
Podle statické charakteristiky oblouku napětí oblouku s velikostí proudu zpravidla stoupá. Statická charakteristika je dána pro určitý materiál, průměr drátu a danou ochrannou atmosféru. Existence stabilního procesu je omezena určitým rozpětím hodnoty svařovacího napětí (délky oblouku) a svařovacího proudu (pracovní oblast závislosti U na I – viz obr. 2.6). Napětí je tedy veličina závislá na velikosti proudu. Ani velikost pracovního napětí nelze nastavit předem. Nastavuje se pouze napětí naprázdno, které po zapálení oblouku klesne na hodnotu, odpovídající velikosti proudu při daném odporu obvodu, seřízeném sklonem charakteristiky zdroje. Pro existenci procesu je nutné, aby výsledné napětí pracovního bodu padlo do toleranční oblasti stabilního pole oblouku.

Pokles potenciálu obvodu v oblasti oblouku při svařování MAG byl studován experimentálně i numericky mnoha výzkumníky. Souhrn poznatků o studii elektrického potenciálu uvádí např. JÖNSSON a kol. [4]. Konstatuje, že elektrický potenciál oblasti tavení a přenosu kovu lze rozdělit na následující úbytky poklesu napětí:

- kontaktním odporem mezi kontaktní špičkou a drátem	U_{cont}
- odporem ve výletu drátu (elektrodě)	U_{elect}
- v oblasti anodového poklesu	U_{an}
- v oblouku	U_{col}
- v oblasti katodového poklesu	U_{cat}

2.5 Synergie

Pro snadnější nalezení pracovního bodu byly výzkumnými středisky firem vyrábějících zdroje, plyny nebo dráty pro svařování MAG vypracovány grafy pracovních oblastí pro určité kombinace vstupních podmínek (obr. 2.6) a ty potom zapracovány do knihoven procesorů svařovacích zdrojů. Těmito zdroji pak lze svařovat pomocí tzv. synergie, to znamená, že procesor na základě vybrané kombinace vstupních podmínek sám upravuje druhý parametr – napětí nebo rychlost drátu, podle zvoleného, svářečem nastavovaného parametru.



Obr. 2.6: Oblast stability procesu: 1 – pracovní bod, 2 – oblast stability hoření oblouku, 3 – výkon zdroje

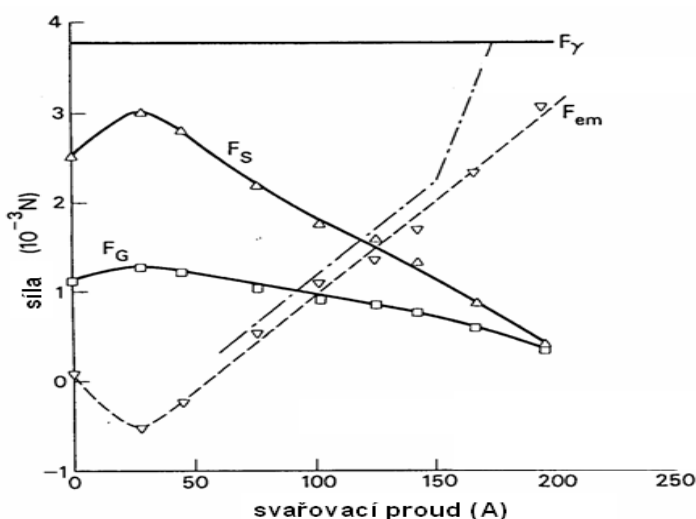
3. Rozbor podmínek stability procesu

Stabilita je obecně rovnovážný stav nějaké soustavy, kdy při malé poruše rovnováhy se soustava vrací do původního stavu. Jde o udržování určitých parametrů beze změny na čase. Svařovací proces je stabilní jen v relativně úzkém rozsahu parametrů svařování. Svařování

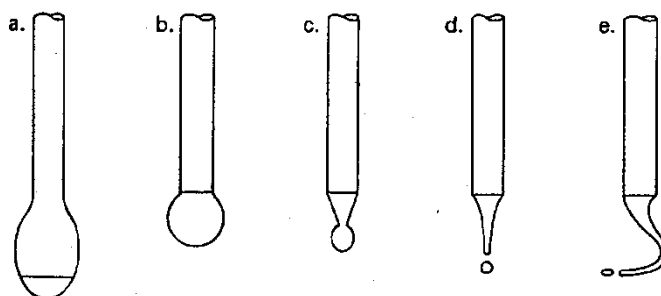
mimo rozsah nastavených parametrů může vyvolat nežádoucí poruchy (nestabilitu) svařovacího procesu MAG. V zájmu zabezpečení stability hoření oblouku je třeba při svařování eliminovat vzniklé poruchy přiměřenými a rychlými změnami vhodných regulačních procesových veličin.

3.1 Řídící síly přenosu kovu obloukem, statická teorie rovnováhy

Základ teorie přenosu kovu obloukem tvoří teorie rovnováhy statických sil, působících na kapku, odtavující se z konce drátu. Diagram na obr. 3.1 [5] názorně ukazuje hlavní síly, působící na přenos kovu obloukem ze špičky drátu do svarové lázně a na obr. 3.2 [5] je znázorněn vliv proudu na formování kapky.



Obr. 3.1: Síly působící na kapku v závislosti na velikosti proudu



Obr. 3.2: Velikost kapky a tvar konce drátu v závislosti na velikosti proudu

Pro kapku v okamžiku odtržení platí:

$$F_{\gamma} = F_G + F_S + F_{em} \quad (1)$$

Síla povrchového napětí kapky F_γ je největší silou, která drží kapku pohromadě na konci drátu:

$$F_\gamma = 2\pi r \cdot \gamma, \quad (2)$$

kde r je poloměr elektrody [mm]

γ je povrchové napětí [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$].

Gravitační síla kapky je určena vztahem:

$$F_G = 4/3\pi \cdot R^3 \cdot \rho_d \cdot g, \quad (3)$$

kde ρ_d je hustota kapky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

R poloměr kapky [mm]

g gravitační konstanta [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Aerodynamická síla plynu je dána vztahem:

$$F_S = C_D \cdot A_p \cdot (\rho_f (v_f^2/2)), \quad (4)$$

kde C_D je aerodynamický koeficient [-]

A_p je projekční plocha na ploše rovnoběžně s tokem kapaliny [mm^2]

ρ_f je hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v_f je rychlost plynu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Elektromagnetická síla je dána vztahem:

$$F_{em} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (5)$$

kde q je elektrický náboj [C]

v je rychlost náboje [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

B je magnetický indukce [T].

3.2 Spojitá simulace dynamického chování MAG systému

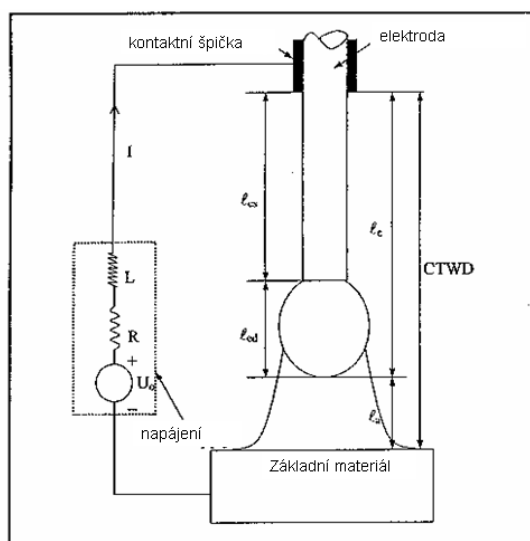
Pro přesnější predikci dynamického chování MAG byla navržena CHOI a spol. [7] spjitá simulace, která vychází z konvenčních vztahů modifikovaných zahrnutím vlivu visící kapky na špičce drátu.

Zdroj je převeden na ekvivalent RL obvodu jako:

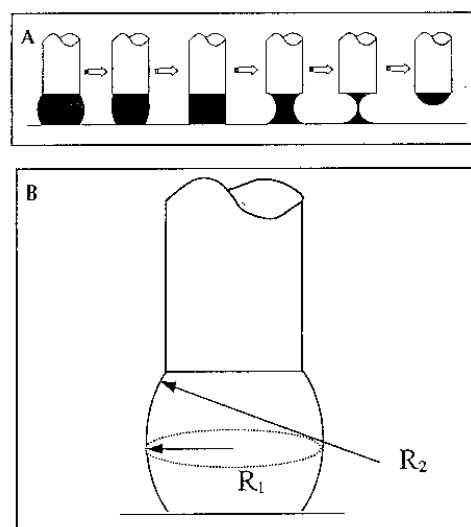
$$L \cdot dl/dt + R \cdot I = U_0 - U_a \quad (6)$$

kde L a R reprezentují indukanci a odpor svařovacího systému, I je proud, U_0 napětí naprázdno, U_a napětí oblouku (obr. 3.3).

Održení kapky je určeno s použitím modelu rovnováhy sil a teorie nestability pinch-effektu pro kapkový a sprchový přenos. Když se kapka oddělí, počáteční objem kapky je vyvržen ze špičky ($l_{ed} = 0$). Zkratový přenos nastane, když je výlet shodný se vzdáleností kontaktní špičky nad povrchem (CTWD). Jelikož oblouk během periody zkratu zhasne, napětí jsou nulová.



Obr. 3.3: Model svařovacího obvodu

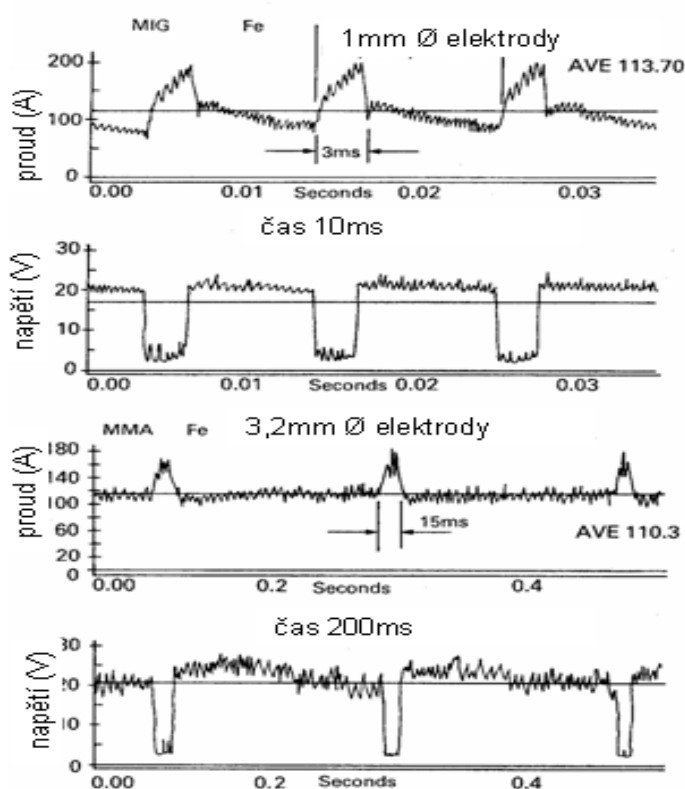


Obr. 3.4: Fáze zkratu

CHOI a spol. [7] byl navržen model zkratového přenosu, který zahrnuje vliv povrchového napětí a elektromagnetické síly a použit pro predikci odchylek svařovacích parametrů během zkratového přenosu. Jakmile se zformuje můstek, roztavený kov proudí do tavné lázně vlivem povrchového napětí a elektromagnetické síly, a tvar můstku se mění rovnoměrně – obr. 3.3. Tvar můstku je popsán s použitím základních poloměrů R_1 a R_2 na obr. 3.4, kde R_2 je určen z objemu můstku a výšky, která se mění spojitě během zkratové periody. U zkratového procesu má největší vliv na délku zkratu počáteční poloměr můstku, více než proud, ale ve skutečnosti jsou tyto vlivy provázány (větší objem můstku indukuje delší čas zkratu a vyšší proud, působící k urychlení rozpadu můstku).

3.3 Dynamická charakteristika zdroje

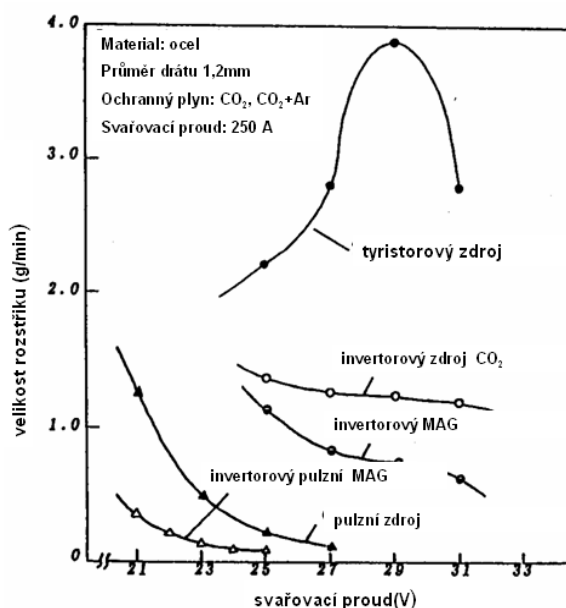
Proces MAG se mohl do praxe rozšířit teprve, když se objevily výkonové tyristory, s jejichž pomocí bylo možno zregulovat zkratový přenos kovu při svařování oceli s přijatelnou mírou rozstříku (Obr. 3.5 [8] - rychlost napětíové a proudové odezvy u svařování elektrodou a MAG). I poté byla stabilita procesu jeho hlavním omezujícím činitelem a tím i předmětem velmi intenzivních výzkumů. Jejich výsledkem byly jednak parametricky vymezené oblasti stability přenosu kovu pro různé kombinace materiálu, drátu a plynu a dále vývoj svařovacích zdrojů směrem k lepším dynamickým vlastnostem.



Obr. 3.5: Srovnání dynamické charakteristiky zdroje pro ruční svařování elektrodou (MMA) a tyristorového zdroje při zkratovém přenosu kovu (MIG)

Teprve koncem osmdesátých let se objevila invertorová technika, tedy regulace na bázi rychlých bipolárních tranzistorů s řídicí frekvencí 25000 až 100000 Hz, která kromě výrazného snížení hmotnosti svařovacích zdrojů přinesla i zlepšení jejich dynamických vlastností. Zejména od poloviny devadesátých let, kdy došlo k plné digitalizaci invertorů tak máme k dispozici zdroje, které dokážou v nanosekundách reagovat na jakoukoliv nepravidelnost v průběhu proudu a napětí při přenosu kovu z elektrody do svarové lázně a utlumit dynamické projevy. V komerčně využívaném rozsahu svařování se stabilita procesu

nejvíce projeví v tzv. přechodové oblasti mezi zkratovým a sprchovým modelem přenosu kovu.



Obr. 3.6: Závislost velikosti rozstříku na napětí v přechodové oblasti u různých kombinací druhu zdroje a ochranného plynu

Obr. 3.6 dokládá, že nikoliv složení ochranného plynu, ale dynamické vlastnosti zdroje jsou určující pro stabilitu procesu. Složení plynné ochrany je druhou důležitou podmínkou. Původně používaný levný 100% CO₂ měl silně oxidační charakter a tím i negativní vliv nejen na metalurgickou kvalitu, ale také na stabilitu procesu. Vykazoval úzké pásmo stability, velký rozstřík, rostoucí s velikostí proudu a neumožňoval sprchový ani pulzní typ přenosu, pro něž byly vyvinuty směsi s min. podílem 75% Ar, s příměsí CO₂ nebo O₂ (nejpoužívanější pro ocel Ar – CO₂ 82/18 a 92/8) [9]).

3.4 Vliv ochranného plynu

Argon je jak známo hlavní stabilizující složkou plyných směsí. Jeho 100% složení se používá výjimečně z důvodů nízké ionizace a většímu přenosu tepla. Byl např. studován vliv CO₂, O₂ a He [10, 11] jako hlavních příměsí Ar. Při svařování v ochraně CO₂ se vyskytuje tzv. odpudivý typ přenosu kovu, kdy kapky odlétají pryč od základního materiálu vlivem silného katodového proudu a jsou výrazně deformovány. Když se proud zvyšuje, velikost kapek a jejich deformace je méně patrná. Při ochraně héliem jsou při nízkém proudu kapky mnohem větší než predikované teorií statické rovnováhy. Při hodnotě proudu asi 240A se ukázala skoková změna velikosti kapek. Tento skok koresponduje s přechodem

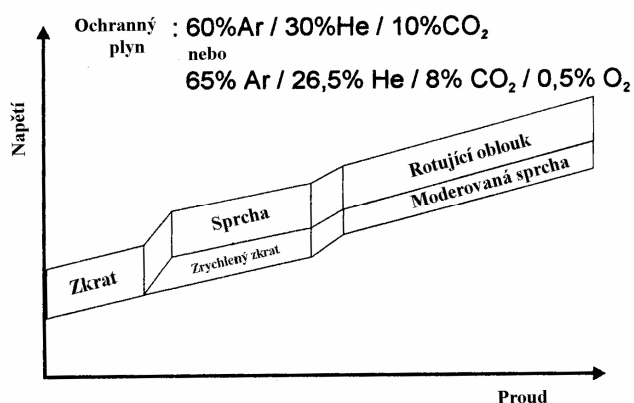
z odpuzovaného kapkového přenosu na sprchový, kde velikost kapek souhlasí s predikovanou podle teorie statické rovnováhy. Při ochraně CO_2 byl pozorován odpudivý modus přenosu kovu až do max. testovaného proudu 400A. Velikost kapek se průběžně snižovala s rostoucím proudem a žádná dramatická změna ve velikosti kapek zde není patrná.

3.5 Vliv druhu materiálu

Chemické složení drátu výrazně ovlivňuje vymezení oblastí stability procesu a to nejen z hlediska druhu slitin (ocel, Al-slitiny, Ti-slitiny) ale i v jejich rozmezí podílem jednotlivých prvků. Např. u oceli jsou to zejména povrchově aktivní prvky kyslík a síra, které výrazně mění stabilitu procesu i proudění ve svarové lázni. Základní prvky, zejména uhlík ale i některé vzácné příměsi jako Ce ovlivňují délku oblouku a tím i např. frekvenci zkratů.

3.6 Oblasti stability procesu (ocel)

Oblasti stability přenosu kovu se mění v závislosti na použitém ochranném plynu. Na obr. 3.7 je příklad oblasti stability pro uvedené ochranné plyny.



Obr. 3.7: Příklad oblastí stability přenosu kovu pro určitou směs ochranného plynu

Vzájemné působení elektromagnetické síly a povrchového napětí je určující pro modus přenosu kovu z odtavující se elektrody do svarové lázně a rozděluje parametrickou oblast na několik využitelných oblastí stabilního přenosu kovu. Drát se odtavuje v závislosti na velikosti proudu nejprve ve velkých kapkách, přidržovaných na konci elektrody povrchovým napětím. Součet ostatních sil (dle obr. 3.1) je nízký a tak jejich růst je u metody MAG omezen zkratováním do tavné lázně. S rostoucím proudem se vlivem elektromagnetické síly

na hrotu elektrody tavenina zužuje a se zmenšující se kapkou klesá i podíl gravitační síly (3) a aerodynamického tlaku plynu (4).

Při vyšším proudu elektromagnetická síla prudce narůstá a za podmínky min. 75 % podílu Ar v ochranném plynu při dosažení určité intenzity proudu převáží soudržnou sílu povrchového napětí a charakter přenosu kovu se změní na sprchový, probíhající téměř bez rozstříku. Při vyšším podílu oxidační složky je proces nestabilní. Invertorovými zdroji lze odtavování drátu přímo řídit i při nízké průměrné hodnotě proudu řízením frekvence krátkých pulsů. Odtrhávání kapek probíhá bez rozstříku a tavný výkon je pak funkcí frekvence pulsů.

Kapkový modus přenosu kovu s minimálním rozstříkem lze s dalším růstem intenzity proudu dodržet jen za specifických stabilizujících podmínek, 4- složková směs plynů s He, podavač, zdroj atd. Proud taveniny na konci drátu se při nižší délce oblouku zužuje do tenkého sloupce vysoké hustoty tepelné i kinetické energie, který se působením axiální složky elektromagnetického pole odtrhává nárazově v celé délce a zajišťuje tak hlubší závar – moderovaná sprcha, nebo při větší délce oblouku působením radiální složky pole plynule rychle rotuje a vytváří širokou tavnou lázeň. Modus zkratového přenosu lze využít i ve sprchové oblasti. Zkrácením oblouku a tím snížením napětí a větším vysunutím (výletem) drátu z kontaktní špičky se zvětší průchozí elektrický odpor, který přispívá k tavení na jeho konci a při vyšším proudu působí zrychlené zkratování, které sice opticky vykazuje značný rozstřík ale velmi drobných kapek, neulpívajících na povrchu materiálu.

Poznatky:

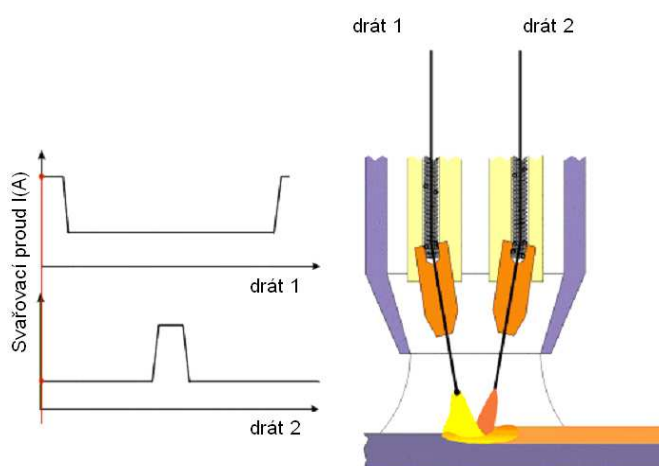
- 1. Stabilitu svařovacího procesu určujeme a posuzujeme vždy pro určitý systém svařovací zdroj – drát – plyn a to na základě provedených experimentů neboť teoretické predikce jsou jen přibližné.***
- 2. V posledních etapách vývoje došlo k výraznému rozvoji svařovacích zdrojů a vzniklo několik nových oblastí stability procesu. Výzkum stability svařovacího procesu je však velmi náročný, neboť proces ovlivňuje mnoho faktorů, které byly popsány ve výše uvedených kapitolách.***
- 3. Výzkum těchto oblastí stability a jednotlivých vlivů, které tuto stabilitu ovlivňují, musí být založen na hlubokých teoretických znalostech a dokonalejším monitorování svařovacích parametrů procesu.***

4. Moderní trendy obloukového svařování

Na počátku šedesátých let minulého století, byly MIG/MAG metody svařování zavedeny do průmyslové výroby a byly dále rozvíjeny a rozšiřovány. Velké úsilí bylo vynaloženo na zvýšení efektivity a rychlosti svařování a tím snížení tepelného příkonu. Rozšiřují se jak hranice známých procesů, tak i vytváření nových druhů procesů.

4.1 Tandemové MAG svařování dvěma dráty

Při klasickém MIG/MAG svařování jedním drátem literatura zmiňuje svařovací rychlosti až $2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlosti tavení drátu až $14 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ pro rotující oblouk. [36]. Tato skutečnost a potřeba vysoké rychlosti tavení se sníženým vneseného tepla vedla k vývoji MAG svařování dvěma dráty-Tandem MAG svařování. Zkoumání této technologie prováděné již v roce 1975 selhalo na zajištění kvalitního svařovacího zdroje, kdy tyto zdroje nebyly schopné udržet stabilní proces svařování. Použitím nových generací svařovacích zdrojů, bylo možné překonat nestabilitu procesu a vytvořit nové metody svařování v průmyslu. K tomu, aby byl proces stabilní, jsou užívány synchronizované nezávisle říditelné svařovací zdroje obr. 4.1.

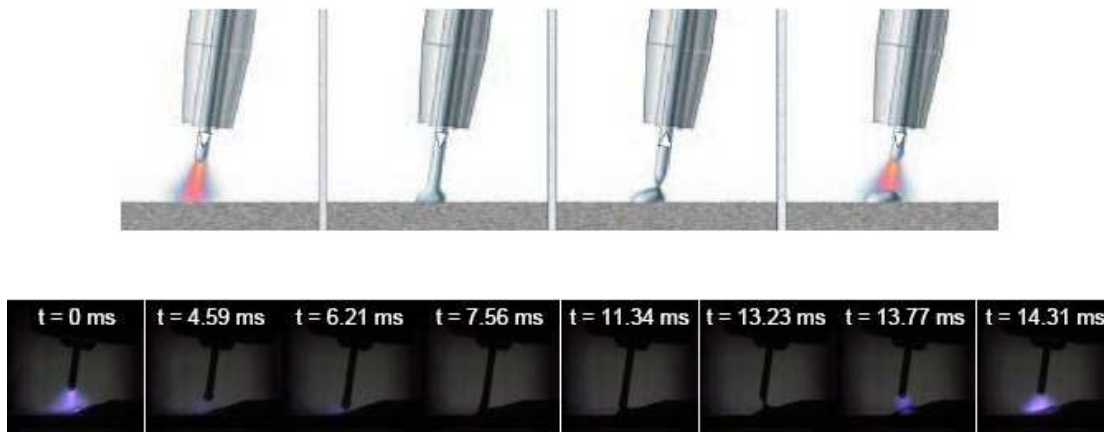


Obr. 4.1: Tandemové svařování

4.2 CMT proces

CMT je zkratka pro "přenos studeného kovu" a specifikuje MIG/MAG proces s velmi nízkým tepelným výkonem, ve srovnání s konvenčním obloukovým procesem. V klasickém obloukovém procesu je drát kontinuálně posunován do svarového kovu. V okamžiku spojení zkratem se proud výrazně zvyšuje a má za následek zvýšený rozstřík svarového kovu. V CMT procesu je drát kmitavým pohybem s četností až 70 Hz přibližován a oddalován od základního materiálu – obr. 4.2. Svařovací proud CMT procesu je velmi nízký, přenos

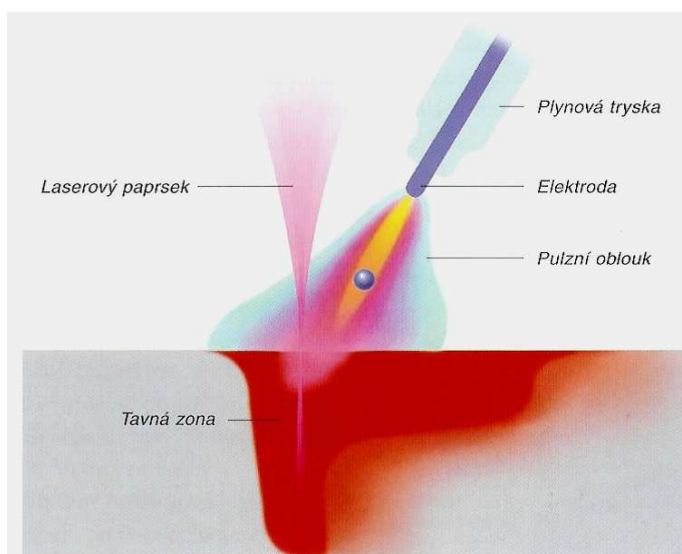
přídavného materiálu nastává s téměř nulovou hodnotou svařovacího proudu. Hlavní aplikační pole CMT procesu jsou: MIG tvrdé pájení, tenkých plechů (hliník, ocel a austenitové ocele). [27]



Obr. 4.2: CMT proces

4.3 Kombinované svařování „Laserhybrid“

Laserhybrid je kombinace svařování nejčastěji pevnolátkovým Nd-YAG laserem a současně jinou většinou obloukovou technologií. Jsou známy v zásadě kombinace laser - TIG metoda, laser - MIG/MAG nebo laser - plazmové svařování. Z kombinace svařování laserem a obloukovými metodami je nejvíce propracovaná a využívaná metoda svařování LASER - MIG/MAG obloukové svařování v ochranných plynech tavící se elektrodou. Vlastní tvorba svaru je založená na tavení svarového spoje laserem a podávání přídavného drátu taveného většinou impulsním přenosem kovu do tavné lázně obr. 4.3. [26].

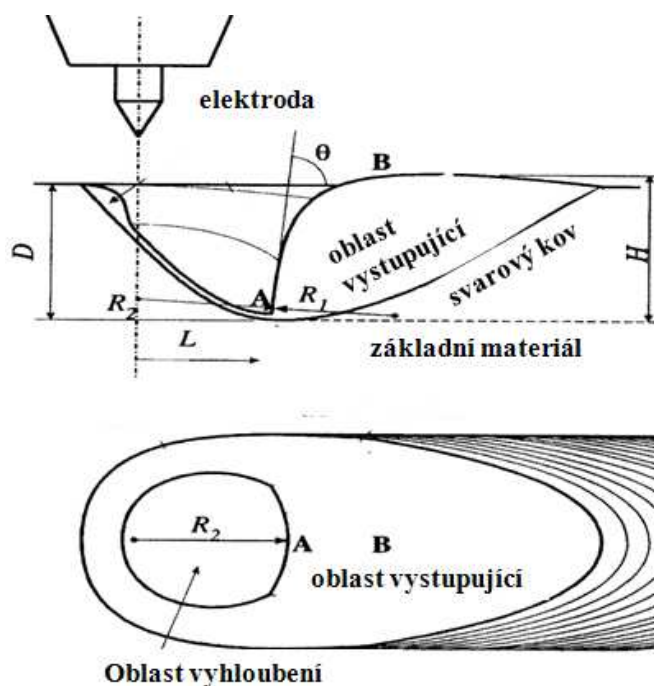


Obr. 4.3: Laserhybrid proces svařování

4.4 Svařovací proces s vysokovýkonným obloukem (ForceArc)

Bylo zjištěno, že pro svařovací proudy pod 200A se stlačení svarové lázně vypočtené jen za uvažování momentů magnetického a tlakového působení oblouku dobře shoduje s měřením, zatímco pro vyšší proudové hodnoty jejich součet nedá dohromady experimentálně zjištěné hluboké stlačení a závar. Z toho vyplývá, že při vysokém proudu nabývá některá z ostatních sil stejného řádu jako povrchové napětí a elektromagnetické síly. Tuto sílu definujeme pojmem hydrodynamická síla plazmatu [2].

Při vyšším proudu dochází vlivem tlaku oblouku ke stlačení nebo oscilaci povrchu lázně a tím se mění i směr působení hydrodynamické síly plazmatu. MENDEZ a EAGAR [28, 29] zjistili, že při svařování vysokým proudem a rychlostí se působením tlaku oblouku vytvoří ve svarové lázni prohlubeň (drážka obr. 4.4), která se spolupůsobením hlavně hydrodynamické síly plynu prohloubí tak, že vytlačí taveninu na okraj prohlubně a pod obloukem zůstane jen velmi tenká vrstvička taveniny s efektivním přenosem tepla oblouku přímo do materiálu, což způsobí velmi hluboký závar. Tavenina je vytlačována nahoru k okraji prohlubně, kde tvoří obrubu, prostřednictvím které tavenina proudí oběma směry do zadní části svarové lázně, kde postupně tuhne. Tento mechanismus byl popsán pro svařování WIG, ale experimentálně byl námi potvrzen i pro metodu MAG. [2]



Obr. 4.4: Vznik drážky vlivem tlaku oblouku a hydrodynamické síly plazmatu

Na obr. 4.5 je znázorněn metalografický výbrus dvojitého koutového svaru, který byl svařován při svařovacím procesu s vysokovýkonným obloukem ForceArc.



Obr. 4.5: Metalografický výbrus dvojitého koutového svaru [30]

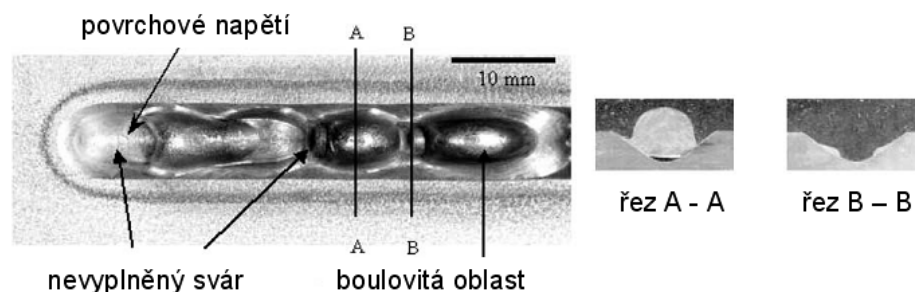
5. Nestabilita svařovacího procesu

Nestabilitu svařovacího procesu definujeme jako změnu určitých parametrů v závislosti na čase. Tato nestabilita může být způsobena různými vlivy, jako jsou vady svarových spojů v návaznosti se špatnou přípravou svařovaných ploch nebo při jiných technologických problémech. Současným a nejvíce rozšířeným trendem zvyšování produktivity svařování je zvyšování svařovací rychlosti. Ovšem vysoké svařovací rychlosti mohou mít za následek nedodržení předepsané jakosti svarových spojů a svařovaných konstrukcí. Pro využití vysokých svařovacích rychlostí je nutné počítat s tím, že ke zvyšování svařovací rychlosti je nutné zvyšovat i tepelný výkon svařovacího zdroje, čímž se zvyšují vnitřní pnutí a deformace svařovaných konstrukcí. V následující kapitole je popsán tzv. humping efekt, který se vyznačuje nestabilitou svařovacího procesu a vzniká při velkých svařovacích rychlostech a definujeme ho, jako periodickou nestabilitou tavení a velikosti svarové lázně.

5.1 Periodická nestabilita tavení a velikosti svarové lázně „Humping efekt“

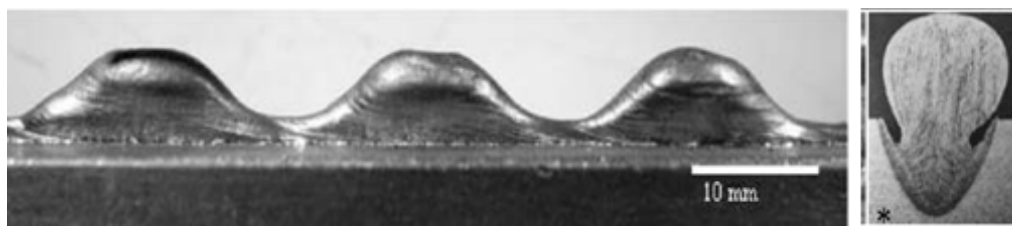
SODERSTROM a MENDEZ [19], tento jev popisují a experimentálně vyhodnocují ve své práci. Vysvětlují zde základní druhy humping morfologie. Tato studie a vědecko-průmyslový přínos má význam ve studii vysokých svařovacích rychlostí, která zvyšuje produktivitu svařování a tím redukuje výrobní náklady. Rozlišují se dva stavy Humping efektu, GRM a

BCM. GRM morfologie je charakterizovaná nevyplněným svarem mezi vytvořenými boulemi. V části svarové lázně řez A – A, je zřejmá velká kapilární deprese svarové lázně obr. 5.1.



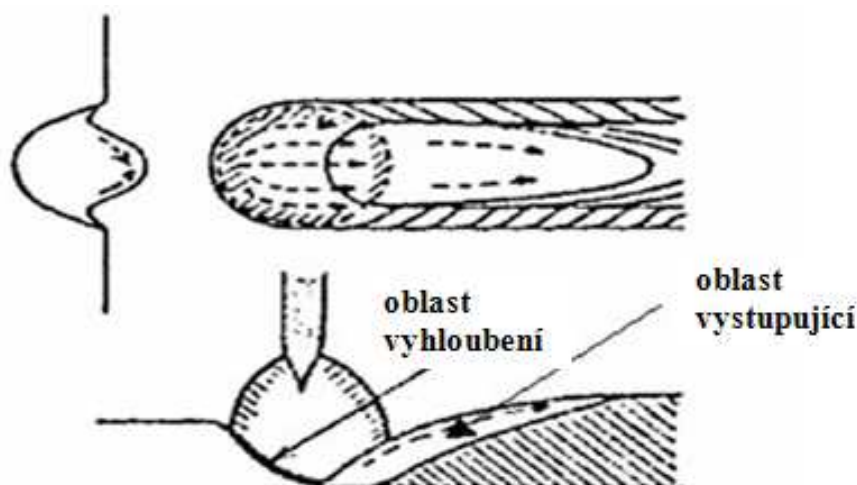
Obr. 5.1: Humping efekt, modifikace GRM [19]

BCM efekt je charakterizován výstupky svaru, které jsou nad povrchem základního materiálu. Svarová housenka v tomto případě má nepřetržitý zvlněný vzhled, který je znázorněn na obr. 5.2.



Obr. 5.2: Humping efekt, modifikace BCM [19]

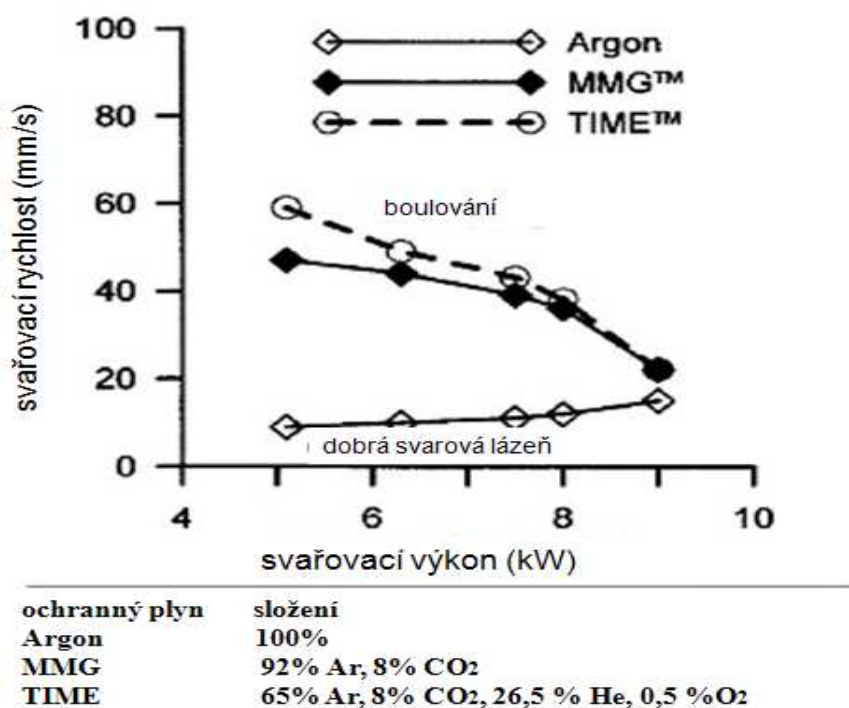
PATON [20] ve své práci predikoval, že by měla existovat rovnováha tlaku mezi obloukem a svarovou lázní. Nárůst tlaku ionizovaného plynu je nerovnováhou v těchto silách a se stoupajícími svařovacími proudy se začnou tvořit defekty. PATONŮV „humping model“, byl aplikován pro vysvětlení vzniku výstupků svaru nad povrchem základního materiálu během svařování pod tavidlem. V procesech které užívají ochrannou atmosféru, jako WIG a MIG/MAG svařování, byl tento model upravený. V proudech přesahující 300 A jsou síly z prostředí plazmy dost velké, aby přemístily většinu roztaveného svarového kovu přímo pod oblouk. Tenká vrstva roztaveného kovu se v literatuře označuje jako „Gouging region“ v překladu „**oblast vyhloubení**“ a „Trailing region“ v překladu „**vystupující oblast**“ svarového kovu. Tento proces je ilustrovaný v obr. 5.3, převzatý z práce SHIMADA [21]. Roztavený kov přímo nad oblastí vyhloubení, tak tvoří kanál pro přenos kovu, jak je ukázáno na obr. 5.1. Kov je vtlačován vystupující oblasti a následně tvoří boule a nevyplněný svar.



Obr. 5.3: Schematicky zobrazený Humping model [21]

5.2 Vliv ochranného plynu na periodickou nestabilitu tavení a velikosti svarové lázně

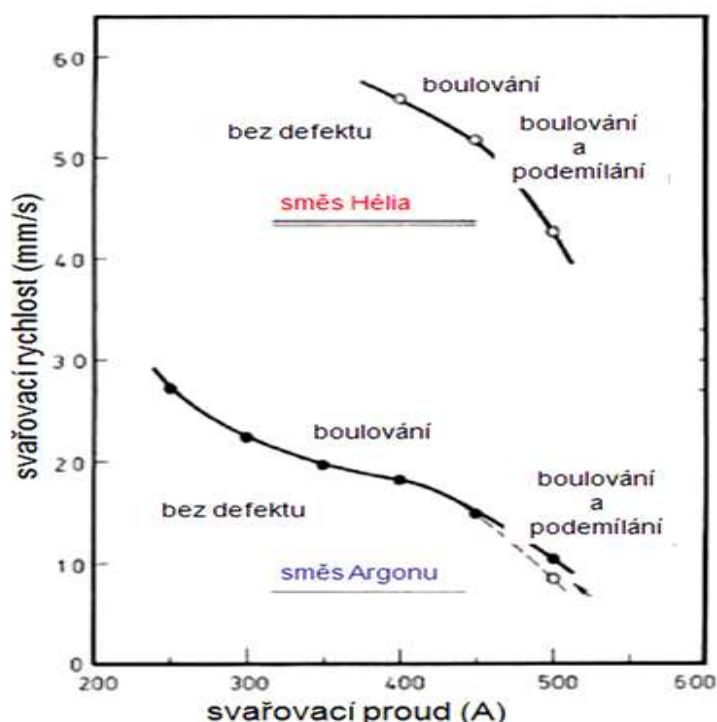
Vliv složení ochranného plynu pro svařování je významný na výskyt nepravidelného povrchu svarové lázně. BRADSTREET experimentoval s různými složeními ochranných plynů. Poznamenal, že rostoucí obsah kyslíku v ochranném plynu přímo souvisí s velikostí nepravidelného povrchu svarové lázně [35]. NGUYEN také zveřejnil podobné výsledky. Na obr. 5.4 zobrazuje závislost rychlosti svařování na výkonu svařovacího zdroje [36].



Obr. 5.4: Vliv svařovací rychlosti na výkonu svařovacího zdroje

Podobně BRADSTREET [35], a NGUYEN [36] dokázali, že rostoucí množství oxidu uhličitého v ochranném plynu, zmenšuje velikost boulí na povrchu svarové lázně. Rychlosti svařování tak mohou být až pětkrát vyšší než s plynovou ochrannou čistým argonem. Je to způsobeno větším teplotním gradientem svařovacího oblouku, který vede k větší svarové lázni. Protože je oblast roztaveného svarového kovu širší, je méně pravděpodobný výskyt efektu BCM.

SAVAGE [37], zobrazuje závislost svařovací rychlosti na svařovacím proudu při použití různých směsí ochranných plynů obr. 5.5.



Obr. 5.5: Vliv svařovací rychlosti na svařovacím proudu

6. Proces svařování v systému jakosti

V systémech zabezpečení jakosti je svařování vedeno jako zvláštní proces, u kterého se jakost nedá zajistit pouze kontrolou a zkouškami hotového výrobku. Protože jen na základě těchto činností se nedá s konečnou platností potvrdit, že při svařování výrobku byly dodrženy všechny požadavky ovlivňující jakost. Z tohoto důvodu je třeba do systému jakosti zahrnout všechny činnosti, které ovlivňují jakost svařování od samého počátku a stanovením požadavků na výrobek již ve fázi uzavírání smlouvy, jeho konstrukce, v průběhu výroby, kontroly a při předání zákazníkovi do užívání. Výrobce a dodavatel musí činnosti související se svařováním dát do souladu s požadavky následujících norem:

Základní požadavky na jakost při svařování jsou shrnuty do normy ČSN EN ISO 3834 – 1 až 6. ISO 3834 není normou o systému jakosti nahrazující ISO 9001, ale užitečný, dodatečný nástroj k používání tam, kde je ISO 9001 výrobci používána. V tomto případě musí být z certifikátů a dokumentace zřejmé, že požadavky ISO 9001 byly také plně dodrženy. ISO 3834 však může být použita nezávisle na ISO 9001. ISO 3834 je určena pro tavné svařování kovových materiálů a její použití není závislé na vyráběných výrobcích. Zásady normy a mnoho jejich detailních požadavků je také důležitých pro ostatní metody svařování a příbuzné procesy.

ČSN EN ISO 3834 – 1: Požadavky na jakost při svařování

Tavné svařování kovových materiálů

Část 1. Směrnice pro volbu a použití

ČSN EN ISO 3834 – 2: Požadavky na jakost při svařování

Tavné svařování kovových materiálů

Část 2. Vyšší požadavky na jakost

ČSN EN ISO 3834 – 3: Požadavky na jakost při svařování

Tavné svařování kovových materiálů

Část 3. Standardní požadavky na jakost

ČSN EN ISO 3834 – 4: Požadavky na jakost při svařování

Tavné svařování kovových materiálů

Část 4. Základní požadavky na jakost

ČSN EN ISO 3834 – 5: Požadavky na jakost při svařování

Tavné svařování kovových materiálů

Část 5: Dokumenty, kterými je nezbytné se řídit pro dosažení shody s požadavky na jakost podle ISO 3834-2, ISO 3834-3 nebo ISO 3834-4

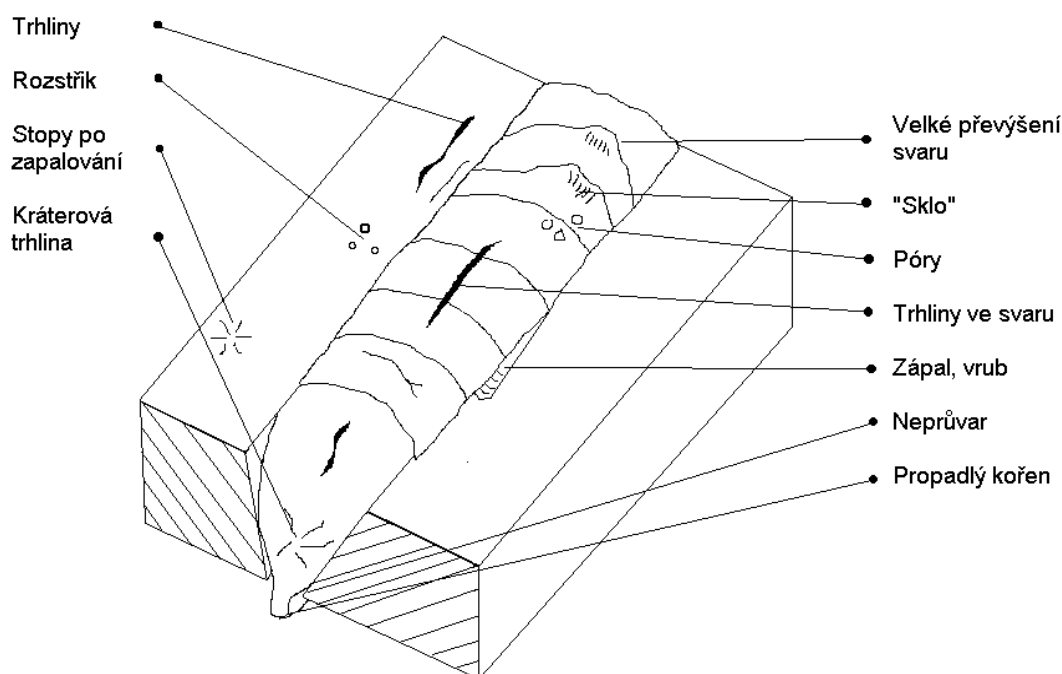
ČSN EN ISO 3834 – 6: Požadavky na jakost při svařování

Tavné svařování kovových materiálů

Část 6. Návod k zavedení ISO 3834

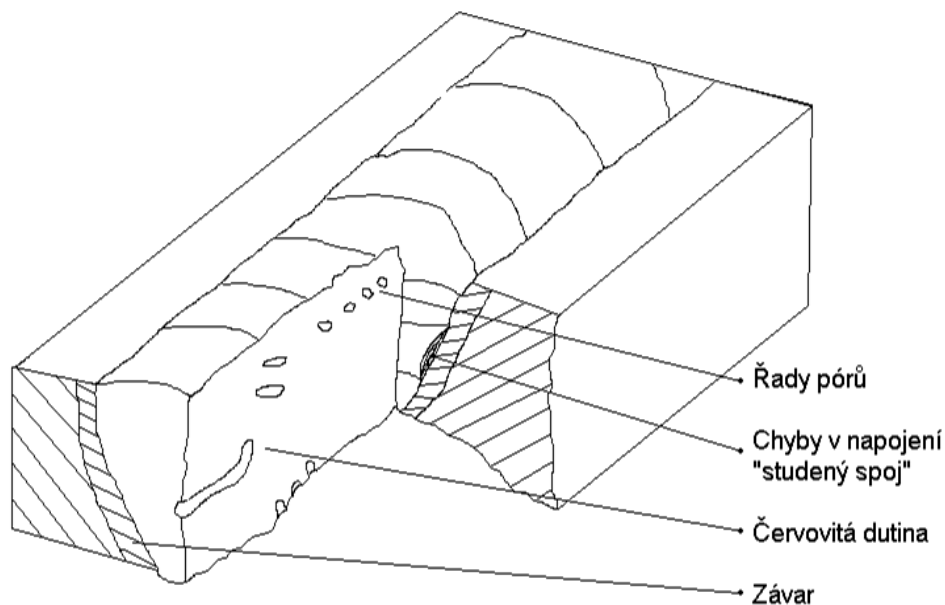
6.1 Vizuální kontrola svarů

Pro vyhodnocování geometrických vad podle ČSN EN ISO 6520 – 1 a určování stupňů kvality podle normy ČSN EN ISO 5817, bude v této práci použita vizuální kontrola svaru v souladu s normou ČSN EN 970. Podle normy ČSN EN 970 je vizuální zkouška definována jako: metoda nedestruktivního zkoušení využívající optické části spektra elektromagnetického záření. Pojem „vizuální kontrola“ zahrnuje vyhledání a posouzení kvalitativních znaků svařovaného spoje lidským okem. Je jednou z metod nedestruktivního zkoušení materiálů a zahrnuje i vyhodnocování pomocí makrovýbrusů. Vnější vady, které lze definovat podle vizuální kontroly jsou zobrazeny na obr. 6.1.



Obr. 6.1: Vnější vady svaru

Vyhodnocení vnitřních vad podle obr. 6.2 zahrnuje destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů. Účelem makroskopické kontroly podle ČSN EN 1321 je stanovení makroskopického charakteru svarového spoje, obvykle prohlídkou příčného řezu zkušební vzorku. Kontrola se obvykle provádí na vzorcích orientovaných příčně k ose svaru (příčný řez), které zahrnují svarový kov a tepelně ovlivněnou oblast na obou stranách svaru. Účelem makroskopické zkoušky je stanovení stupně jakosti svarových spojů podle ČSN EN ISO 5817.



Obr. 6.2: Vnitřní vady svaru

6.2 Klasifikace geometrických vad

Klasifikací geometrických vad svarů kovových materiálů pro tavné svařování udává norma ČSN EN ISO 6520 – 1. Typy vad jsou definovány společně s vysvětleními a v nutných případech i s vyobrazením, aby se zabránilo jakémukoliv nedorozumění. Pro účely této normy platí následující definice.

vada: jakákoliv odchylka od dokonalého svaru

nepřípustná vada: nepřijatelná vada

Základem systému klasifikace vad je číslování a rozřídění vad do šesti skupin:

- 1 - Trhliny
- 2 - Dutiny
- 3 - Pevné vměstky
- 4 - Studené spoje a neprůvary
- 5 - Vady tvaru a rozměru
- 6 - Jiné vady

V tab. 6.1 je uvedeno rozdělení a značení vad podle současných norem.

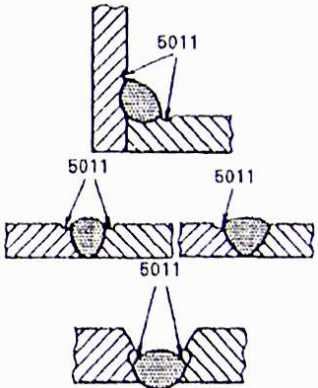
Tab. 6.1. Značení vad podle současných norem ČSN EN ISO

Vady	Číselné označování vad svarů			Pájené spoje
	tavných	tlakových	elektronovým a laser. svařováním	
trhliny	100	P100	100	ČSN EN ISO 18279
dutiny	200	P200	200	
vměstky	300	P300	300	
studené spoje, neprůvazy	400	P400	400	
vady tvaru a rozměru	500	P500	500	
různé jiné vady	600	P600	600	

Pokud je požadováno označení vady, musí mít toto označení následující tvar:

Příklad: Trhlina (100) musí být označena následujícím způsobem Vada ISO 6520-1-100

Na obr. 6.3 je uveden příklad vady z normy ČSN EN ISO 6520-1.

5011	Souvislý zápal Vrub značné délky bez přerušení	
------	--	---

Obr. 6.2: Příklad vady z normy ČSN EN ISO 6520-1

Pro rozlišení bližších charakteristik (orientace, místo výskytu apod.) se vady označují čtyřmístným referenčním číslem.

6.3 Určování stupňů kvality

Stupně kvality svarových spojů jsou definovány normou **ČSN EN ISO 5817**. Tato mezinárodní norma by měla být užívána jako odkaz při tvorbě prováděcích předpisů a/nebo jiných výrobních norem. Obsahuje zjednodušený výběr vad svarů zhotovených tavným svařováním na základě označení uvedeného v ISO 6520-1.

Tato mezinárodní norma určuje stupně kvality podle vad svarových spojů zhotovených tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) pro všechny druhy ocelí, niklu, titanu a jejich slitiny. Platí pro tloušťky materiálu větší než 0,5 mm. Zahrnuje plně provařené tupé svary a veškeré koutové svary. Zásady této mezinárodní normy lze také použít pro částečně provařené tupé svary.

Norma uvádí tři stupně kvality, označené **B**, **C** a **D**, aby bylo možné použití pro širokou řadu svařovaných výrobků. Stupeň kvality **B** odpovídá nejvyššímu požadavku na kvalitu zhotoveného svaru. KÁLNA [34] uvádí nové přístupy v evropských normách pro navrhování a výrobu svařovaných ocelových konstrukcí v souvislosti se zavedením normy **EN 1090-2**-zhotovení ocelových konstrukcí. Tato norma uvádí čtyři třídy zhotovení ocelových konstrukcí, kdy nejvyšší třída zhotovení **EXC4** předepisuje požadavky na stupeň kvality podle ČSN EN ISO 5817 ve stupni **B+**, což je kvalita úrovně B s dalšími požadavky definovanými v následující tab. 6.3.

Tab. 6.3 Další požadavky pro úroveň kvality B+

Označení vad		Mezní hodnoty pro vady
Zápaly (5011, 5012)		nepřípustné
Vnitřní póry (2011 až 2014)	tupé svary	$d \leq 0,1 s$, ale max. 2 mm
	koutové svary	$d \leq 0,1 a$, ale max. 2 mm
Pevné vměšky (300)	tupé svary	$h \leq 0,1 s$, ale max. 1 mm $\ell \leq s$, ale max. 10 mm
	koutové svary	$h \leq 0,1 a$, ale max. 1 mm $\ell \leq a$, ale max. 10 mm
Lineární přesazení (507)		$h < 0,05t$, ale max. 2 mm
Hubený kořen (515)		nepřípustné

Tato mezinárodní norma se používá pro:

- nelegované a legované oceli;
- ruční, mechanizované a automatické svařování;
- všechny polohy svařování;
- všechny druhy svarů, například tupé svary, koutové svary a spoje odboček;
- následující metody svařování a jejich definované varianty v souladu s ISO 4063:
- 11 obloukové svařování tavící se elektrodou bez ochranného plynu;
- 12 svařování pod tavidlem;

- 13 obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu;
- 14 obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranném plynu;
- 15 plazmové svařování;
- 31 plamenové svařování s kyslíkem (pouze pro ocel).

Metalurgická hlediska, například velikost zrna, tvrdost, nejsou v této mezinárodní normě zahrnuta.

Pro účely této mezinárodní normy se používají následující termíny a definice:

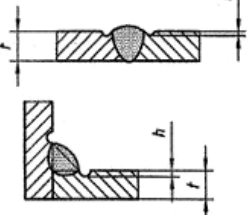
Stupeň kvality - popis jakosti svaru na základě druhu a velikosti vybraných vad.

Vhodnost použití - schopnost výrobku, metody nebo služby sloužit definovanému účelu za stanovených podmínek.

Krátké vady – jedna nebo více vad s celkovou délkou menší než 25 mm na každých 100 mm délky svaru nebo s největší délkou vady do 25% celkové délky svaru kratšího než 100 mm, přičemž se bere za základ oblast zjištění nejvíce vad.

Soustavná vada – vady, které jsou rozmístěny po celé zkoušené délce svaru v pravidelných vzdálenostech, přičemž rozměry jednotlivých vad vyhovují mezním hodnotám vad uvedených v normě.

Na obr. 6.3 je uveden příklad vady z normy ČSN EN ISO 5718.

Číslo	Referenční číslo dle ISO 6520-1	Název vady	Poznámky	t mm	Mezní hodnoty vad pro stupně jakosti		
					D	C	B
1.7	5011 5012	Souvislý zápal Nesouvislé zápaly	Je požadován plynulý přechod Nepovažuje se za soustavnou vadu 	0,5 až 3	Krátké vady: $h \leq 0,2 t$	Krátké vady: $h \leq 0,1 t$	Nepřípustné
				> 3	$h \leq 0,2 t$, ale max. 1 mm	$h \leq 0,1 t$, ale max. 0,5 mm	$h \leq 0,05 t$, ale max. 0,5 mm

Obr. 6.3: Příklad z normy ČSN EN ISO 5718

S jakosti svaru úzce souvisejí i normy pro stanovení a kvalifikaci postupů svařování kovových materiálů. Jsou to především normy:

ČSN EN ISO 15607- Stanovení a schvalování postupů svařování kovových materiálů

Všeobecná pravidla

ČSN EN ISO 15609-1- Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů-
Stanovení postupu svařování- část 1: Obloukové svařování

ČSN EN ISO 15614-1- Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů-
Stanovení kvalifikace postupu svařování- část 1: Obloukové svařování

Poznátky:

- 1. Moderní trendy svařování aplikované na metodu MIG/MAG uvedené v kapitole 4 mají za úkol zvyšovat produktivitu procesu svařování a to tím že se zvyšuje tavný výkon a zvyšují se svařovací rychlosti***
- 2. Následkem růstu svařovací rychlosti se může při svařování vyskytnout tzv. Humping efekt, který je popsán v kapitole 5 a je nutné s tímto jevem při vysokých rychlostech svařování počítat.***
- 3. Pro zajištění určité jakosti svarů je potřebná znalost norem souvisejících s jakostí a vadami svarů, viz kapitola 6, a v souladu s těmito normami monitorovat svařovací parametry a tyto vady včas detekovat a eliminovat.***

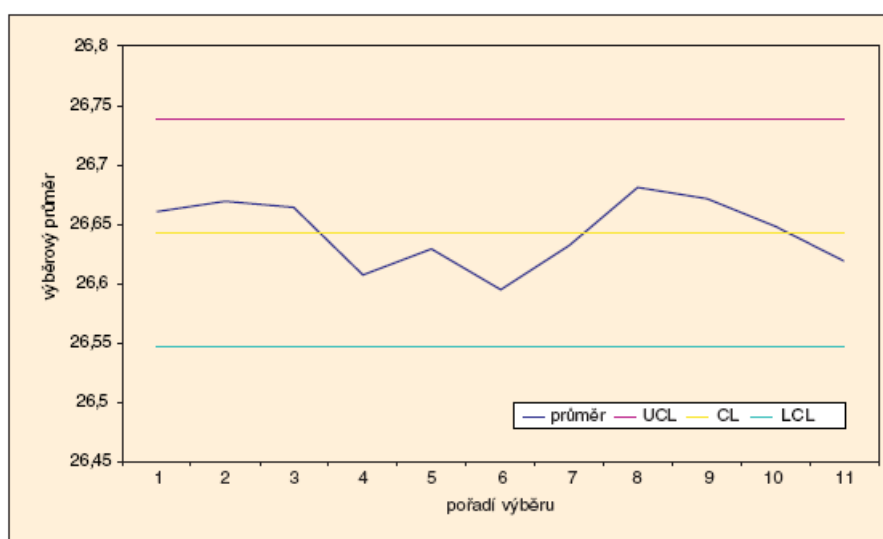
7. Principy statistických metod zabezpečování jakosti

Statistické řízení procesu představuje zpětnovazební systémové ovládání procesu na základě informace o výkonu procesu ve formě údajů zjištěných při vlastní regulaci. Proces ovlivňovaný pouze systémem náhodných příčin má charakter statisticky zvládnutého procesu a takový proces je predikovatelný. Naproti tomu přítomnost zvláštních příčin (nazývaných také vymezitelné příčiny) vyvolává v procesu neočekávané změny. Tyto typy příčin je nutné identifikovat. Detekce přítomnosti zvláštních příčin v procesu je úlohou regulačních diagramů podle normy ČSN ISO 7870-1:2010.

7.1 Základní typy regulačních diagramů

ČSN ISO 8258:1994 shrnuje základní typy tzv. Shewhartových regulačních diagramů. Regulační diagram využívající statistických testů významnosti, je nástrojem k identifikaci vymezitelných příčin variability. Shewhartův regulační diagram pracuje s údaji získanými z výrobního procesu v přibližně pravidelných intervalech. Intervaly mohou být určeny v čase (např. v hodinách) nebo v množství (každá dávka). Obvykle se každá podskupina skládá ze stejného výrobku nebo služby, které mají stejné měřitelné jednotky a stejný rozsah

podskupiny. Z každé podskupiny se získá jedna nebo více charakteristik podskupin jako například průměr $\bar{X}$ podskupiny a rozpětí R podskupiny, nebo směrodatná odchylka s podskupiny. Shewhartův regulační diagram je graf hodnot dané charakteristiky podskupiny proti pořadovému číslu podskupiny. Skládá se z centrální přímky (CL) umístěné v referenční hodnotě znázorňované charakteristiky. Při hodnocení, zda výrobní proces je či není ve statisticky zvládnutém stavu, je referenční hodnotou obvykle průměrná hodnota uvažovaných údajů. Pro regulaci výrobního procesu je referenční hodnota obvykle dlouhodobou hodnotou znaků, jak je stanoveno ve specifikaci výrobku, nebo jmenovitá hodnota znaku, který je sledován, přičemž tato hodnota je založena na minulých zkušenostech s daným výrobním procesem, nebo hodnota uvedená v technickém zadání pro předpokládaný výrobek nebo službu. Regulační diagram má dvě statisticky stanovené regulační meze po jedné na každé straně centrální přímky, které se nazývají horní regulační mez (UCL) a dolní regulační mez (LCL) obr. 7.1.



Obr. 7.1: Regulační diagram $\bar{X}$ pro výběrový průměr[38]

Regulační meze na Shewhartově diagramu jsou ve vzdálenosti 3σ na každou stranu od centrální přímky, kde σ je směrodatná odchylka sledované statistiky příslušná souboru, z něhož se odebírají podskupiny. K odhadu σ slouží výběrové směrodatné odchylky nebo příslušné násobky výběrových rozpětí. Tato míra σ nezahrnuje kolísání od jedné podskupiny ke druhé, ale pouze složky uvnitř podskupin. Za předpokladu, že výrobní proces je ve statisticky zvládnutém stavu, meze 3σ ukazují, že uvnitř regulačních mezí bude přibližně 99,7 % hodnot příslušných podskupinám. Jinak interpretováno, existuje riziko 0,3 % neboli v průměru tři případy z tisíce, že zakreslený bod bude ležet mimo horní nebo dolní regulační

mez. Leží-li všechny body uvnitř regulačních mezí a nejsou-li vytvořena nenáhodná seskupení, pak je proces pokládán za statisticky stabilní.

V podstatě existují dva typy Shewhartových regulačních diagramů: regulační diagramy měřením a regulační diagramy srovnáváním.

Pro každý z regulačních diagramů existují dvě odlišné situace:

- a) základní hodnoty jsou stanoveny
- b) základní hodnoty nejsou stanoveny.

Základními hodnotami se míní specifikované požadavky nebo hodnoty uvedené v technickém zadání.

Regulační diagramy — základní hodnoty nejsou stanoveny

Zde je záměrem odhalit, zda pozorované hodnoty do diagramu zaznamenávaných charakteristik jako $\bar{X}$, R nebo jakákoliv jiná statistika, kolísají od jedné hodnoty ke druhé v rozmezí větším, než by bylo možné přisoudit jen náhodě. Regulační diagramy založené zcela na údajích shromážděných z výběrů lze použít k odhalení těch kolísání, která jsou způsobena jinými než náhodnými vlivy.

Regulační diagramy — základní hodnoty jsou stanoveny

Zde je záměrem identifikovat, zda pozorované hodnoty $\bar{X}$, v několika podskupinách o n pozorováních v každé z nich se liší od základních hodnot X_0 více než lze očekávat při působení pouze náhodných příčin. Rozdíl mezi diagramy s danými základními hodnotami a diagramy bez udání těchto hodnot spočívá v dalším požadavku, který se týká polohy střední hodnoty a kolísání výrobního procesu. Předepsané hodnoty mohou být založeny na zkušenosti získané z aplikace regulačních diagramů bez jakékoliv předběžné informace nebo na předpisu základních hodnot. Mohou být také založeny na ekonomicky zdůvodněných hodnotách stanovených s přihlédnutím k potřebě služby a výrobním nákladům nebo na nominálních hodnotách navržených ve specifikaci výrobku. Základní hodnoty by měly být nejlépe stanoveny vyšetřením předběžných údajů, o kterých lze předpokládat, že jsou typické pro všechny budoucí údaje. Základní hodnoty by měly být kompatibilní s variabilitou, která je inherentní složkou výrobního procesu, aby bylo zaručeno účinné fungování regulačních diagramů. Regulační diagramy založené na takových základních hodnotách jsou použitelné

zvláště během výroby, kde výrobní proces má být regulován a kde má být udržována stejnoměrnost výrobku na požadované úrovni.

Uvažují se následující regulační diagramy:

a) Regulační diagramy měřením

- 1) diagram pro průměr ($\bar{X}$) a diagram pro rozpětí (R) nebo směrodatnou odchylku (s)
- 2) diagram pro individuální hodnoty (X) a diagram pro klouzavé rozpětí (R);
- 3) diagram pro medián (Me) a diagram pro rozpětí (R).

b) Regulační diagramy srovnáváním

- 1) diagram pro podíl neshodných jednotek (p) nebo diagram pro počet neshodných jednotek
- 2) diagram pro počet neshod (c) nebo diagram pro počet neshod na jednotku (u).

V dizertační práci bude pro vyhodnocení stability procesu aplikována metoda regulačních diagramů měřením. Tato metoda byla zvolena z níže uvedené charakteristiky regulačních diagramů měřením.

Regulační diagramy měřením

Údaje o měřitelné proměnné představují pozorování získaná měřením a zaznamenáváním číselných hodnot znaku pro každou z jednotek v uvažované podskupině. Příklady měřitelných proměnných jsou délka v metrech, odpor v ohmech, hluk v decibelech atd. Diagramy měřením a zvláště jejich nejobvyklejší formy, totiž diagramy $\bar{X}$ a R , představují klasickou aplikaci regulace výrobního procesu pomocí diagramů. Vzorce pro výpočet centrální přímk a regulačních mezí jsou uvedeny v tab. 7.1

Tab. 7.1 Vzorce pro regulační meze Shewhartových regulačních diagramů měřením

Statistika	Základní hodnoty nejsou stanoveny		Základní hodnoty jsou stanoveny	
	Centrální přímka	UCL a LCL	Centrální přímka	UCL a LCL
$\bar{X}$	$\bar{\bar{X}}$	$\bar{\bar{X}} \pm A_2 \bar{R}$ nebo $\bar{\bar{X}} \pm A_3 \bar{s}$	X_0 nebo μ_0	$X_0 \pm A \sigma_0$
R	$\bar{R}$	$D_4 \bar{R}, D_3 \bar{R}$	R_0 nebo $d_2 \sigma_0$	$D_2 \sigma_0, D_1 \sigma_0$
s	$\bar{s}$	$B_4 \bar{s}, B_3 \bar{s}$	s_0 nebo $C_4 \sigma_0$	$B_6 \sigma_0, B_5 \sigma_0$

8. Monitorování a záznam veličin svařovacího procesu

Při svařování náročných (a drahých) svarků je častým požadavkem dokladování dodržení svařovacího postupu (WPS). K účelu použití **specifikace postupu svařování (WPS)** - dokument, který byl kvalifikován a poskytuje proměnné pro zajištění opakovatelnosti během výrobního procesu, je nutné zajistit **předběžnou specifikaci postupu svařování (pWPS)** - dokument, který obsahuje proměnné, podle nichž se kvalifikuje postup svařování. **Protokol o kvalifikaci postupu svařování (WPQR)** - protokol zahrnující všechny údaje, které jsou nutné pro kvalifikaci pWPS. Podle ČSN EN ISO 15614-1 musí protokol o kvalifikaci postupu svařování obsahovat mimo jiné i kompletní záznam:

- svařovacích parametrů
- měření dráhy a času hoření oblouku (návazně se spočítá rychlost svařování)
- výpočet vneseného tepla

V tab. 8, jsou uvedeny požadavky na třídy zhotovení konstrukcí podle normy EN 1090-2 v souvislosti s požadavky na WPQR.

Tab. 8. Požadavky na třídy zhotovení konstrukcí podle normy EN 1090-2

Třída zhotovení	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4
Požadavky na kvalitu svařování	ISO 3834-4	ISO 3834-3	ISO 3834-2	ISO 3834-2
Schválení postupu svařování WPQR	NE	ISO15614-1	ISO15614-1	ISO15614-1

Z tab. 8 je zřejmé, že pro konstrukce vyšší třídy zhotovení EXC2, EXC3 a EXC4 je přímo předepsané schválení postupu svařování (WPQR) a tudíž je nutné svařovací parametry dokládat s protokolem o provedení zkoušky. K tomu slouží monitorování a záznam svařovacího procesu. Proto již hodně výrobců vybavuje svá zařízení vyšší cenové třídy takovou možností, případně jsou tato zařízení pro připojení monitorovací a záznamové jednotky přizpůsobena.

8.1 Monitorovací systém WeldMonitor

WeldMonitor je systém pro monitorování a dokumentaci svařovacího procesu. Připojením snímačů proudu, napětí, rychlosti svařování, rychlosti podávání drátu se svařovacím zdrojem a za pomoci monitorovacího programu WeldMonitor můžeme průběžně monitorovat základní parametry procesu svařování v celém časovém rozsahu. Záznamy svařovacích parametrů získáváme jak v podobě dat, které se dají dále vyhodnocovat, tak i v podobě

grafické tj. v grafech naměřených veličin. Tento program umožňuje detailní sledování hlavních parametrů – proudu a napětí se vzorkovací frekvencí 25000 Hz.

WeldMonitor – hardware (obr. 8.1) se připojuje na libovolný svařovací zdroj bez ohledu na jeho typ, výrobce, počet. Zároveň se systém připojuje k řídicímu počítači PC. Základním modulem se monitoruje průběh svařovacího proudu a napětí (modul WM-UI). V reálném čase měří efektivní hodnoty těchto veličin a zároveň vypočítává důležitou veličinu, tzv. vnesené teplo. Umožňuje dynamický záznam průběhu svařovacího napětí a proudu, kdy jsou zaznamenány změny v napětí a proudu až do frekvenčního rozsahu 25000Hz, což je nezbytná podmínka pro spolehlivou diagnostiku zkratových, impulsních a sprchových svařovacích procesů. Tento systém je vysoce odolný proti průmyslovému rušení a umožňuje nasazení i při automatizovaném procesu svařování pro sériové sledování kvality svařovaných výrobků. Všechny snímané parametry jsou ověřeny v akreditované metrologické zkušebně ČR.

Přehled jednotlivých snímačů:

- modul pro manuální ovládání programu,
- modul pro snímání proudu a napětí,
- snímač teploty materiálu,
- snímač rychlosti pojezdu,
- snímač průtoku plynu.

Přehled sledovaných veličin:

- čas svařování,
- rychlost svařování (průměrná),
- měrný tepelný příkon,
- spotřeba drátu,
- spotřeba ochranného plynu.



Obr. 8.1: Weld monitor hardware [6]

WeldMonitor - software je program, který má intuitivní ovládání a umožňuje profesionálně zobrazovat výsledky reálných nasnímaných dat. Dále program umožňuje tisk protokolů podle stávajících evropských a mezinárodních norem v oblasti svařování. Je zde zakomponována otevřená databáze firem, svářečů a jejich zkoušek, zařízení, základních a přídatných materiálů, plynů, dozorů svařování, postupů svařování a záznamy průběhu svařování jednotlivých svarů s možností uložení digitální fotografie [12].

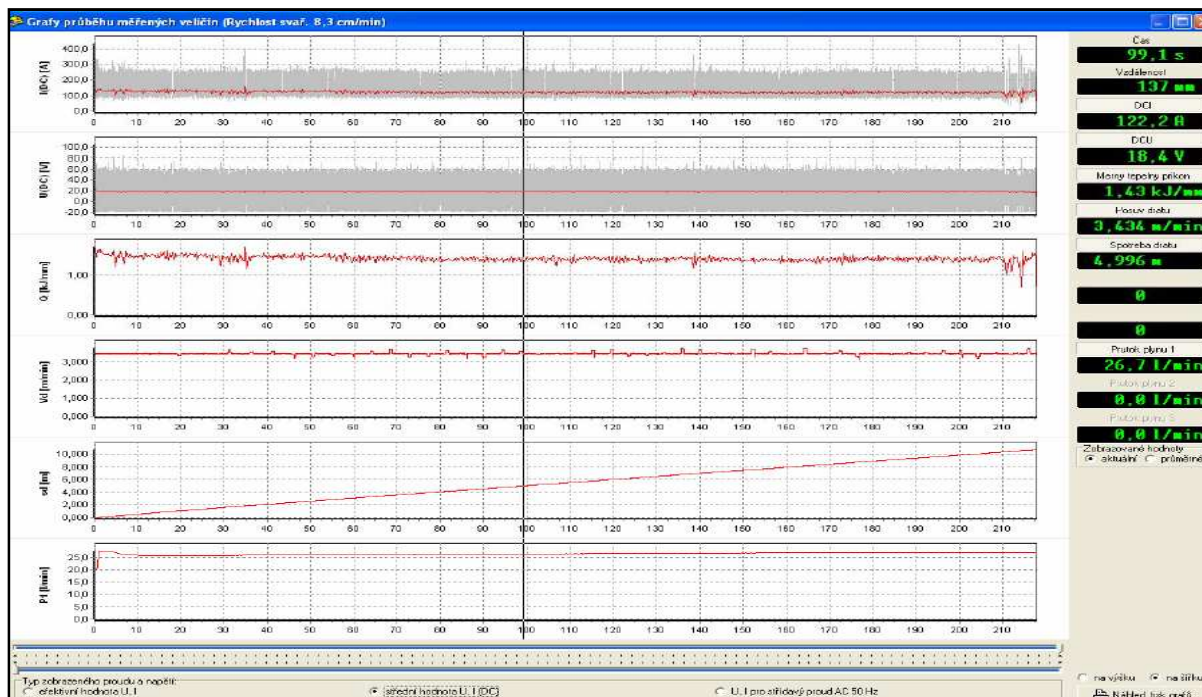
Grafický a datový výstup zaznamenaných svařovacích parametrů

Systém WeldMonitor 3.5 umožňuje monitorovat obloukové metody svařování. Systém monitoruje metody MIG, MAG a jim příbuzné metody. Zaznamenává správnost nastavených parametrů při svařování (tzv. pracovní bod v pracovním poli). Díky systému WeldMonitor a následným zkouškám svarů byla prokázána závislost proudu a napětí, která je popsána pracovním polem. To je oblast grafu (svislá osa napětí, vodorovná osa proud), kde by se měl pohybovat průsečík aktuálního svařovacího proudu a napětí (pracovní bod) obr. 8.2. Pracovní pole je ovlivněno těmito faktory: základní materiál, ochranný plyn a průměr svařovacího drátu. Z toho plyne velké množství kombinací a zobrazení pracovních polí, které jsou v programu jednoduše popsány a jejich zvolení pro danou metodu svařování je snadné a zcela automatické. Pracovní pole je rozděleno podle svařovacího oblouku na oblast zkratového, přechodového, sprchového a impulsního oblouku. Na obr. 8.3 je znázorněn

záznam svařovacího procesu s příslušnými měřeními veličinami (svařovací proud, svařovací napětí, vnesené teplo, rychlost podávání drátu).

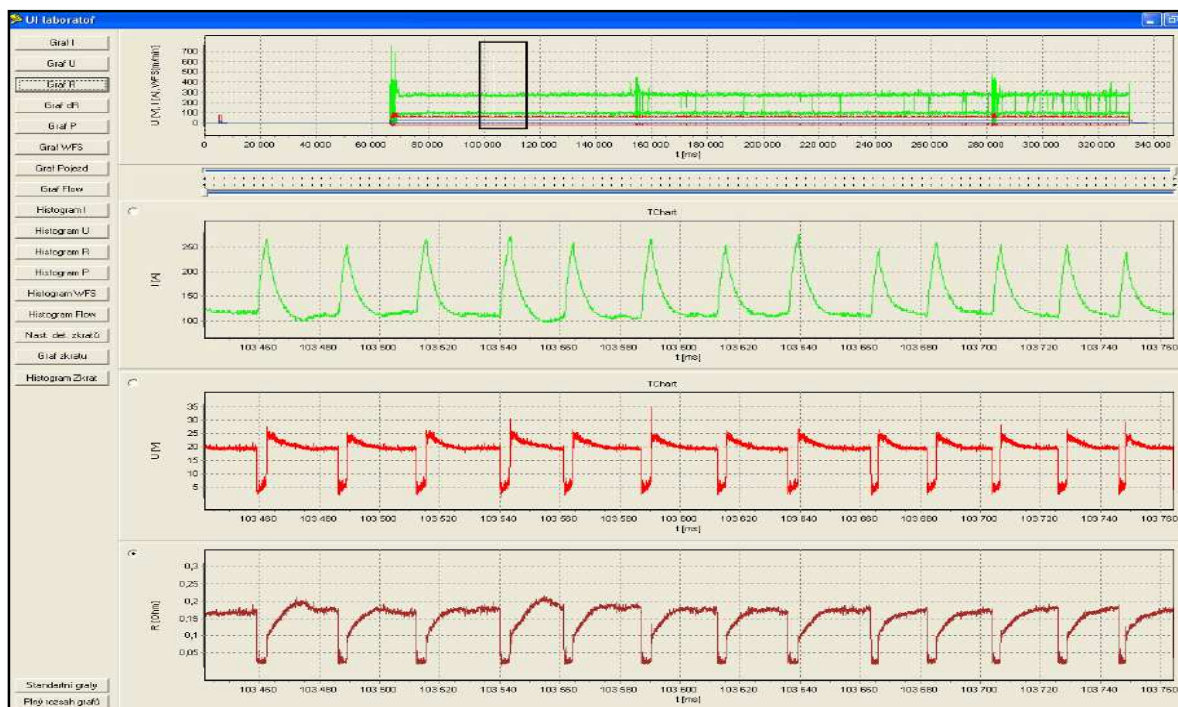


Obr. 8.2: Okno pracovního pole s pracovním bodem[12]



Obr. 8.3: Ukázka záznamu svařovacího procesu[12]

Pomocí nabídky programu-UI laboratoř obr. 8.4, můžeme podrobně sledovat v grafické podobě např. jednotlivé zkratky jejich četnost a pravidelnost, hodnoty proudu, napětí a mnoho dalších volitelných veličin (odpor, histogramy veličin atd.).



Obr. 8.4: Okno UI laboratoře[12]

S výhodou můžeme použít i funkci systému export naměřených dat, kdy nám naměřená data převede do souboru xls. Tyto datové soubory využíváme pro zpracování např. v softwaru Microsoft Excel či v jiných aplikacích.

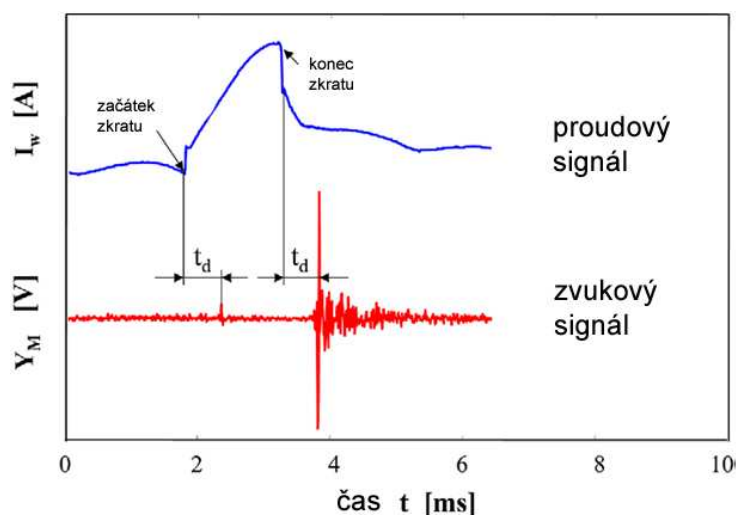
8. 2 Nové studie monitorování svařovacích procesů

Současný vývoj a výzkum zaměřený na monitorování a vyhodnocování svařovacích procesů se zabývá využitím dalších dostupných a efektivních prostředků k zajištění kontroly jakosti svarových spojů. V následujících kapitolách jsou popsány nové studie zabývající se především využitím záznamů akustického vlnění, analýzou optického spektra plazmy elektrického oblouku a termografie pro on-line detekci vad svarových spojů.

8.2.1 Studie aplikace akustických signálů pro monitorování obloukového svařování

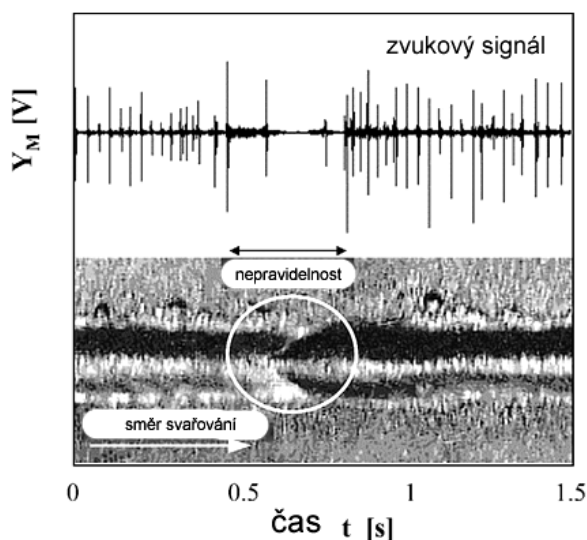
Akustické vlny, které se vytváří při procesu svařování metodou 131, 135, obsahují informace o chování oblouku, svarové lázně a přenosu přídavného materiálu obr. 8.5. Ve studii

GRADA [31] a kol., bylo provedeno měření akustických vln vytvořených během procesu GMAW. Výsledky naznačují, že akustické vlny elektrického oblouku vykazují odlišné charakteristiky každého režimu svařování. Akustickými signály lze snadno vyhodnotit stabilitu procesu a zjistit podmínky svařování, kdy se ve svaru vyskytly vady.



Obr. 8.5: Záznam svařovacích parametrů v průběhu jednoho zkratu a odpovídající akustický signál [31]

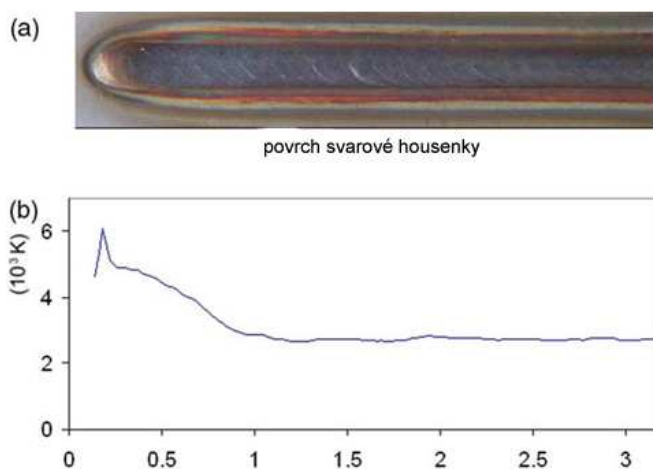
Na obr. 8.6 je uveden záznam akustického signálu, kde se ve vzorku vyskytla vada svaru. Je zřejmé, že na záznamu je evidentně viditelná oblast, kde se vada vyskytuje. Tímto způsobem lze detekovat vady na základě výrazné změny akustického signálu. K těmto akustickým metodám je potřebné používat citlivé akustické přístroje s převodníky akustických signálů a tyto signály dále zpracovávat a analyzovat.



Obr. 8.6: Záznam zvukového signálu [31]

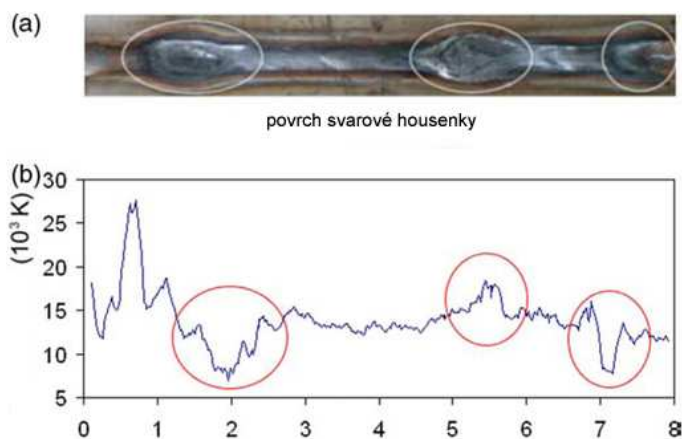
8.2.2 Analýza optického spektra plazmy elektrického oblouku

V práci MIRAPEIX a kol. [32] je uveden metodický postup, jak lze pomocí analýzy optického spektra detekovat vady svarů. Navržený algoritmus vyhodnocuje on-line hodnocení kvality svarů, což umožňuje detekci vad, jako jsou např. oxidace ve svarové lázni z důvodu nedostatečného průtoku ochranného plynu nebo nedostatečného závaru způsobeného nestabilitou svařovacího procesu. Navrhované algoritmy byly úspěšně vyzkoušeny při reálném obloukovém svařování. Na obr. 8.7 vidíme zhotovený svar bez vad a časový průběh teplot plazmy v elektrickém oblouku.



Obr. 8.7: Příklad záznamu svarového spoje bez vady [32]

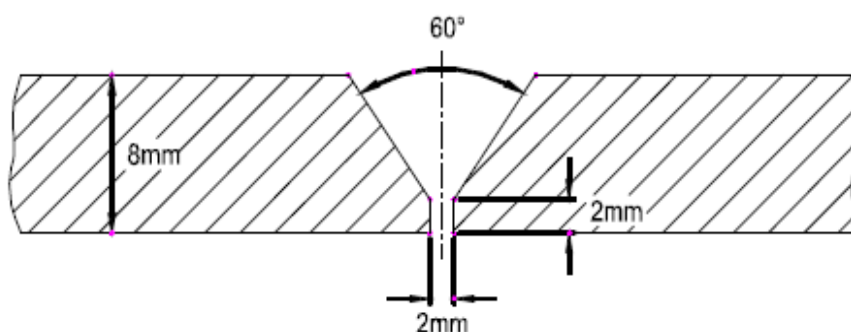
Na obr. 8.8 je znázorněn zhotovený svar, kde se vyskytují vady a zcela zřetelně lze vyčíst tyto vady na záznamu teplot plazmy elektrického oblouku. Lze tedy aplikovat snímání teploty plazmy v elektrickém oblouku jako on-line monitorování svařovacích parametrů.



Obr. 8.8: Detekce vad ve svaru [32]

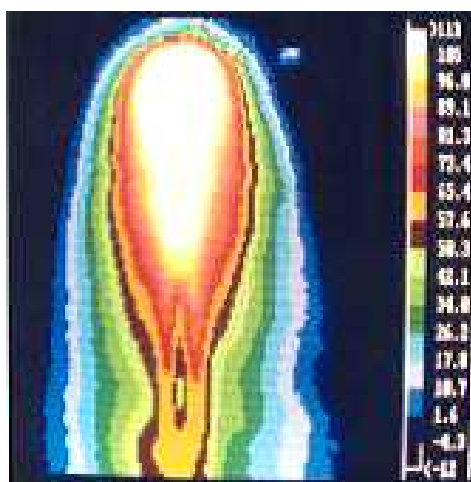
8.2.3 Termografie pro on-line detekci vad svarových spojů

VENKATRAMAN a kol. [33] publikují použití termovizních senzorů pro detekci vad, jako je nedostatečný závar svarového kovu do základního materiálu a odhad hloubky závaru během (TIG) svařování. Výsledky potvrzují, že termovizní technika dokáže detekovat nedostatečnou hloubku závaru -online. Pro studium této problematiky byly použity vzorky tupého svaru dle obr. 8.9.



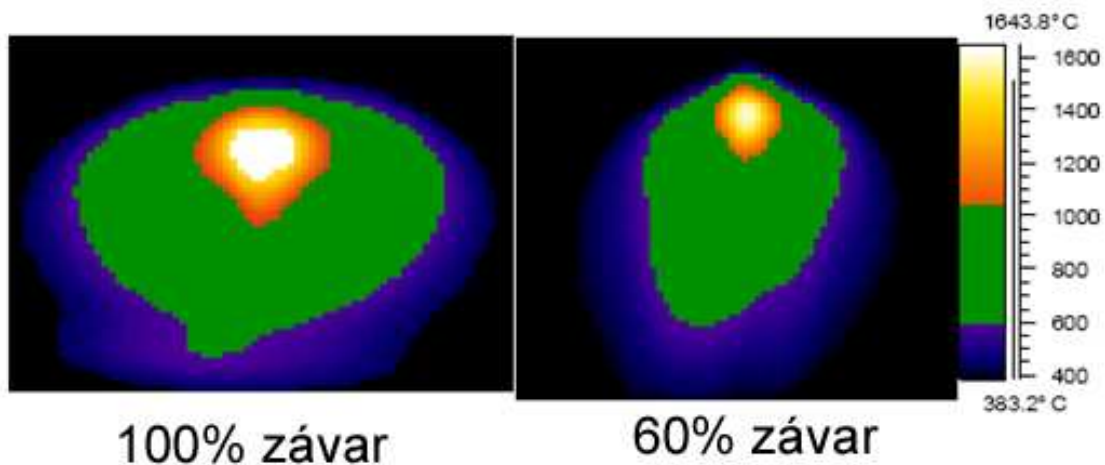
Obr. 8.9: Připravený vzorek pro experiment [33]

Na provedené experimenty byla použita termovizní kamera s citlivostí 0.1 K s frekvencí 30 snímků za sekundu, což je dostačující pro prohlížení on-line svařování. Kamera byla umístěna ve vzdálenosti 1,0 m od svařovaného vzorku a vhodně zaměřena na to, aby celý svar bylo možné sledovat při svařování. Bylo možné pozorovat rozložení teploty ve svarové lázni a teploty okolí svarové lázně. Snímky byly zaznamenány pomocí flash disku. Snímky byly následně přehrávány a analyzovány. Nedostatečný závar lze sledovat pomocí izotermických křivek na obr. 8.10 (v podstatě vzduchová mezera v kořenové oblasti) se objeví na obrázku jako chladné místo na středu svaru, kdy rozdíl teplot je větší než 7 K.



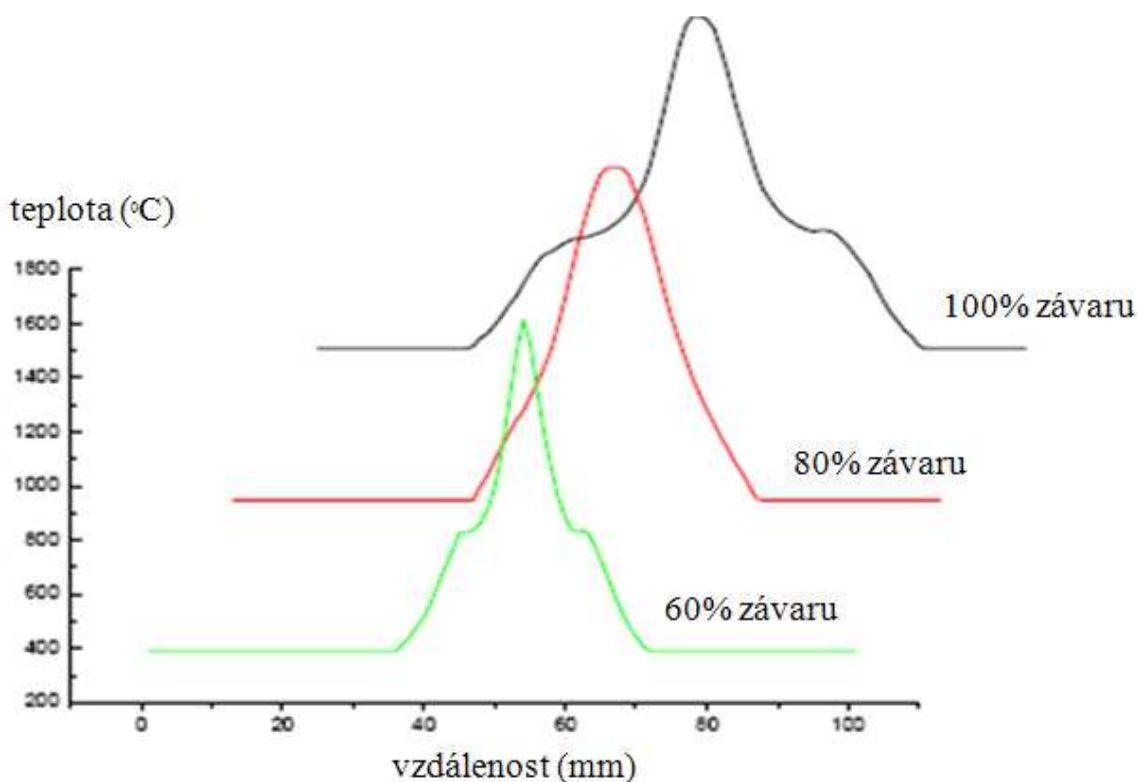
Obr. 8.10: Izotermický profil svarové lázně při nedostatečném závaru

Efekt hloubky závaru byl vyšetřován při svařování různých tloušťkách materiálů, v rozmezí 2 - 5 mm, s různými hodnotami svařovacího proudu. Na obr 7.11 jsou zobrazeny teploty izotermické mapy dvou svarů se 100% a 60% hloubky závaru.



Obr. 8.11: Izotermický profil svarové lázně při různých hodnotách závaru [33]

Na obr. 8.12 je znázorněn profil rozložení teploty napříč svarovou lázní pro tři různé hloubky závaru. Můžeme pozorovat, že hloubka závaru se zvyšuje se zvyšující se teplotou a šířkou plochy pod křivkou.



Obr. 8.12: Profil křivek teplot pro tři různé hloubky závaru [33]

Měření byla ověřena pomocí metalografických výbrusů. Úseky řezů byly vybrány podle zaznamenaných dat. Obrázek 8.13 zobrazuje místo, kde byl zaznamenan termokamerou nedostatečný závar svarového kovu do základního materiálu.



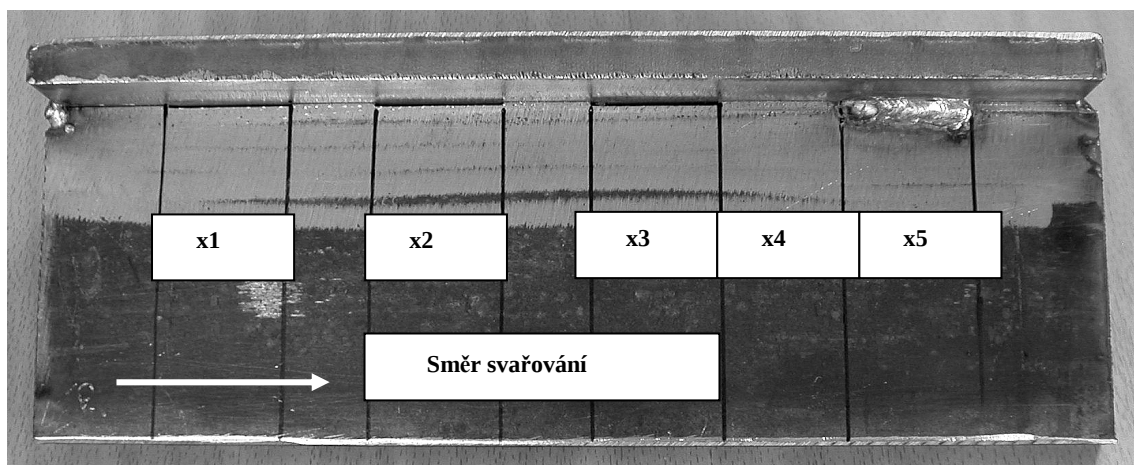
Obr. 8.13: Metalografické výbrusy a) nedostatečný závar, b) úplný závar

Poznatky:

- 1. Zvuková analýza svařovacího procesu je vhodná pro monitorování procesu v reálném čase. Studie potvrdila, že tyto metody jsou velmi dobrým ukazatelem stability procesu GMAW hlavně pro zkratový režim.*
- 2. Nová metoda pro analýzu teploty plazmatu, je schopna zajistit jakosti svaru a následně snížit náklady na opravu svarových spojů. Operátor umožňuje rychlé a přesné stanovení střední vlnové délky spektrálních emisních čár, což umožní provést v reálném čase on-line detekci vad v průběhu svařování.*
- 3. Ze studie termografie je podstatné, že teplota povrchu svarové lázně a její okolí jsou citlivé ukazatele kvality svarového spoje. Experimentální výzkum jasně dokazuje, že termovizním snímačem lze, zjistit nedostatečný závar a definovat jeho hloubku.*

9. Dílčí výsledky a predikce experimentů

NEUMANN a HRSTKA [15] posuzovali vliv vybraných odchylek od nastavení parametrů pro zhotovení koutového svaru za určených optimálních parametrů. Byl především hodnocen vliv špatného sestavení koutových svarů, tj. vada 617 podle ČSN EN ISO 5817 a vliv provedeného stehu. Pro zhotovení zkušebních svarů byly použity vzorky o rozměru 12 x 100 x 250 mm připravené z ploché tyče z materiálu ČSN EN 10027 – S275JR (11 375.1). Přídavný materiál byl od firmy ESAB a to plný hlazený drát OK AristoRod 12.50 Ø 1,2 mm. Jako ochranná atmosféra byl použit plyn FERROMAX PLUS (68% Ar, 12 % CO₂, 20 % He) od firmy AIR PRODUCTS. Na obr. 9.1 jsou vidět jednotlivá místa, kde jsou vyfrézované drážky simulující špatné sestavení svaru a steh. Na obrázku jsou vyznačena také místa pro odběr vzorků k metalografickému rozboru – x značí číslo vzorku, číslo značí místo odběru metalografického vzorku. Délka můstku mezi mezerami je 20 mm ostatní úseky jsou dlouhé 30 mm. Na jediném zkušebním vzorku bylo možno sledovat vliv tří hodnot špatného sestavení (tři různé hloubky vyfrézování), jedno místo bez mezery a jedno místo se stehem. Stehy byly zhotoveny elektrodou E 38 3 B 42, tj. E – B121. [2] Výchozí svařovací parametry byly zvoleny na základě diplomové práce [1] – I = 380 A, U = 28,2 V, rychlost svařování 0,68 m.min⁻¹ a rychlost drátu 13 m.min⁻¹, množství plynu 18 l.min⁻¹. [15]

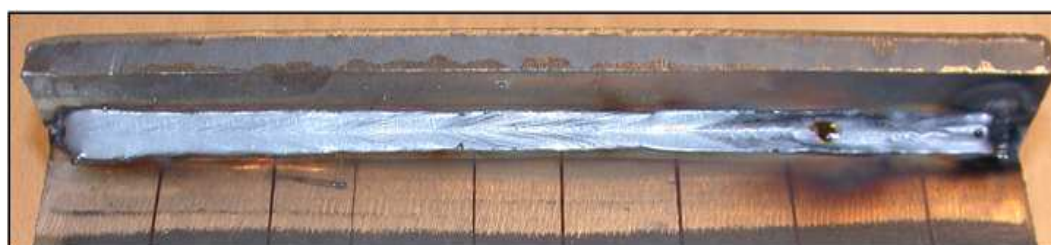


Obr. 9.1: Vzorek před zhotovením zkušebního svaru [15]

Zvolené hodnoty velikosti mezer vycházejí z předpokládané jmenovité velikosti koutového svaru 8 mm, resp. maximální hodnota mezery je o něco nižší než by odpovídalo stupni jakosti C, t.j. 2,1 mm. Parametry velikosti mezer jsou v tab. č. 9.

Tab. 9 Parametry velikosti mezer

Číslo měření	Číslo vzorku - x	Mezera 1 (mm)	Mezera 2 (mm)	Mezera 3 (mm)	Steh Ø elektrody (mm)
T1	1	0,50	0,75	1,00	2
T2	4	1,25	1,50	1,75	2,5
T3	2	0,50	0,75	1,00	2
T4	5	1,25	1,50	1,75	2,5
T5	3	0,50	0,75	1,00	2
T6	6	1,25	1,50	1,75	2,5

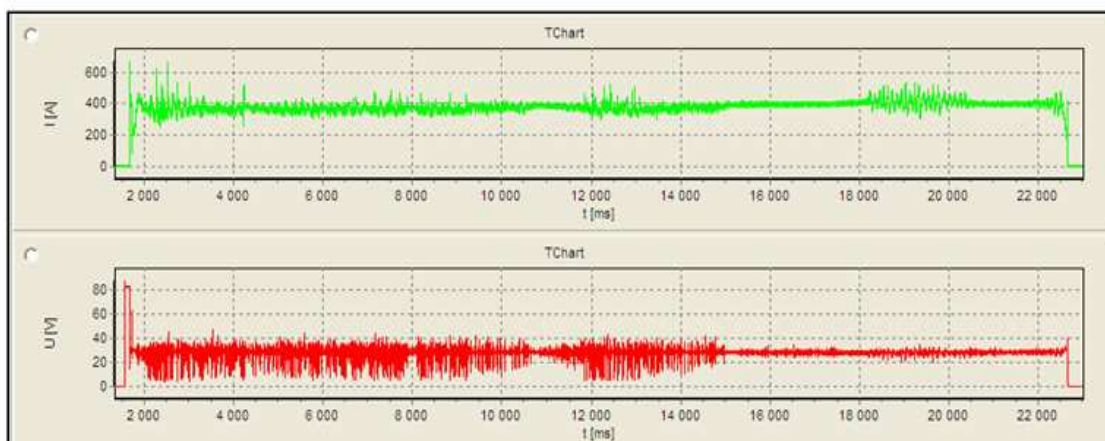


Mezera 1

Mezera 2

Mezera 3

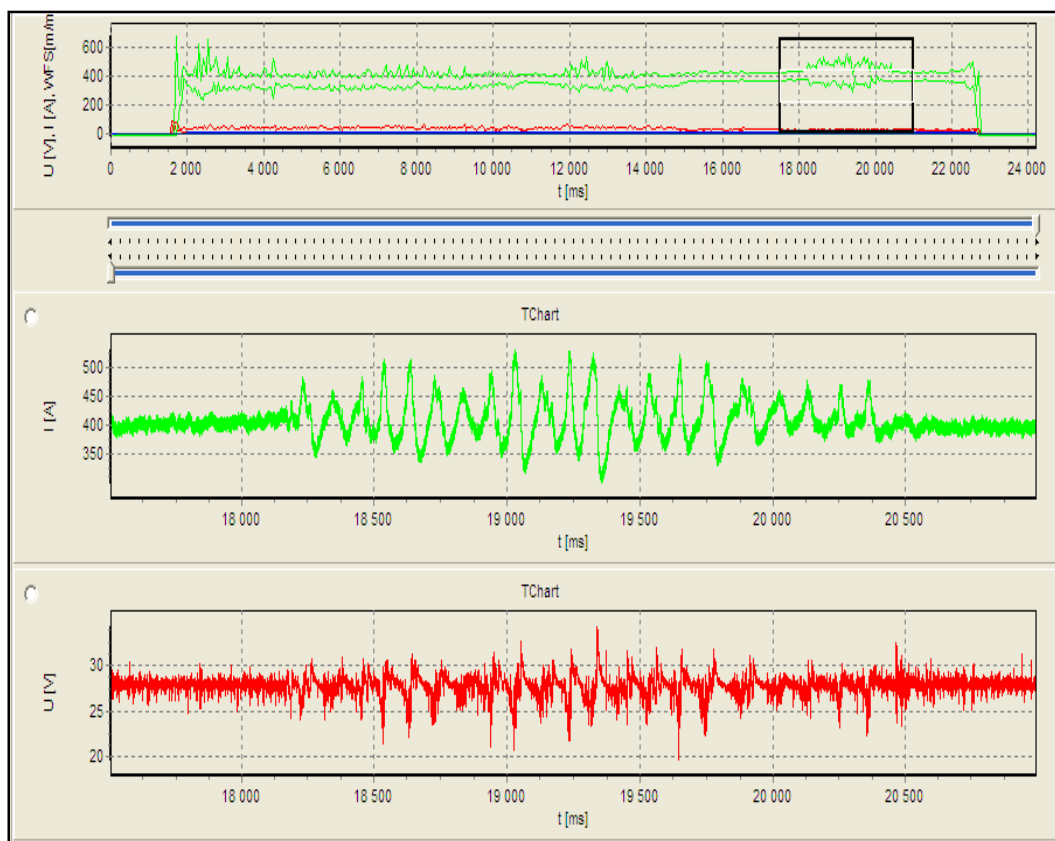
Steh


Obr. 9.2: Svařovaný vzorek č. 4 a záznam průběhu vybraných veličin svařovacího procesu svařovací proud a napětí, rychlost svařování $0,68 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ [15]

Na obr. 9.2 je uveden pouze příklad záznamu vybraných dat pro svar u vzorku 4 současně s fotografií svaru, aby bylo možno jednotlivé úseky záznamu přiřadit k místu svařování. Změny na záznamu veličin jsou zřetelné i na celkovém pohledu na záznam. Podrobná analýza je možná pomocí časové lupy. Ze snímku svaru je také zřetelně vidět, že s ohledem

na velikost svarové lázně v jednotlivých úsecích svaru nedochází k ustálení podmínek tvorby svaru a svar se ve sledovaných úsecích mění [15].

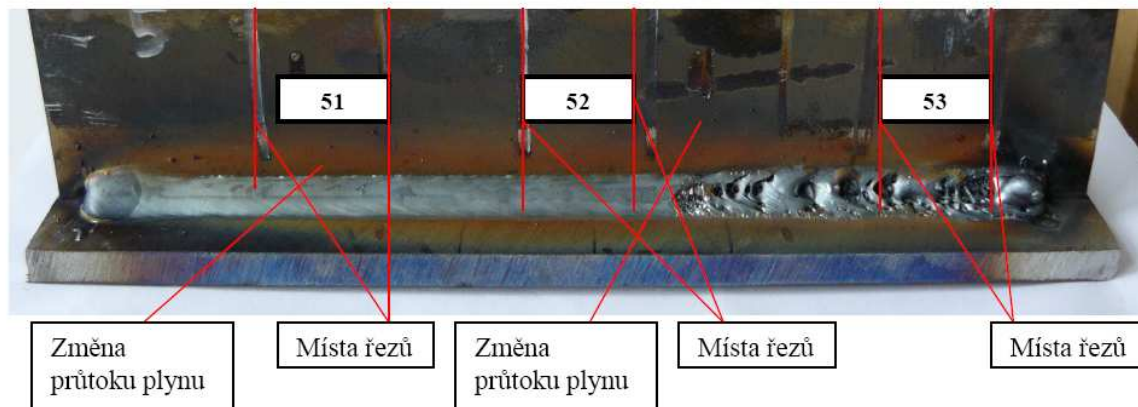
Při definici určitého časového úseku, vymezením ukazatele v modulu UI laboratoře, získáváme detailní průběh sledovaných veličin, například v místě stehu obr. 9.3.



Obr. 9.3: Detailní průběh svařovací proudu a napětí v místě stehu [15]

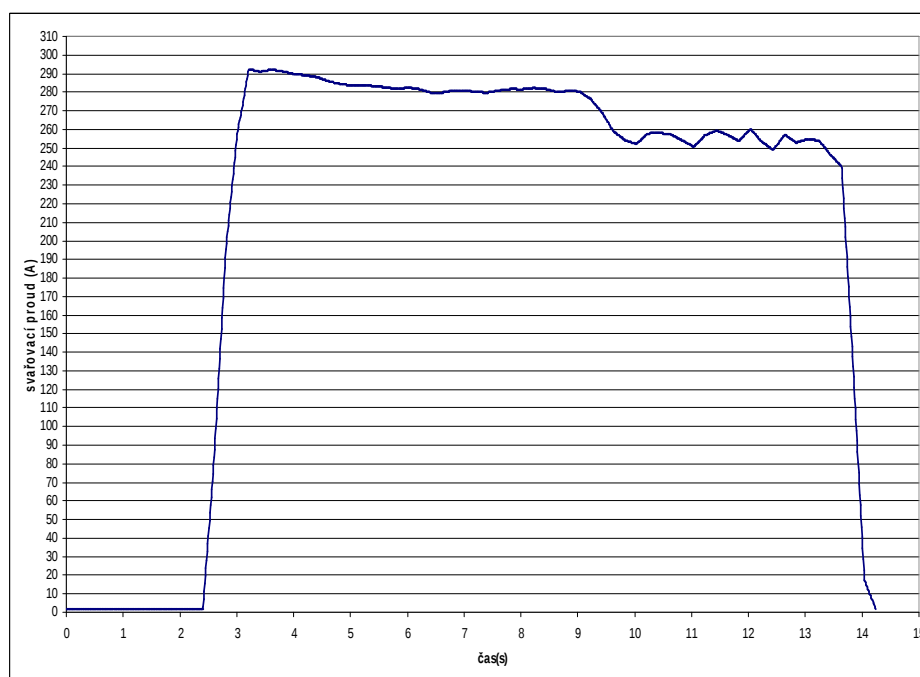
DRÁPELA [18], vyhodnocuje vliv vybraných parametrů na geometrii svarů u MAG procesu svařování. Mezi tyto parametry patřilo, špatné sestavení koutových svarů, vyosení hořáku a omezení průtoku ochranného plynu. Pro zkušební svarové spoje byly použity vzorky o rozměru 8 x 100 x 250 mm připravené z ploché tyče z materiálu ČSN EN 10027 – S275JR (11 375.1). Přídavný materiál byl plný hlazený drát OK AristoRod 12.50 Ø 1,2 mm. Jako ochranná atmosféra byl použit směsný ochranný plyn FERROMAX PLUS (68% Ar, 12 % CO₂, 20 % He). Svařovací parametry byly pro experimenty zvoleny takto: rychlost podávání drátu $v_d = 8,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost svařování $v_s = 0,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, svařovací napětí $U = 33 \text{ V}$, průtok ochranného plynu $18 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, vzdálenost kontaktní špičky nad povrchem CTWD= 17 mm. Nejvýznamnějším vlivem, který byl hodnocen, bylo omezení průtoku ochranného plynu

z 18 l.min^{-1} na 6 l.min^{-1} a následné úplné zavření přívodu ochranného plynu. Na obr. 9.4 je zobrazen svařený vzorek, kde jsou vyznačena místa pro odběr vzorků k metalografickému rozboru.

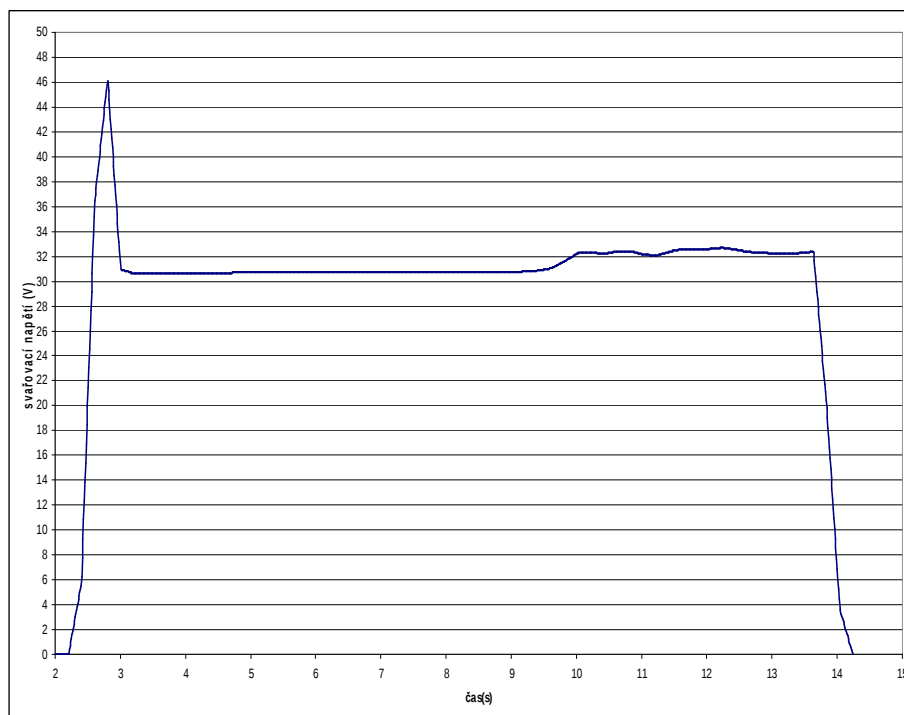


Obr. 9.4: Svařený vzorek, kde jsou vyznačena místa pro odběr vzorků k metalografickému rozboru [18]

V rámci experimentů byl využit monitorovací systém WeldMonitor pro sledování průběhu svařovacího procesu. Na obr. 9.5 a na obr. 9.6 je uveden průběh zaznamenaných dat, který byl exportován a zpracován programem MS Excel. Z grafu svařovacích parametrů je zřejmá oblast nestability v místě, kdy byl zcela uzavřen průtok ochranného plynu.

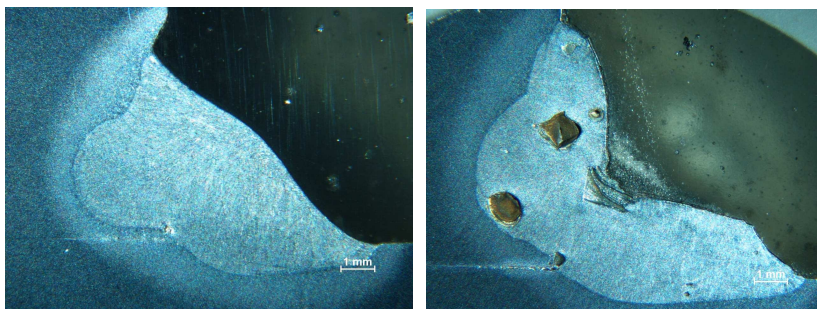


Obr. 9.5: Průběh svařovacího proudu



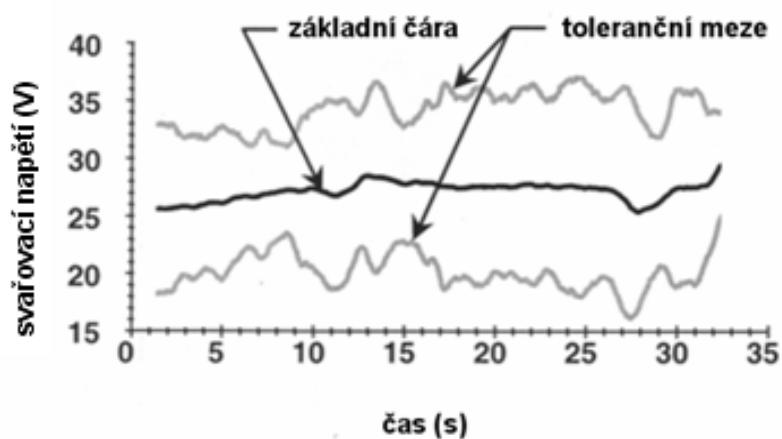
Obr. 9.6: Průběh svařovacího napětí

Na metalografických výbrusech na obr. 9.7 je zřejmá změna geometrie svaru. Je zde i patrný výskyt pórů ve svarovém kovu, které jsou nevyhovující.



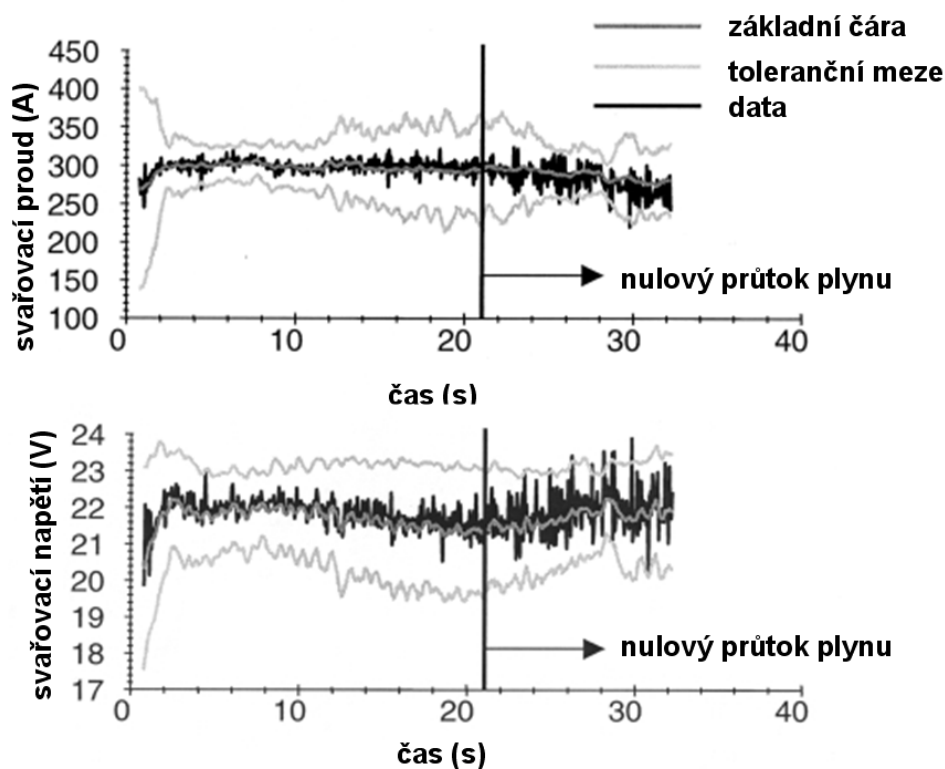
Obr. 9.7: Metalografické výbrusy svaru vorků 52,53 [18]

Podobnou problematikou se zabývá QUINN a spol. [16], kdy při zaznamenávání svařovacích parametrů simulují tyto defekty: špatné sestavení dílů, snížený průtok ochranného plynu, mastnotu na povrchu základního materiálu. Pomocí různých algoritmů testují a vyhodnocují záznamy svařovacích parametrů, kdy sledují odchylku od tzv. základní čáry obr. 9.8. Základní čára je zkonstruovaná z dříve zaznamenaných signálů, kde se vady nevyskytovaly. Algoritmy ukázaly různou citlivost při špatném sestavení dílů (mezery).



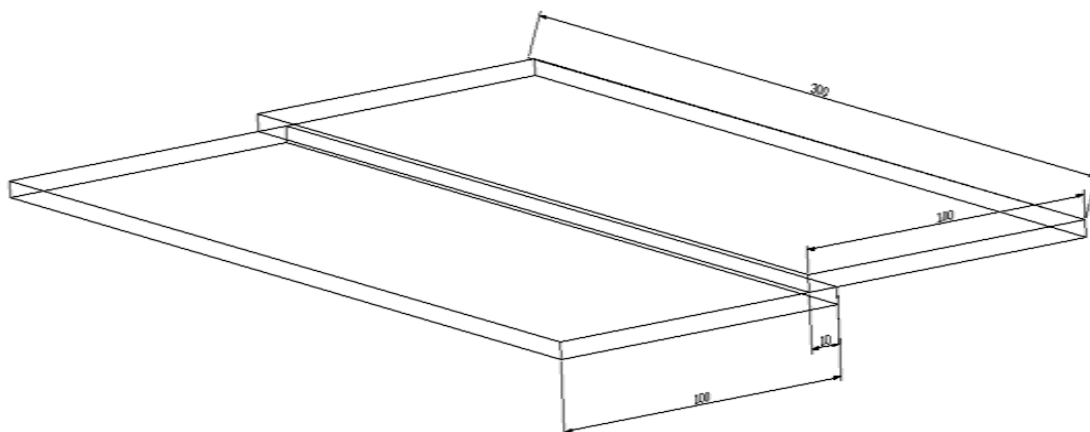
Obr. 9.8 Odchylky od základní čáry [16]

Na obr. 9.9 je znázorněn průběh svařovacího proudu a napětí při simulaci snížení průtoku ochranného plynu na nulovou hodnotu. Ze záznamu je zřejmé, že v čase, kde byl pozastaven průtok ochranného plynu, je výrazná oblast nestability (výrazná změna parametrů) a překročení tolerančních mezí.



Obr. 9.9 Průběhy zaznamenaných veličin [16]

Práce HUDCE a HRSTKY [22] se zabývá využitím maximálních svařovacích parametrů pro zmapování parametrické oblasti za účelem vytvoření optimálních svarových spojů. Na experimenty byl použit plech tloušťky 3, 4 a 5 mm oceli S235JR. Příkladný materiál byl OK Aristorod 12.50, Ø 0,8 mm, ochranný plyn byla dvousložková směs Inomaxx (92% Ar, 8% CO₂). Svařované vzorky byly přeplátované spoje obr. 9.10.

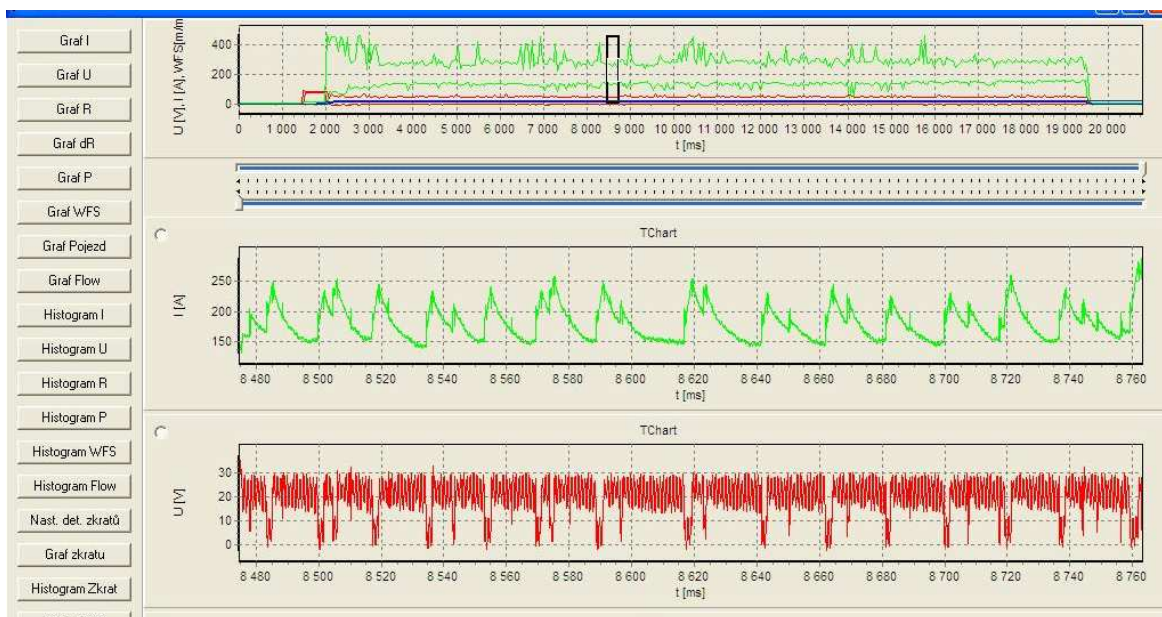


Obr. 9.10: Přeplátovaný spoj s vyznačenými rozměry použitých plechů

Vlivem vysokých svařovacích rychlostí se na svarových spojích vytvořil tzv. Humping efekt viz kapitola 5, který úzce souvisí s jakostí svarových spojů. Všechny experimenty byly zaznamenávány pomocí monitorovacího systému WeldMonitor a taktéž byly vyhodnoceny metalografické výbrusy. Na obr. 9.11 je vidět projev Humping efektu, který se vyskytoval při překročení svařovací rychlosti $v_s = 1,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.



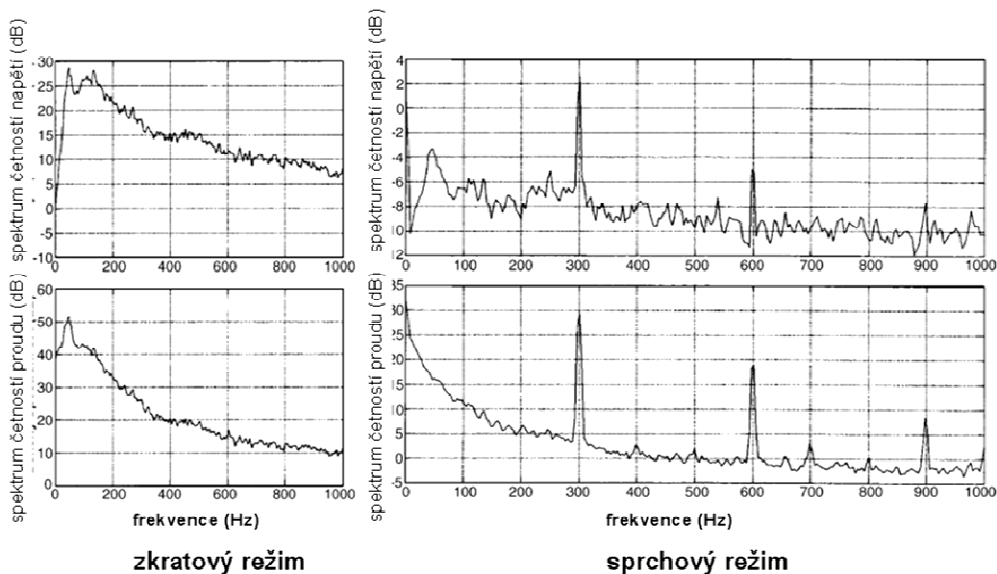
Obr. 9.11: Humping efekt na přeplátovaném spoji



Obr. 9.12: Průběh svařovacích parametrů

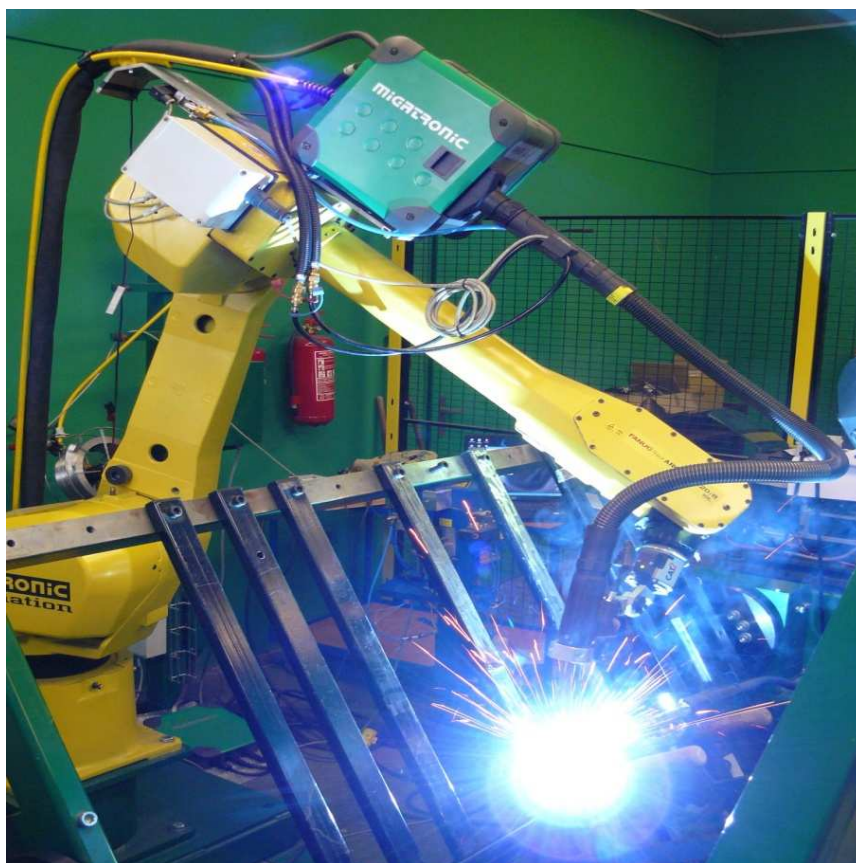
Na záznamu je patrný zkratový přenos roztaveného kovu u svařovaného vzorku. Tento proces je ovšem velmi nestabilní, kdy vlivem vysoké svařovací rychlosti přesahující $1,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ se vyskytl humping efekt.

ALFAROA a kol. [17] se zabývá kolísáním napětí a proudu při zkratovém a sprchovém režimu přenosu kapek u MAG. Výsledky ukázaly, že zkratový přenos je mnohem méně stabilní než sprchový režim. Zpracování signálu bylo provedeno pomocí Fourierovy transformace a vyhodnocování frekvenčních spekter svařovacích parametrů. Spektrální analýza ukázala pro zkratový režim charakteristickou frekvenci procesu kolem 60 Hz a pro sprchový režim charakteristický kmitočet 300 Hz obr. 9.15.



Obr. 9.15: Spektrální analýza zaznamenaných veličin [17]

HUDEC a HRSTKA [22] vyhodnocovali několik sad experimentů, které určují postup, jak dosáhnout maximální hustoty energie metody 135 pro vytvoření optimálního zhotovení koutového svaru. Všechny zhotovené experimenty byly realizované na robotickém pracovišti. Toto pracoviště bylo vybaveno svařovacím robotem se svařovacím hořákem pro metodu 135 a svařovacím zdrojem Migatronik Sigma 500 obrázek 9.16. Cílem této práce bylo i vyzkoušet maximální výkon toho svařovacího zdroje. Metalografické výbrusy vzorků svařovaných v extrémních případech a záznamy svařovacího proudu jsou uvedeny v příloze č. 2. Svařovací parametry byly snímány monitorovacím zařízením WeldMonitor.



Obr. 9.16 Robotizované pracoviště

V určitých případech se vyskytly ve svarových spojích vady, které byly zaznamenány monitorovacím zařízením a vyhodnoceny. Při vysokých rychlostech svařování přesahující $1\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, se u svařovaných vzorků vyskytl humping efekt, který je popsán v kapitole 5. NGUYEN [23] popisuje tento efekt, jako nepravidelnost povrchu svarové housenky. Pravidelný humping efekt je zřejmý na obr. 9.17. Na obr. 9.18 je záznam svařovacích

parametrů po svaření vzorku 33A, kde je zřejmá pravidelnost průběhu svařovacího proudu s velkou diferencí těchto hodnot. Tyto vzorky byly svařovány speciálním přenosem kovu: sprchovým přenosem s krátkým obloukem (Force arc) [24]. Při tomto přenosu kovu dochází ke zkratu tavící se elektrody a svařového kovu. Při detailním rozboru tohoto záznamu obr. 9.19 je zřejmé, že svařovací proud kolísá mezi 170 a 400 A a svařovací napětí mezi 20 a 40 V což dokazuje velmi nestabilní svařovací proces. Při výskytu humping efektu, je důležité si uvědomit, že v okamžiku snímání svařovacích parametrů nemusí vždy být zaznamenána nestabilita procesu, neboť nestabilita svařové lázně může nastat až po snímání svařovacích parametrů v daném okamžiku.



Obr. 9.17 Pravidelný humping efekt na svařeném vzorku

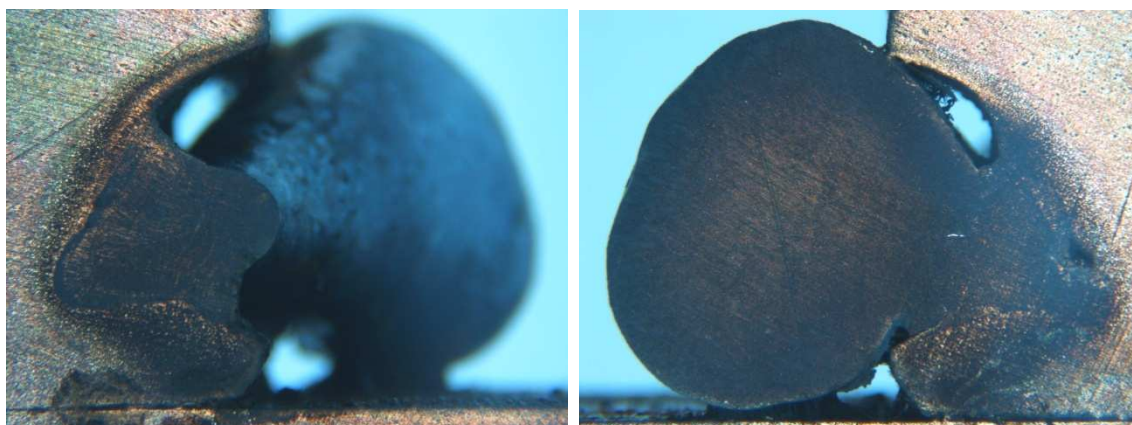


Obr. 9.18 Záznam svařovacích parametrů



Obr. 9.19 Detailní rozbor záznamu svařovacích parametrů

Na metalografických výbrusech ze svařovaného vzorku 33A je možné vidět charakteristické znaky humping efektu z hlediska geometrie svaru – obr. 9.20.



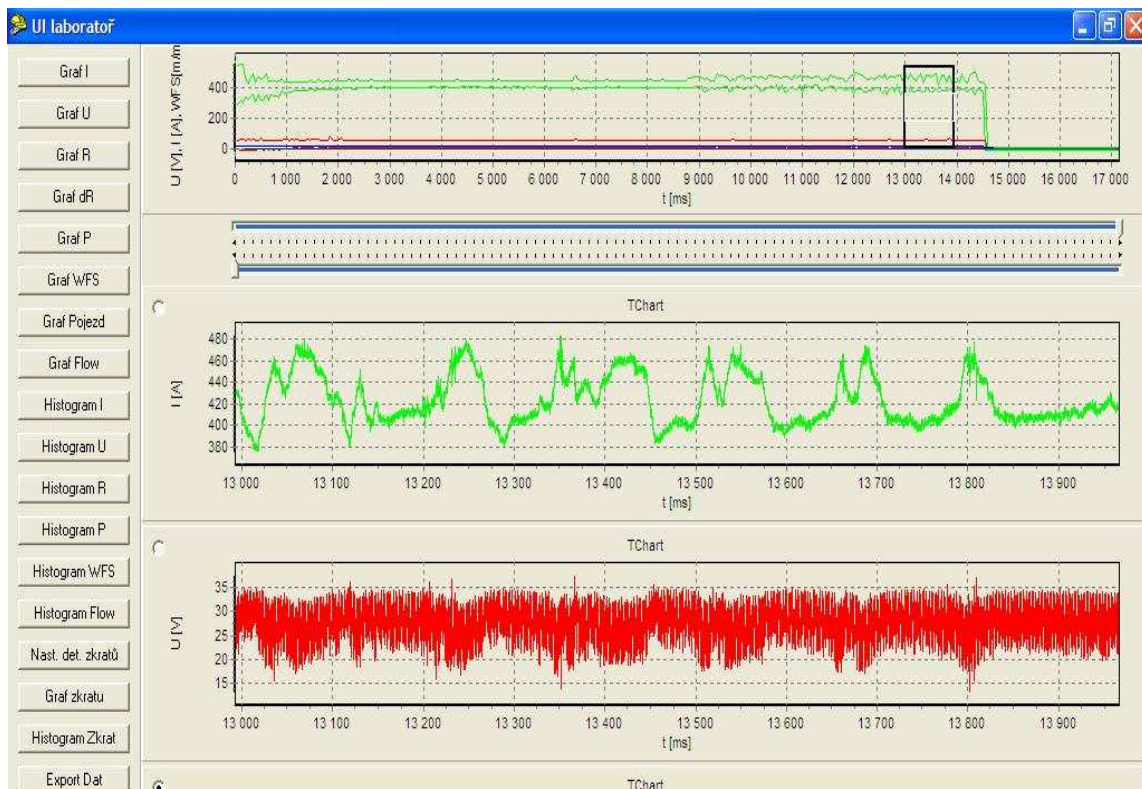
Obr. 9.20 Metalografické výbrusy

V průběhu realizace svařování vzorků byla zaznamenána nedovolená vada dle normy ČSN EN ISO 6520-1 resp. podle určování kvality svarových spojů ČSN EN ISO 5718. Tato vada byla definována nadměrným výskytem pórů ve svarovém kovu. Výskyt pórů byl způsoben znečištěním svařovací hubice hořáku a tím omezením průtoku ochranného plynu na minimální hodnotu. Na tento problém poukazuje KOMÍNEK [25]. Důležitá je nejen čistota hořáku, ale i dostatečné množství ochranného plynu způsobené zajištěním neměnné světlosti přívodu plynu. Na záznamu svařovacích parametrů obr. 9.21 je zcela evidentní, že v deváté sekundě záznamu se začíná vyskytovat nestabilita svařovacího procesu, která je následkem znečištění hubice svařovacího hořáku. Při detailním rozboru náběhu na nestabilitu procesu

lze odečíst rozptýl svařovacího proudu téměř o 100 A – obr. 9.22. Lze tedy s určitou přesností určit, v jakém okamžiku došlo k nedostatečnému průtoku ochranného plynu, nebo jeho snížení na nulovou hodnotu.



Obr. 9.21: Záznam svařovacích parametrů



Obr. 9.22: Detailní rozbor záznamu svařovacích parametrů v oblasti nestability

Výskyt nevyhovujících pórů ve svaru je zřejmý na metalografickém výbrusu. Výbrus byl zhotoven v zobrazené oblasti nestability svařovacího procesu obr. 9.23.



Obr. 9.23: Metalografický výbrus

Poznatky:

- 1. Vyhodnocováním experimentů v uvedených pracích, byly potvrzeny teoretické poznatky o chování elektrického oblouku zejména při svařování metodou 135. Stabilita elektrického oblouku je výrazně ovlivněna svařovacími parametry především svařovacím proudem, svařovacím napětím a rychlostí svařování.*
- 2. Simulované faktory ovlivňující jakost, jako např. špatné sestavení koutového svaru (mezera), snížení množství průtoku ochranného plynu, zkracování oblouku vlivem nastavení výletu drátu, se projevily, jako významné v závislosti na dodržení předepsané jakosti svaru.*
- 3. Při snaze získání co nejvyšší rychlosti svařování se vyskytla periodická nestabilita tavení a velikosti svarové lázně. Teoreticky je tato nestabilita popsána v kapitole 5.*

10. Plánování programu experimentů

Experimentální optimalizace procesu je s výhodou prováděna formou statisticky navrženého programu experimentů DOE [39]. Nejpoužívanější postupy plánování experimentů, které jsou zpravidla aplikovány na optimalizaci obloukového svařování lze rozdělit na 3 kategorie:

1. Statistické Taguchi-ho metody.
2. Metody DOE, založené na tzv. metodách odezvového povrchu (Surface Response Methods). Jednou z nejpoužívanějších metod je metoda středové kompozice [40].
3. Heuristické metody optimalizace parametrů, např. založené na tolerančních polích.

10.1 Taguchiho metoda [41,42]

Jedna z nejpoužívanějších statistických metod v průmyslové praxi je zaměřena na vytvoření “robustního návrhu“ výběru a seřízení procesních faktorů založená na zhodnocení síly působení jednotlivých proměnných – tedy výběr faktorů a kombinaci jejich hladin, které vykazují největší odstup od šumu získané pomocí analýzy rozptylu. Její výjimečnost je zejména ve volbě ortogonálních polí, kde každý sloupcový vektor, reprezentující faktor nebo interakci je kolmý ke všem ostatním. V jednotlivých řadách jsou kombinace hladin faktorů pro každý experiment a počet řad (experimentů) je jen o jednu vyšší než počet použitelných proměnných, takže systém lineárních rovnic obsáhne maximální parametrický prostor při minimálním přeurení, což je hlavní nespornou výhodou této metody. Její vypovídací schopnost je vymezena tím, že se jedná o lineární metodu **prvního řádu** a omezeným výběrem **tabelovaných ortogonálních polí**, z nichž většina počítá s mnoha parametry **ve dvou hladinách**, dále uvádí pouze 3 pole se **třemi hladinami**, 2 s čtyřmi a jen jedno s pěti hladinami, kromě několika smíšených polí. Z toho vyplývá, že tato metoda se výborně hodí pro základní orientaci v nepřehledném parametrickém prostoru, kde spolupůsobí pokud možno lineárně velké množství faktorů a dokáže vybrat kombinaci hladin těch nejdůležitějších. Při aplikaci na svařování MAG může sloužit pro hrubý výběr rámcových vstupních podmínek svařování a ostatních vstupních parametrů – např. výběr, zahrnující 2 až 3 druhy plynů, typů a průměrů drátů, tloušťek materiálu, mezery v kořeni, sklony charakteristiky, průtočné množství plynu atd. Snadno se může stát, že znehodnotíme soubor naprosto nevhodnými kombinacemi pro reálnou existenci procesu, což je jednou z hlavních nevýhod ortogonálního pole. Další je skutečnost, že regresní model 1. řádu se dvěma nebo třemi hladinami parametrů není dostačující k vyladění optimální kombinace parametrů.

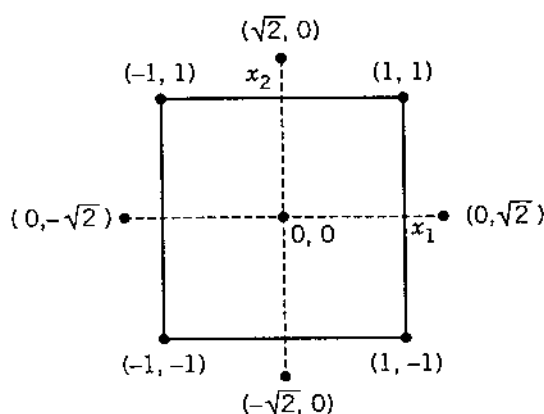
10.2 Metoda středové kompozice

Tato metoda nabízí proti uvedenému ortogonálnímu uspořádání, vhodnější **sférické uspořádání** parametrického prostoru.

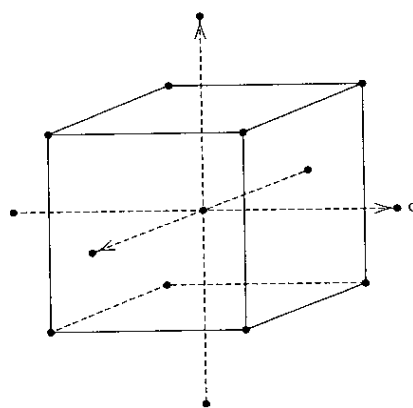
Návrhová matice experimentů podle středové kompozice sestává z:

1. Úplného 2^k faktoriálu na úrovni $-1, 1$ (k = počet řídicích proměnných)
2. Osových bodů (mezní, 0) – celkem $2 \cdot k$ rovnic
3. Středových bodů (0,0) – doporučeno 3 až 7 rovnic

Body návrhu tak vymezí v parametrickém prostoru vícerozměrný sférický tvar (kruh pro 2 parametry, koule pro 3 parametry, atd. viz obr. 10.1 a 10.2), doplněné o několik středových bodů, poskytujících odhad rozptylu.



Obr. 10.1: Uspořádání hodnot parametrů pro 2 proměnné



Obr. 10.2: Uspořádání hodnot parametrů pro 3 proměnné

Používá regresní **rovnici druhého řádu**, jejíž obecný tvar je:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Regresní rovnice druhého řádu umožňuje modelovat zakřivení funkce, proto musí být řídicí proměnné sledovány nejméně ve třech, ale nejlépe na pěti úrovních a tak z hlediska přiměřeného počtu potřebných experimentů by měl být počet řídicích parametrů co nejnižší. Statistickým vyhodnocením záznamu odezvového pole se provede výpočet regresních koeficientů metodou nejmenších čtverců, úprava matematických modelů a jejich parciální

derivace pro určení optima. Grafický výstup kontur odezvového pole v závislosti na hlavních proměnných v původních jednotkách může sloužit jako operační okno pro nastavení procesu. Předpokladem jejího použití je určitá znalost daného procesu, kdy dovedeme přibližně odhadnout působení jednotlivých faktorů na výstupní veličiny. Za tímto účelem nejprve provedeme tzv. screening, jehož výsledkem je vytipování **oblasti blízko-optimálních podmínek**, pro kterou pak s vymezeným souborem řídicích parametrů a jejich vymezeným rozsahem navrhne soubor experimentů podle středové kompozice [40].

10.3 Heuristické metody

Byly vytvořeny pro řešení kombinačních optimalizačních problémů, příliš složitých pro řešení stávajícími statistickými metodami. Spočívají v navržení, testování a implementaci algoritmů. Některé jsou založeny na skutečných aplikacích, jiné jsou umělé, generované. Vhodně zvolený algoritmus umožňuje výzkumníkovi lépe porozumět zdrojům rozptýlů a vlivu korelační struktury problému na průběh algoritmu.

11. Shrnutí teoretické části

Na katedře strojírenské technologie TUL probíhá řadu let výzkum zaměřený na stabilitu procesu svařování metodou 135. V kapitole 2 je detailně popsána metoda svařování 135. Kapitola 2.2 se zabývá přenosem tekutého kovu při svařování v ochranných atmosférách a kapitola 2.3 vlivem parametrů na geometrii svarové lázně, tyto vlivy patří k důležitým technologickým faktorům ovlivňující jakost svarových spojů. Moderní trendy v oblasti obloukových metod svařování popsaných v kapitole 4 vyžadují v závislosti na účinnosti evropských norem, dodržení jakosti svařovaných spojů a ocelových svařovaných konstrukcí především podle normy EN 1090-2. Tyto metody byly zavedeny do strojírenské výroby ve snaze dosáhnout maximální efektivity a produktivity procesu svařování. Ovšem tato snaha může vést k různým vadám svarových spojů. Jedním z parametrů, který může být iniciátorem vad ve svarových spojkách, je svařovací rychlost. Tento problém je popsán v kapitole 5, kdy kritická svařovací rychlost vede k vadám ve spojení s nežádoucím tzv. humping efektem. K zajištění kvality a jakosti svarových spojů lze využít velmi účinný nástroj: monitorování svařovacích parametrů v závislosti na stabilitě svařovacího procesu a vadách svarových spojů. Pro monitorování svařovacích procesů v této práci, byl využit monitorovací systém WeldMonitor popsaný v kapitole 8.1, který disponuje vzorkovací frekvencí 25000Hz. Tato vzorkovací frekvence nám nabízí velmi podrobnou analýzu

svařovacích parametrů a lze takový záznam svařovacích parametrů může zajistit kontrolu jakosti svarových spojů. Snahou moderního svařování je vyžadovat vysokou produktivitu na hranici možností svařovacích zdrojů a dané technologie. Proto je nutné systematické monitorování procesu a aplikovat detekční systém, který včas určí sebemenší náběh na nestabilitu přenosu kovu a pravidelnost při vytváření tavné lázně. Nestabilita procesu je hlavním zdrojem vad svarů. Shrnutím poznatků z dílčích prací a experimentů uvedených v kapitole 9, byly navrženy cíle disertační práce. Plánování experimentu je provedeno pomocí metody DOE: centrální kompozice, která je popsána v kapitole 10.2.

11. Cíle disertační práce

Při stanovení cílů dizertační práce bylo zvážení využití pro strojírenský průmysl. Při ručním svařování jsou nejvýznamnější faktory výletu drátu, respektive délka oblouku a svařovací rychlost. Tyto faktory jsou významné i pro automatické a robotické svařování, proto tato práce je soustředěna na uvedené faktory při aplikaci automatického svařování.

Na základě shrnutí teoretické části a na základě problémů vzniklých při realizaci dílčích experimentů byla zvolena predikce oblasti dizertační práce a byly stanoveny následující cíle disertační práce.

- 1) Aplikace monitorovacího systému WeldMonitor pro záznam svařovacích parametrů a následné určení stability svařovacího procesu s využitím Shewhartových regulačních diagramů. Zvláště pak studium vlivu výletu drátu na stabilitu procesu svařování při metodě svařování 135 v souladu s normou o určování stupňů kvality svarových spojů ČSN EN ISO 5718 a záznamem monitorovacího systému WeldMonitor.
- 2) Stanovení kritické rychlosti svařování pro danou kombinaci parametrů svařování metody 135. Vyhodnocení záznamů svařovacích parametrů v souladu s normou o určování stupňů kvality svarových spojů ČSN EN ISO 5718.
- 3) Poskytnout podklady pro možnou implementaci další funkce monitorovacího systému WeldMonitor v závislosti na kvalitě svarových spojů, pomocí Shewhartových regulačních diagramů.

12. Realizace cílů disertační práce

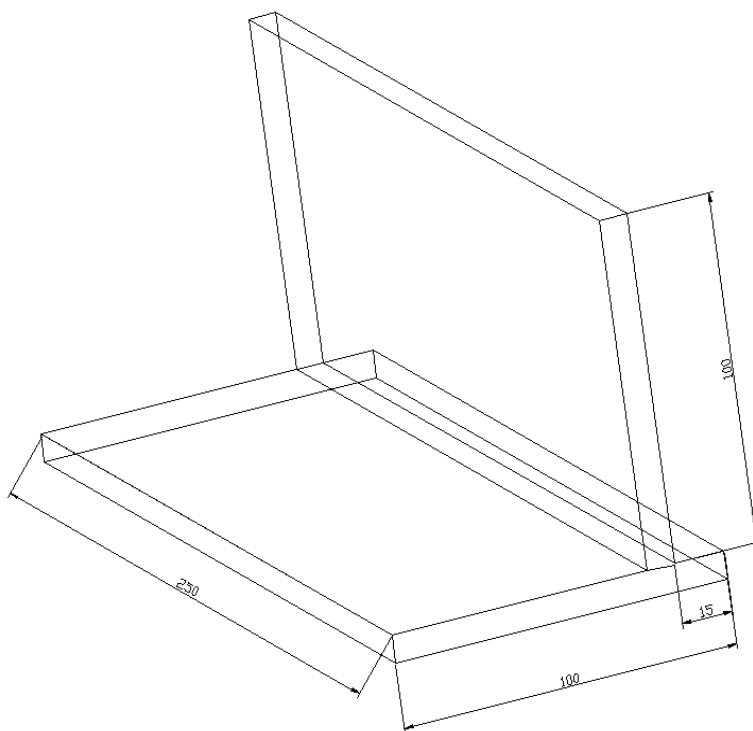
K realizaci cílů disertační práce byl využíván monitorovací systém WeldMonitor popsáný v kap. 8.1. Pro vyhodnocování naměřených záznamu svařovacích parametrů byly aplikovány regulační diagramy pro statistické zvládnutí technologických procesů.

Experimenty byly realizovány ve svařovací laboratoři katedry strojírenské technologie, která je vybavena svařovacím zdrojem BDH 550 PulsSyn. Automatické svařování je zajištěno lineární pojezdovou dráhou, kde se může nastavit svařovací rychlost v rozsahu od 0,2 do 2 m.min⁻¹. Svařovací parametry se zaznamenávají pomocí monitorovacího zařízení WeldMonitor. Vzorky se svařují ve svařovacím přípravku, kde lze přesně nastavit polohu svařovaného vzorku. Uspořádání svařovací laboratoře je zobrazeno na obr. 12.1.



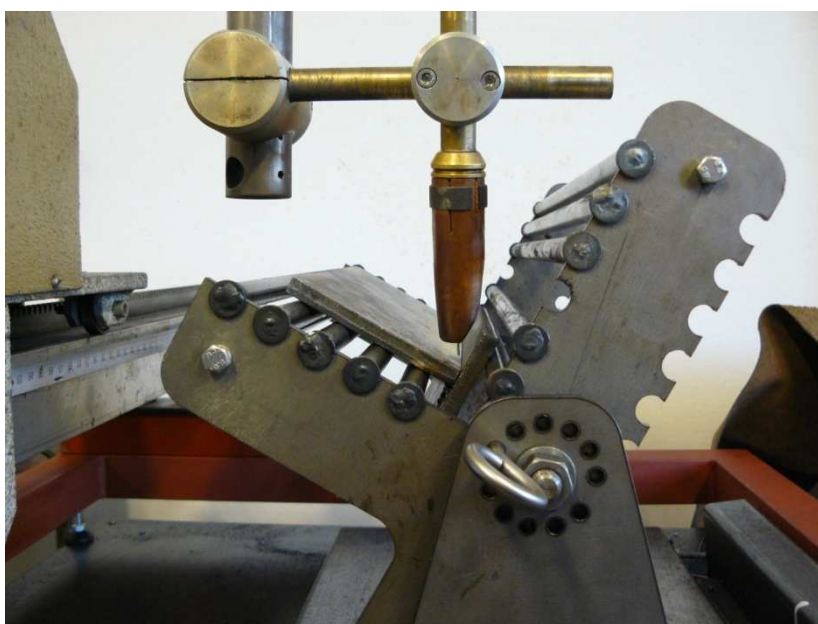
Obr. 12.1: Svařovací laboratoř

Na realizaci všech experimentů byl použit drát hlazený plný nepoměděný ESAB OK Aristorod 12.50, Ø 1,2 mm. Ochrannou atmosférou byla třísložková směs ochranného plynu FERROMAXX PLUS 68% Ar, 12% CO₂, 20% He a dvousložková směs ochranného plynu EUROMIX M21 82% Ar, 18% CO₂. Použitý ochranný plyn je vždy u experimentů uveden. Vzorky pro experimenty byly zhotoveny ze základního materiálu ocel S235 JR tloušťky 8mm. Připravený vzorek byl nastehován podle obr. 12.2. Na obrázku je vyznačena poloha stojiny a pásnice s okótovanými rozměry vzorku.



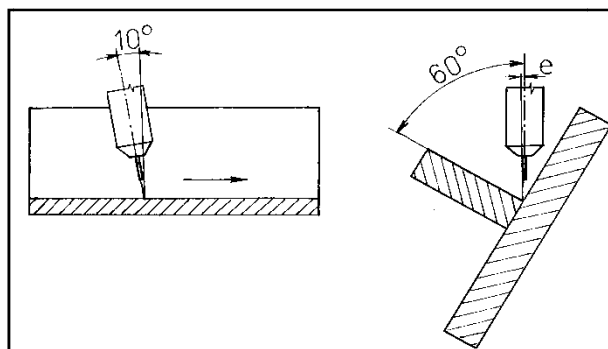
Obr. 12.2: Koutový spoj s vyznačenými rozměry použitých plechů

Způsob svařování vzorků byl volen jako jednovrstevné automatické svařování MAG koutových svarů ocelových plechů v poloze PA (do úžlabí) tahem (bez rozkyvu).



Obr. 12.3: Vzorek připravený ke svařování ve svařovacím přípravku

Svařování vzorků probíhalo ve svařovacím přípravku v poloze PA (vodorovná shora podle ISO 6947), s úhlem nastavení svarku na 60° a s úhlem nastavení hořáku 90° v rovině kolmé na směr svařování obr. 12.4. Osa hořáku byla nastavena do osy kořene svarku. Polohování svarku a hořáku umožňuje získat co největší závar ve stykové ploše stojiny a pásnice. Úhel náklonu hořáku v rovině rovnoběžné se směrem svařování je 10° . Jedná se o svařování dopředu.



Obr. 12.4: Geometrie nastavení hořáku (šipkou označen směr svařování)

Délka zkušebního svaru je 250 mm, průtok ochranného plynu byl nastaven a udržován v hodnotě 18 l.min^{-1} . Metalografické výbrusy a snímky byly pořízeny v metalografické laboratoři která je vybavena mikroskopem NEOPHOT 21, počítačovým vybavením pro digitální zpracování obrazu a softwarem pro analýzu metalografických výbrusů NIS Elements 4.12. Všechny metalografické výbrusy uvedené v této práci byly naleptány 2% Nitemem.

13. Studium vlivu výletu drátu na stabilitu procesu svařování

Návrh experimentů pro studii vlivu výletu drátu byl navržen podle metodiky uvedené v kapitole 10.2. Metoda centrální kompozice je pro tyto experimenty vhodná z důvodu již známé parametrické oblasti z předchozích studií uvedených v rešeršní části práce.

13.1 Proměnné svařovací parametry

Při statistickém plánování experimentů je rozhodující počet sledovaných proměnných. Byla vymezena oblast pouze na 2 parametry – svařovací napětí U a výlet drátu CTWD. Zkoumané parametry svařování jsou uvedeny v tab. 13.1.

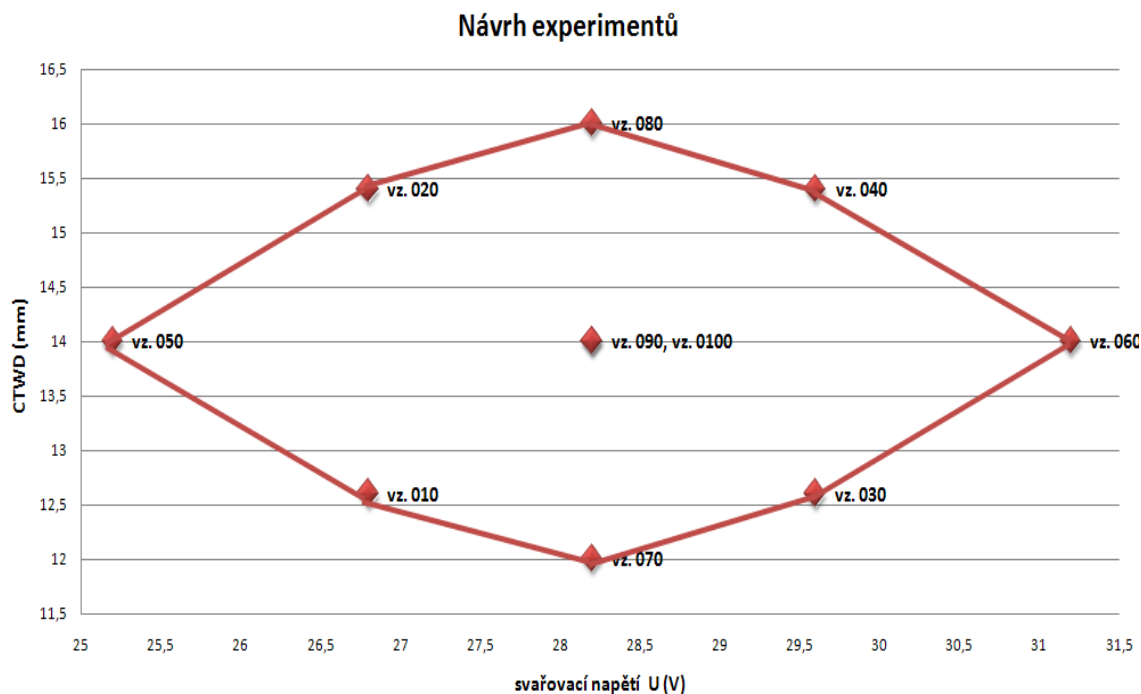
Tab. 13.1. Zvolené parametry pro tvorbu matice experimentů

	$(-)\sqrt{2}$	-1	0	1	$\sqrt{2}$
U (V)	25,2	26,8	28,2	29,6	31,2
CTWD(mm)	12	12,6	14	15,4	16

Navržená matice experimentů je uvedena v tab. 13.2.

Tab. 13.2. Matice experimentů

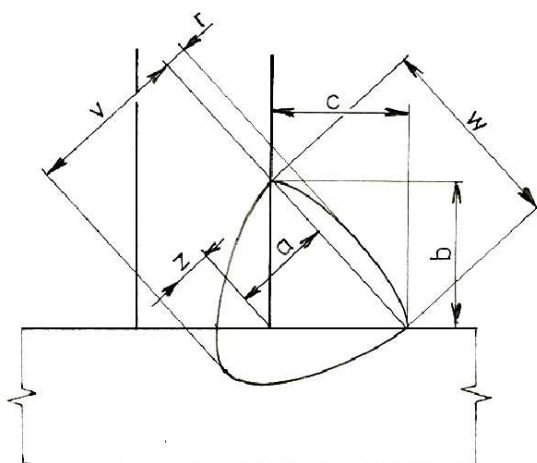
	U	CTWD	U (V)	CTWD(mm)
1	-1	-1	26,8	12,6
2	-1	1	26,8	15,4
3	1	-1	29,6	12,6
4	1	1	29,6	15,4
5	$(-)\sqrt{2}$	0	25,2	14
6	$\sqrt{2}$	0	31,2	14
7	0	$(-)\sqrt{2}$	28,2	12
8	0	$\sqrt{2}$	28,2	16
9	0	0	28,2	14
10	0	0	28,2	14



Obr. 13.1: Graficky zobrazený návrh experimentů

13.2 Vyhodnocení metalografických výbrusů

Experimentální vzorky byly v polovině své délky mechanicky rozřezány a zality do dentakrylu. Běžným metalografickým postupem jsme získali metalografické výbrusy. Metalografické výbrusy nám poskytly údaje o tvaru a velikosti svaru v příčném řezu. Analýza těchto rozměrů byla provedena za pomoci vyhodnocovacího softwaru NIS Elements 4.12. Grafické zobrazení měřených hodnot metalografického výbrusu je znázorněno na obr. 13.2.



Obr. 13.2: Měřené hodnoty koutového svaru

Naměřené hodnoty koutového svaru jsou uvedeny v tab. 13.3. U vzorku 030-1 se vyskytuje vada- zápal, jeho hodnota je uvedena v tabulce. U vzorku 090 se vyskytuje vada – pór, jeho hodnota je taktéž uvedena v tabulce.

Tab. 13.3. Naměřené hodnoty koutového svaru

č.vzorku	r (mm)	a (mm)	z (mm)	v (mm)	w (mm)	b (mm)	c (mm)	PP (mm ²)	PN (mm ²)	PC (mm ²)	zápal (mm)	pór (mm)
010	0,8	3,7	3,9	7,9	7,7	6	4,7	4,5	13,8	37,2	—	—
020	0,8	3,6	3,3	7,7	7,4	6	4,6	4	13,8	36,2	—	—
030	0,3	3,9	3,8	8,3	8,5	6,7	5	1,6	17,1	42,1	—	—
030-1	1,3	2,9	4	7,3	7	5,8	3,6	6	9,8	38,4	0,6	—
040	0,3	4,3	2,9	7,8	9,2	6,9	5,7	1,5	19,5	40,1	—	—
050	1,4	3,3	4,2	7,6	7,2	6,1	4,1	6	12	36,8	—	—
060	0,8	3,9	2,9	7,5	8,8	6,4	5,6	3,2	16,3	44,1	—	—
070	0,4	3,9	3,6	8,4	8,5	6,5	5,1	1,9	16,8	40,1	—	—
080	0,4	4,3	2,6	7,7	9,1	7,2	5,6	2,7	19,8	37,8	—	—
090	0,2	4	3,5	8,1	8,9	6,9	5,6	1,5	16,5	39,1	—	0,2
0100	0,2	4	3,5	8,1	8,8	6,8	5,6	1,5	16,4	38,8	—	—

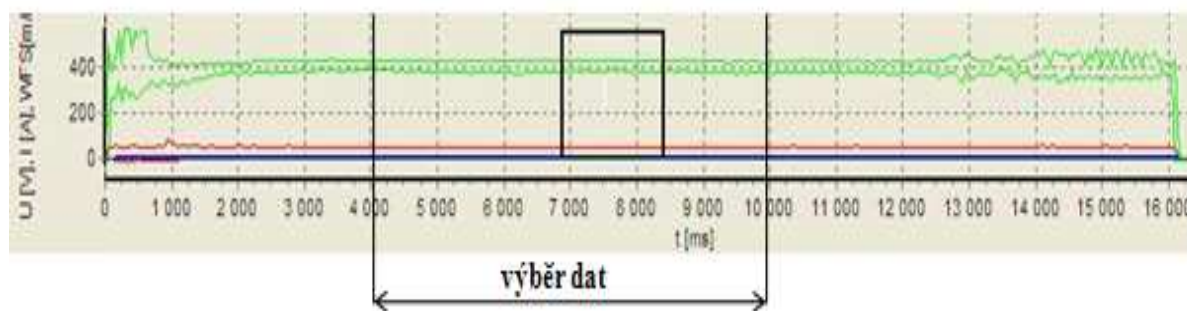
Svařovací parametry byly zaznamenány systémem WeldMonitor. Naměřené hodnoty svařovacích parametrů jsou uvedeny v tab. 13.4.

Tab. 13.4. Naměřené hodnoty svařovacích parametrů

č.vzorku	I (A)	U (V)	v_d (mm)	v_s (mm)
010	372,7	26,7	12	0,76
020	347,3	26,9	12	0,76
030	403,2	29,3	12	0,75
030-1	402,9	29,2	12	0,75
040	373,9	29,6	12	0,76
050	358,1	25,3	12	0,76
060	400,4	31	12	0,76
070	394,6	28,1	12	0,76
080	357,8	28,2	12	0,76
090	378,1	28,1	12	0,76
0100	377,2	28,1	12	0,76

13.3 Aplikace regulačních diagramů

Výběr dat pro určení centrální přímky (CL), horní regulační mez (UCL) a dolní regulační mez (LCL) při aplikaci na svařovací proces je patrný z obr. 13.3.



Obr. 13.3: Výběr dat při aplikaci na svařovací proces

Při výběru dat pro aplikaci na svařovací proces musíme brát v úvahu náběh svařovacího procesu v rozmezí od 0 do 4s po zapálení oblouku. Totéž musí uvažovat i konec svařovaného konce vzorku do zhasnutí oblouku. Výběr dat je tedy uvažován v této oblasti, kdy svařovací proces je z technologického hlediska stabilní. Vzorky 090 a 0100 byly zvoleny podle metodiky návrhu experimentů centrální kompozice, jako středové body. Pro aplikaci regulačního diagramu měřením, byly tyto vzorky použity pro získání základních hodnot tj.

střední hodnotu svařovacího proudu a směrodatnou odchylku. Stanovení střední hodnoty svařovacího proudu a hodnoty směrodatné odchylky pro vzorky 090 a 0100, bylo provedeno zpracováním datového záznamu ze systému WeldMonitor, softwarem Microsoft Excel.

Protože základní hodnoty jsou dány $X_0 = 374,5$ A, $\sigma_0 = 2,69$ mohou být regulační diagramy pro průměr a rozpětí sestrojeny pomocí vzorců uvedených v tab. 7.1 a součinitelů A , d_2 , D_2 , a D_1 uvedených v tab. 3 přílohy č.3 pro rozsah podskupiny $n=3$.

X diagram:

Centrální příčka **CL** = $X_0 = 374,5$ A

Horní mez **UCL** = $X_0 + (A \cdot \sigma_0) = 374,5 + (1,732 \cdot 2,69) = 379,2$ A

Dolní mez **LCL** = $X_0 - (A \cdot \sigma_0) = 374,5 - (1,732 \cdot 2,69) = 369,8$ A

R diagram:

Centrální příčka **CL** = $d_2 \cdot \sigma_0 = 1,693 \cdot 2,69 = 4,55$ A

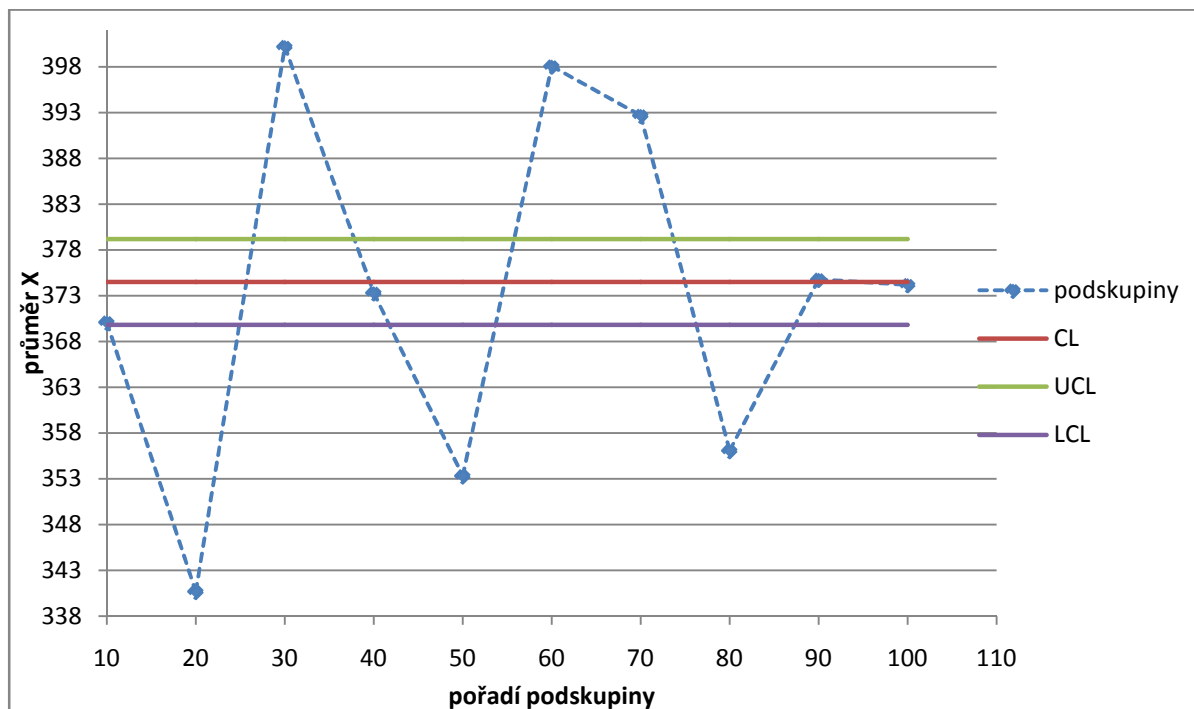
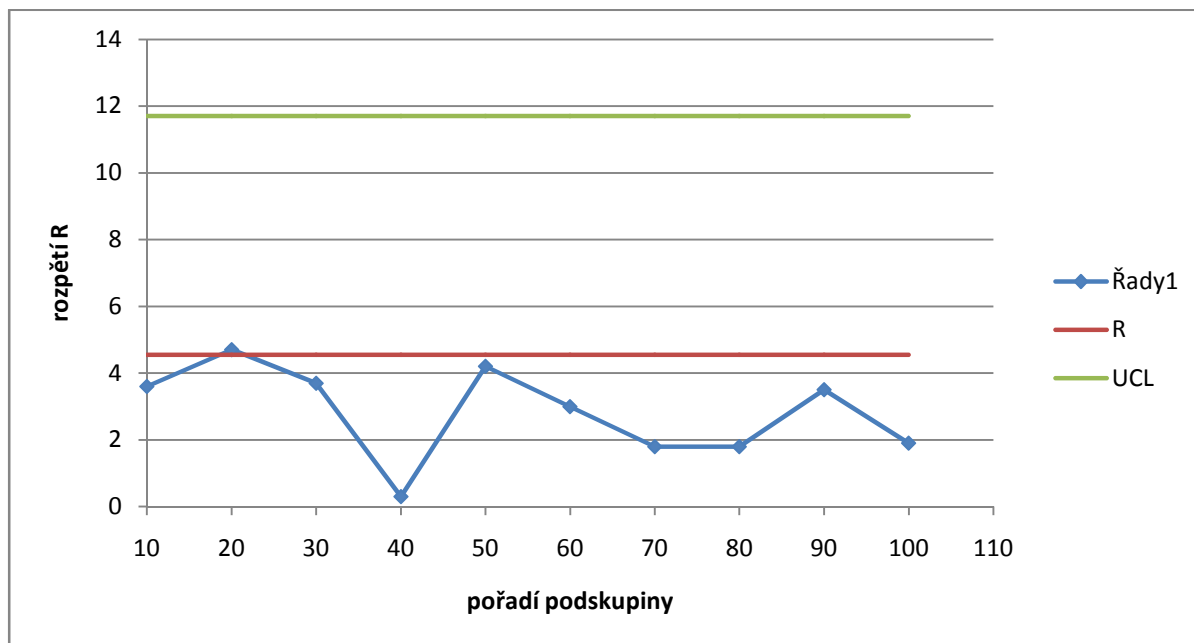
Horní mez **UCL** = $D_2 \cdot \sigma_0 = 4,358 \cdot 2,69 = 11,7$ A

Dolní mez **LCL** = $D_1 \cdot \sigma_0 = 0,2 \cdot 2,69 = 0$ (protože n je menší než 7, LCL se nezakresluje)

Nyní se odebere 8 výběrů, které odpovídají vzorkům experimentů 040 až 080. Pro rozsahy X_1 , X_2 , X_3 byly vybrány časové úseky ze záznamu svařovacího proudu odpovídající pro každou skupinu 3s. Vypočtou se hodnoty jejich průměrů a rozpětí v podskupině tab. 13.5 a zakreslí se výše vypočtené meze obr. 13.4 a obr. 13.5.

Tab. 13.5 Hodnoty průměrů a rozpětí podskupin

	svařovací proud (A)	svařovací proud (A)	svařovací proud (A)	průměr X	rozpětí R
číslo podskupiny	X1	X2	X3		
10	368,9	368,9	372,5	370,1	3,6
20	338,8	339,9	343,5	340,7	4,7
30	398,3	400,4	402	400,2	3,7
40	373,1	373,4	373,3	373,3	0,3
50	351,4	352,9	355,6	353,3	4,2
60	396,4	398,4	399,4	398,07	3
70	391,7	392,8	393,5	392,67	1,8
80	356,4	355	356,8	356,07	1,8


Obr. 13.4: Regulační diagram $\bar{X}$

Obr. 13.5: Regulační diagram R

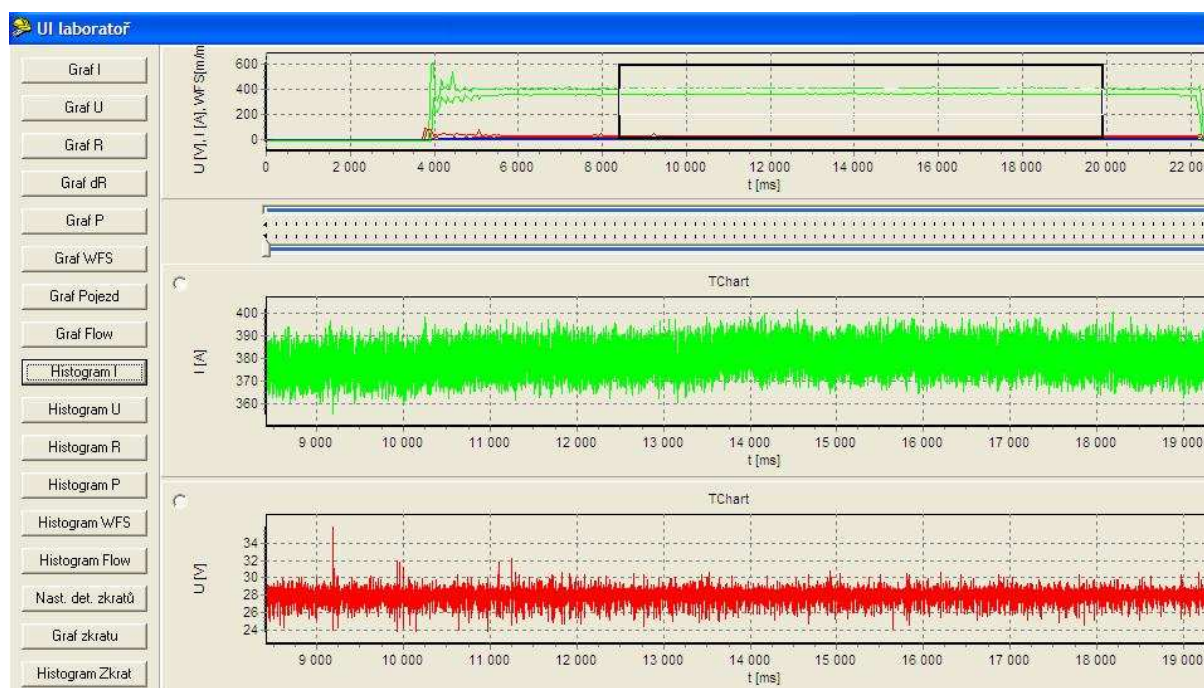
Diagramy znázorněné na obr. 13.4 a obr. 13.5 ukazují, že svařovací proces není statisticky zvládnutý na požadované úrovni, protože se objevuje posloupnost 8 bodů pod centrální

přímkou v diagramu R a 6 bodů leží mimo vymezené meze regulačního diagramu X. Z obrázků je zřejmé, že stabilní procesy svařování jsou pouze u vzorků č. 010 a č. 040. Svařený vzorek č. 0100 je znázorněn na obr. 13.6. Vizuální kontrolou byl vzorek vyhodnocen jako vzorek bez vad s hladkou svarovou housenkou. Výška hořáku CTWD, byla nastavena na 14 mm.



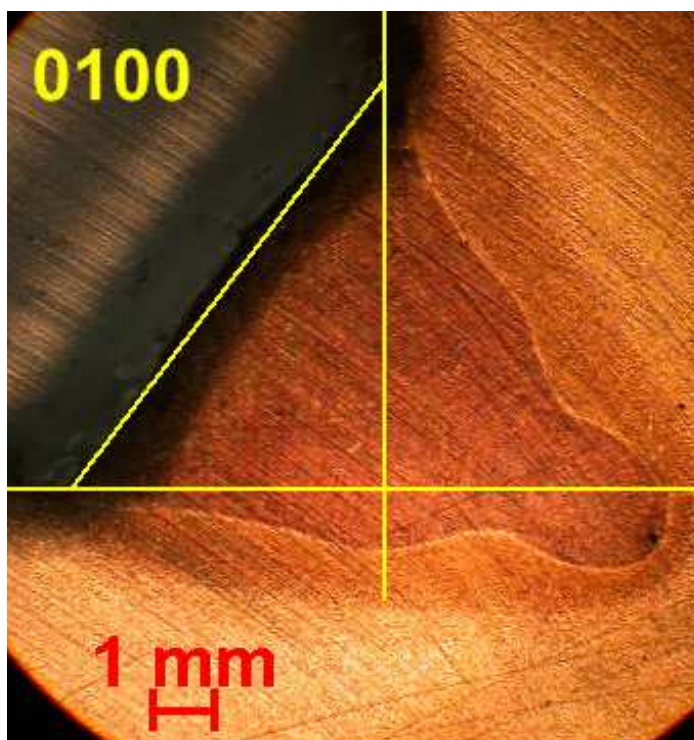
Obr. 13.6: Svařený vzorek 0100

Záznam svařovacího proudu a napětí nevykazuje nestabilitu svařovacího procesu v celé délce záznamu svařovacích parametrů obr. 13. 7.



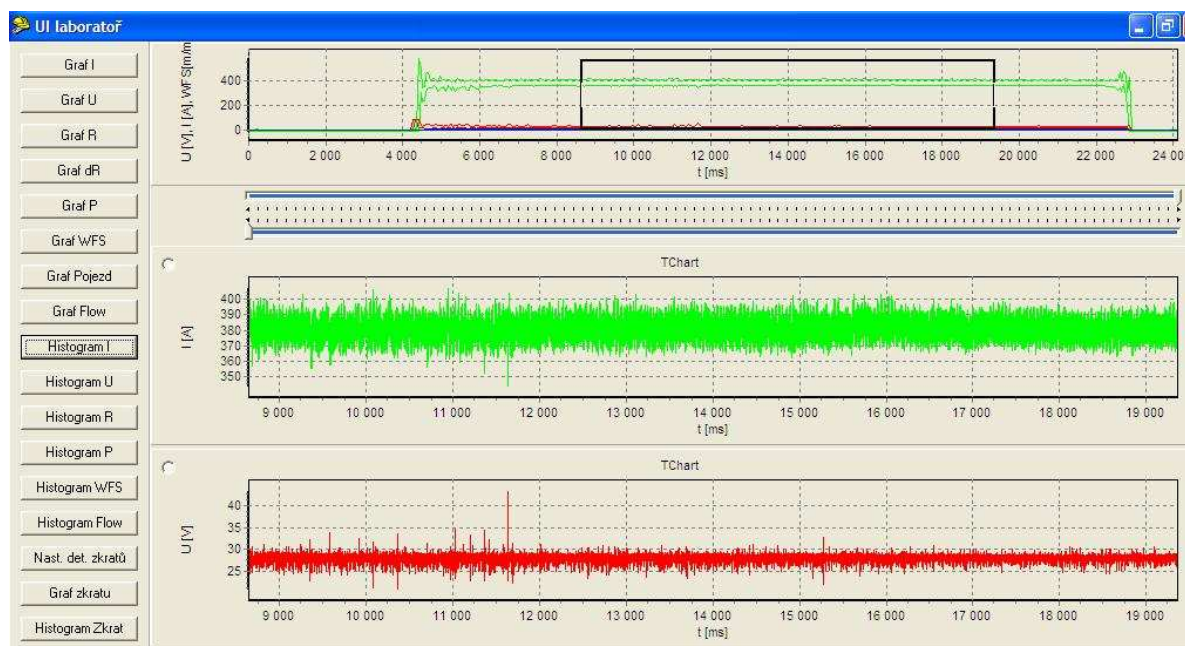
Obr. 13.7: Záznam svařovacích parametrů vzorku 0100

V polovině délky svařovaného vzorku byl mechanicky odebrán vzorek pro metalografický výbrus. V souladu s obr. č. 13.2 byly změřeny hodnoty a byla vyhodnocena geometrie svaru. Z metalografického výbrusu vzorku č. 0100 na obr. 13.8 je patrné, že geometrie svaru je vyhovující a podle normy ČSN EN ISO 6520-1 se nevyskytují ve svarovém spoji žádné vady. Podle normy ČSN EN ISO 5817 odpovídá kvalitě svaru B.

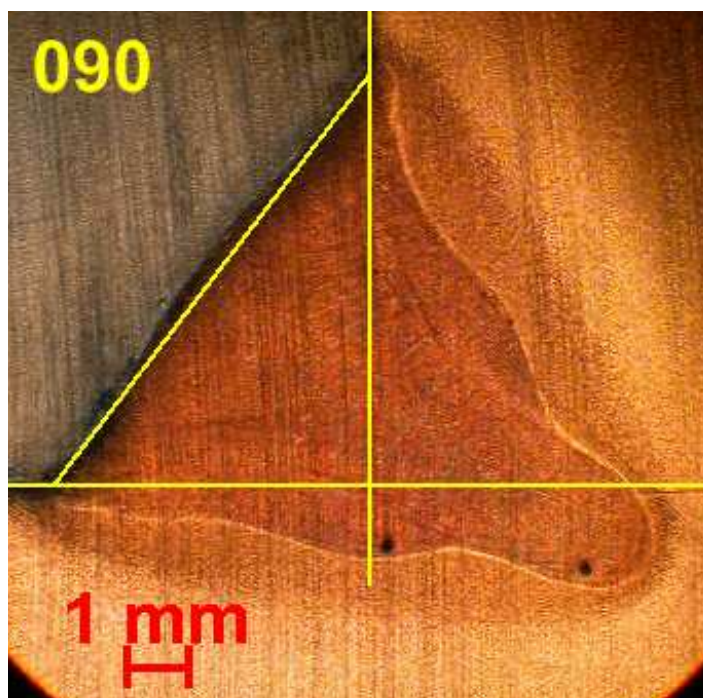


Obr. 13.8: Metalografický výbrus vzorku 0100

Podle metody centrální kompozice pro návrh experimentů (kapitola 10.2), bylo třeba zhotovit ještě svařované vzorky ze středu navrženého pole. Vzorek 090 byl svařen stejnými svařovacími parametry jako vzorek č. 0100 a výškou hořáku CTWD 14 mm. Lze ho tedy považovat jako ověřovací ke vzorku č. 0100. Ze záznamu svařovacího proudu a napětí obr. 13.7 je totožná stabilita svařovacího procesu, jako u vzorku č. 0100. Metalografický výbrus obr. 13.8, má stejné naměřené hodnoty geometrických rozměrů viz tab. 13.3 a je v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-1. Nevyskytují se ve svarovém spoji žádné vady. Podle normy ČSN EN ISO 5817 odpovídá kvalitě svaru B.



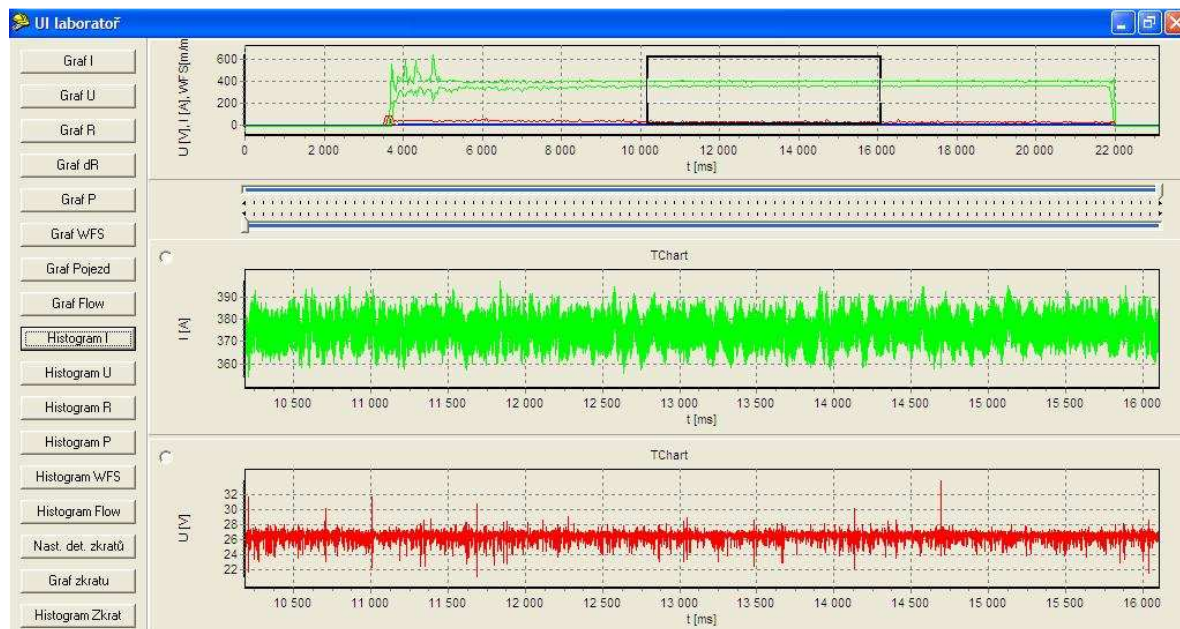
Obr. 13.9: Záznam svařovacích parametrů vzorku 090



Obr. 13.10: Metalografický výbrus vzorku 090

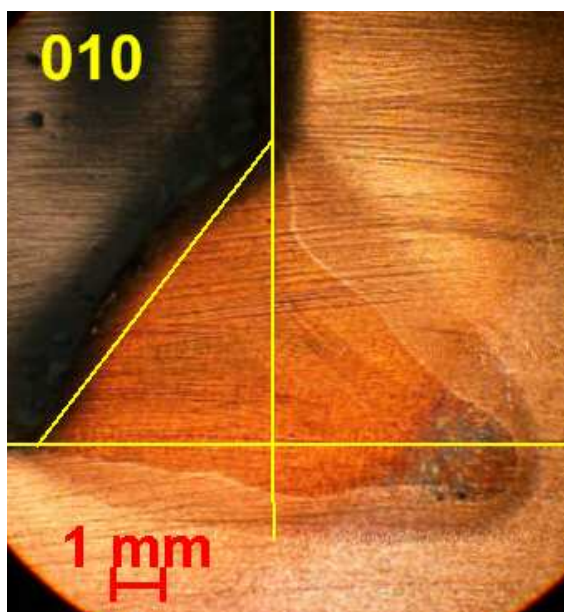
13.4 Výsledky experimentů

Vzorek č. 010 byl vyhodnocen jako vyhovující. Nepřekračuje vymezené regulační meze regulačního diagramu. Ze záznamu svařovacích parametrů obr. 13.11 je zřejmá stabilita svařovacího procesu.



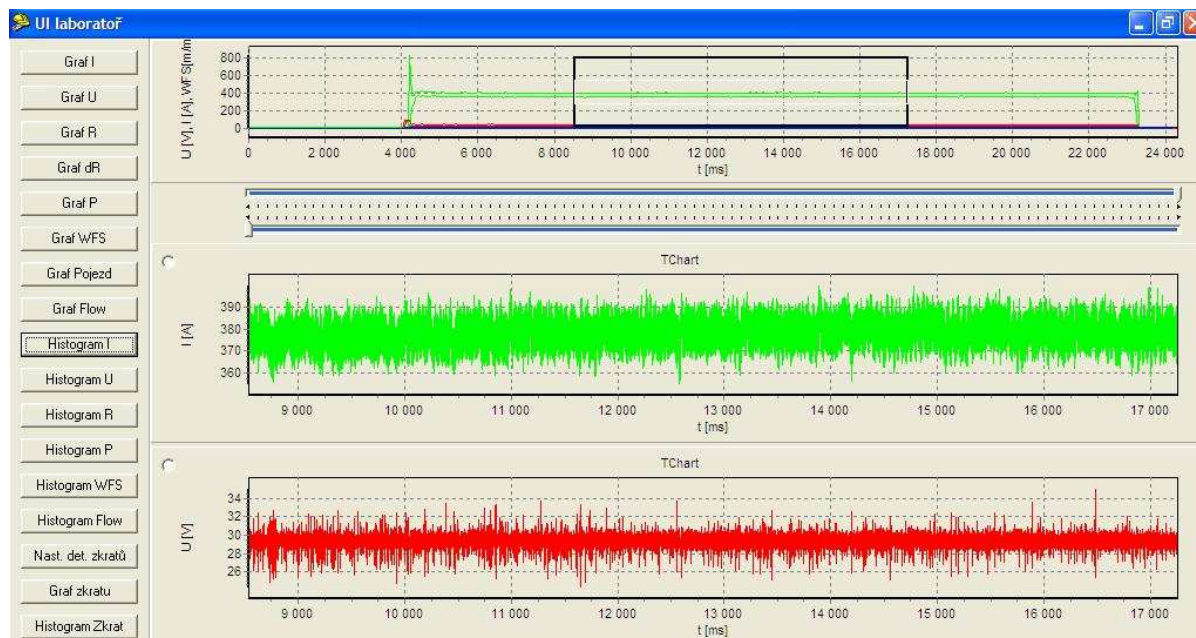
Obr. 13.11: Záznam svařovacích parametrů vzorku 010

Metalografický výbrus obr. 13.12 je v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-1, kde se nevyskytují ve svarovém spoji žádné vady. Podle normy ČSN EN ISO 5817 odpovídá kvalitě svaru B.



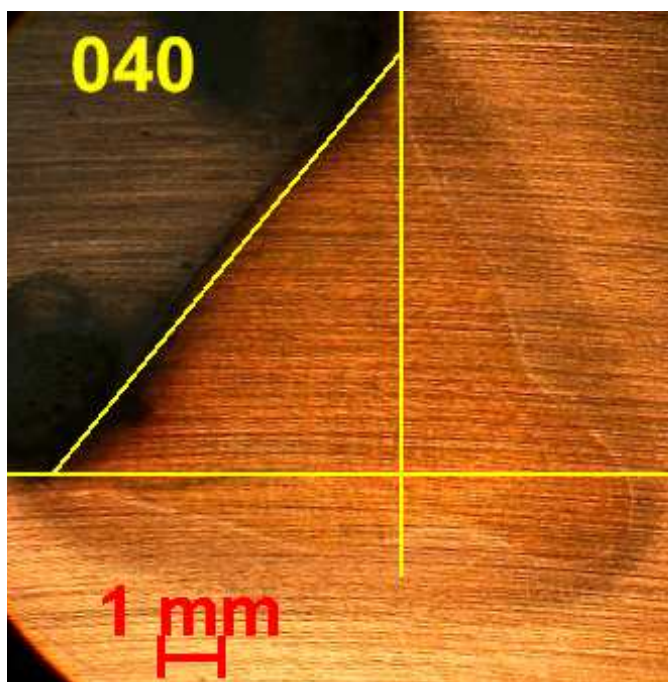
Obr. 13.12: Metalografický výbrus vzorku 010

Vzorek č. 040 byl opět vyhodnocen jako vyhovující. Nepřekračuje vymezené regulační meze regulačního diagramu. Ze záznamu svařovacích parametrů obr. 13.13 je zřejmá stabilita svařovacího procesu.



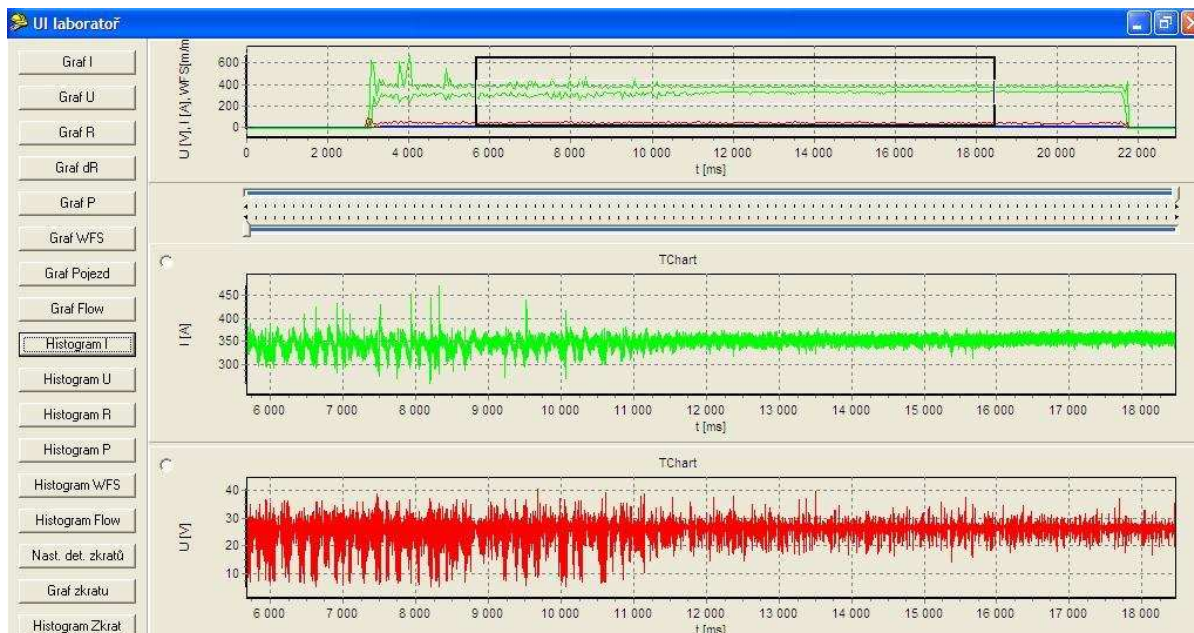
Obr. 13.13: Záznam svařovacích parametrů vzorku 040

Metalografický výbrus obr. 13.14 je v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-1, kde se nevyskytují ve svarovém spoji žádné vady. Podle normy ČSN EN ISO 5817 odpovídá kvalitě svaru B.



Obr. 13.14: Metalografický výbrus vzorku 040

Vzorek č. 020 byl vyhodnocen jako nevyhovující. Překračuje vymezené regulační meze regulačního diagramu. Ze záznamu svařovacích parametrů obr. 13.15 je zřejmá nestabilita svařovacího procesu, zvláště pak v detailní oblasti v rozmezí od 4 do 10 s záznamu obr. 13.16.

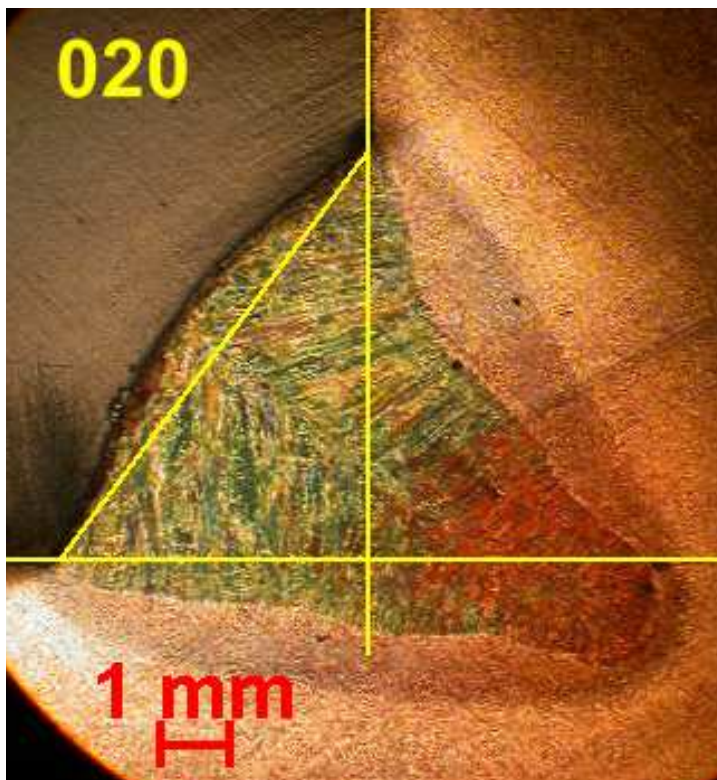


Obr. 13.15: Záznam svařovacích parametrů vzorku 020



Obr. 13.16: Detail záznamu svařovacích parametrů vzorku 020 v oblasti nestability

Metalografický výbrus obr. 13.17 je v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-1, kde se nevyskytují ve svarovém spoji žádné vady. Podle normy ČSN EN ISO 5817 odpovídá kvalitě svaru B.



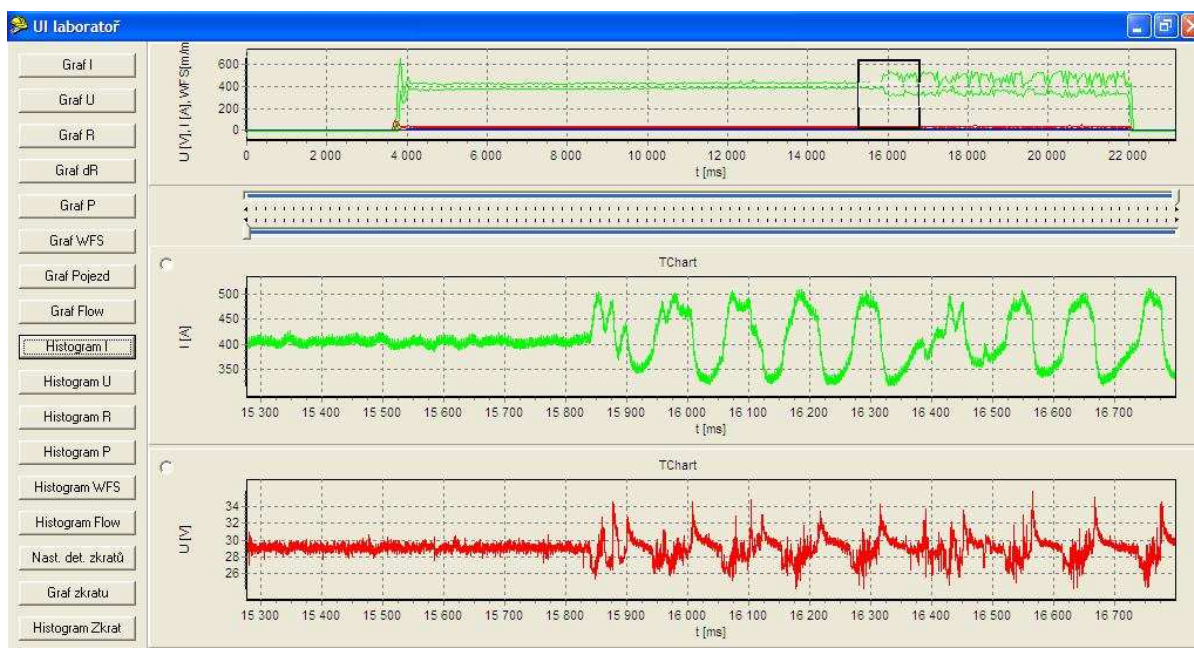
Obr. 13.17: Metalografický výbrus vzorku 020

Diskuze: Svařovací parametry vzorku 020, byly zvoleny podle metody centrální kompozice. Kombinace těchto parametrů byla nejnižší hodnota svařovacího napětí $U=26,8$ V a hodnota vzdálenosti kontaktní špičky $CTWD=15,4$ mm. Ze záznamu svařovacích parametrů je zřejmá nestabilita svařovacího procesu, zvláště pak v detailní oblasti v rozmezí od 4 do 10 s. Při detailním zkoumání záznamu v oblasti nestability obr. 13.16 je patrná detekce zkratu, což dokazuje vysoký nárůst svařovacího proudu a poklesu svařovacího napětí. Tato nestabilita je způsobena následkem nízkého svařovacího napětí při vysoké hodnotě vzdálenosti kontaktní špičky. Přestože oblouk hoří nestabilně, metalografický výbrus nevykazuje žádné vady svaru a je v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-1 a ČSN EN ISO 5817.

Vzorek č. 030 byl vyhodnocen jako nevyhovující. Překračuje vymezené regulační meze regulačního diagramu. Z celkového záznamu svařovacích parametrů obr. 13.18 je zřejmá nestabilita svařovacího procesu, zvláště pak v oblasti od 16s do konce záznamu.

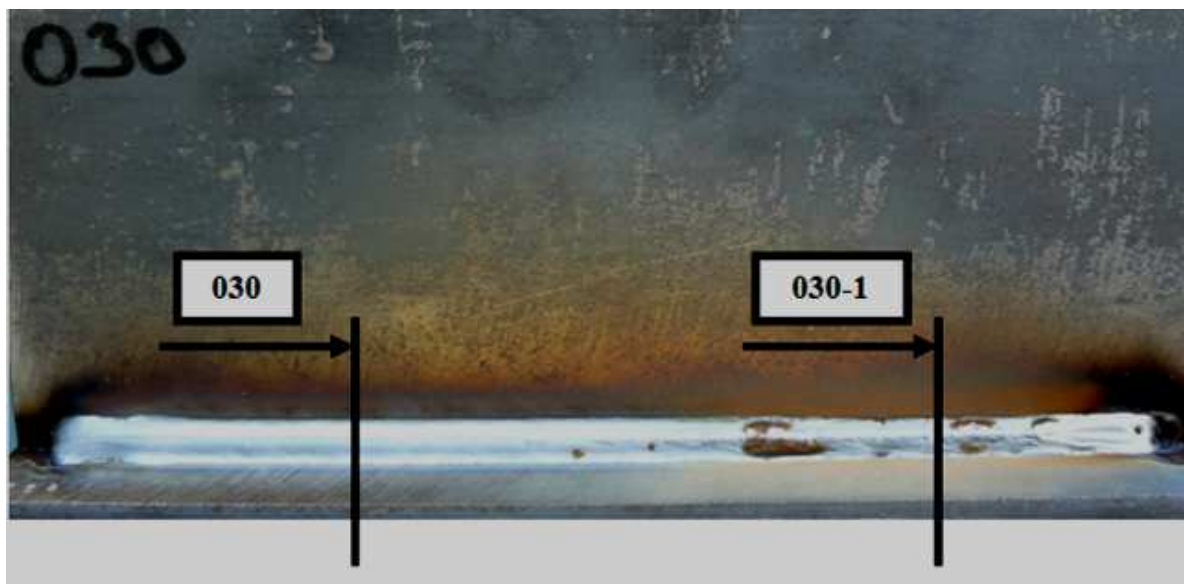


Obr. 13.18: Celkový záznam svařovacích parametrů vzorku 030

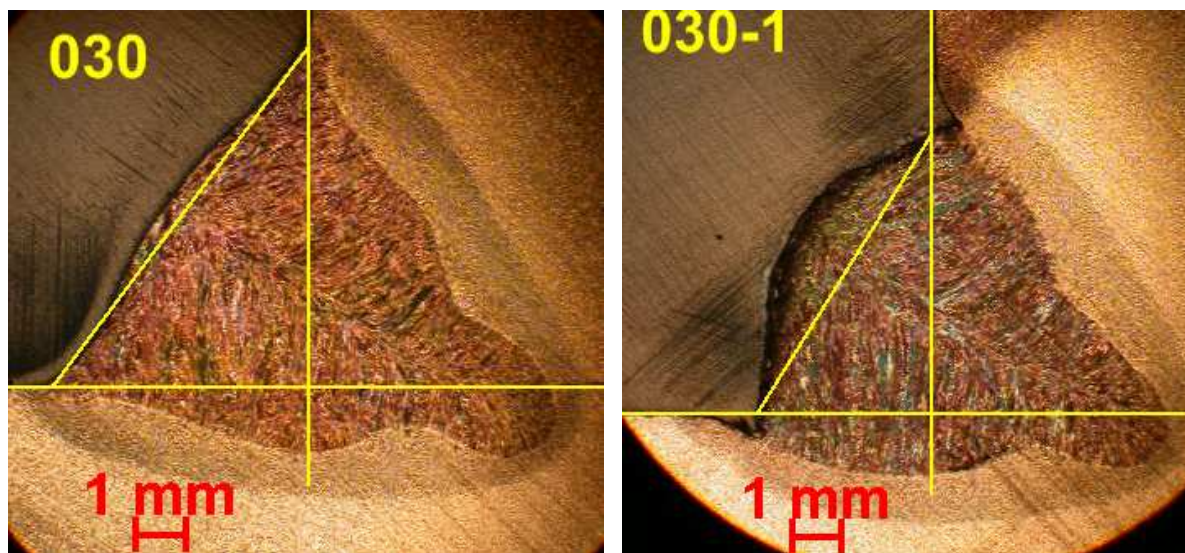


Obr. 13.19: Detail záznamu svařovacích parametrů vzorku 030 v oblasti náběhu nestability svařovacího procesu

Z důvodu nestability svařovacího procesu v oblasti 16 s po začátku svařování, byl proveden odběr vzorku pro metalografické výbrusy ve dvou řezech podle obr. 13.20. Vzorek č. 030 byl v oblasti stabilního hoření oblouku, vzorek č. 030-1 je z oblasti nestabilního hoření elektrického oblouku.



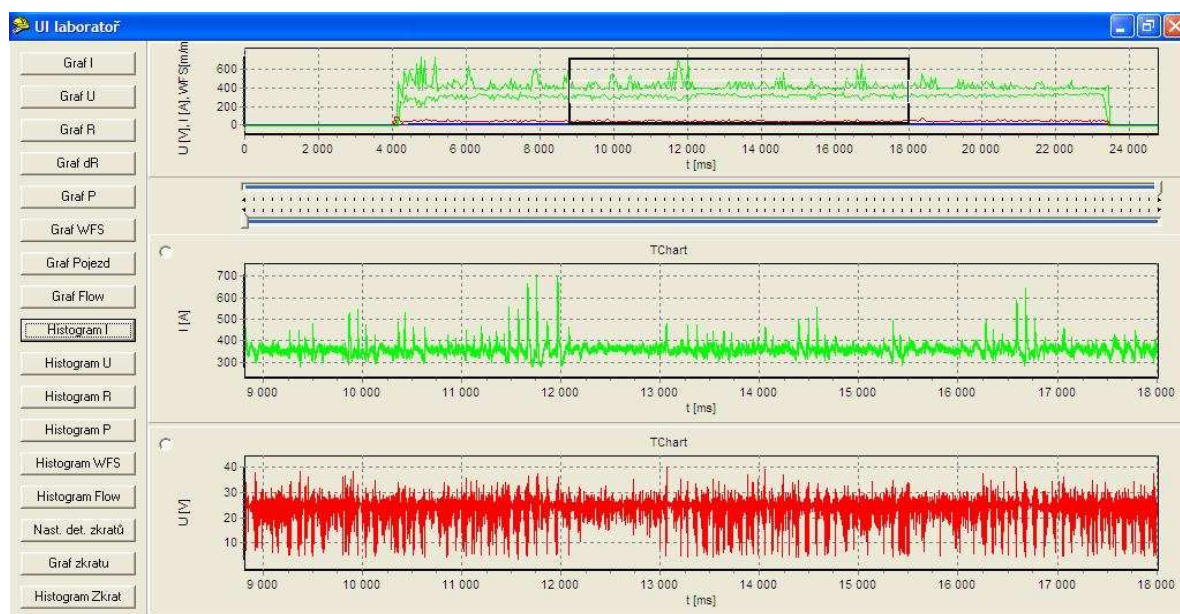
Obr. 13.20: Vyznačení místa odběru výbrusu u svařovaného vzorku 030



Obr. 13.21: Metalografické výbrusy vzorku 030 a 030-1

Diskuze: Svařovací parametry vzorku 030, byly zvoleny podle metody centrální kompozice. Kombinace těchto parametrů byla hodnota svařovacího napětí $U=29,6$ V a hodnota vzdálenosti kontaktní špičky $CTWD=12,6$ mm. Ze záznamu svařovacích parametrů je zřejmá stabilita svařovacího procesu do doby 15,8 s od počátku svařování. Od doby 15,8 s je hoření oblouku nestabilní, špičky svařovacího proudu jsou v diferenci 200 A. Tato nestabilita je následkem velmi malé vzdálenosti kontaktní špičky $CTWD$. Příčinou je deformace vzorku, kdy vzorek není pevně upnutý do přípravku. Této problematice je věnována kap. 13.5, neboť tato nestabilita na konci svařovaného vzorku se vykytovala i v dalších případech. Metalografický výbrus z oblasti nestability vykazuje vadu svaru 503, převýšení koutového svaru, podle ČSN EN ISO 6520-1. Toto převýšení dosahuje hodnoty 1,3 mm, což v souladu s normou ČSN EN ISO 5817 odpovídá všem stupňům kvality svarových spojů B,C,D. Vykazuje ovšem vadu svaru 5011 souvislý zápal, podle ČSN EN ISO 6520-1. Tento souvislý zápal přesahuje hodnotu 1mm, což v souladu s normou ČSN EN ISO 5817 neodpovídá ani jednomu stupni kvality svarových spojů a jsou tedy nevyhovující.

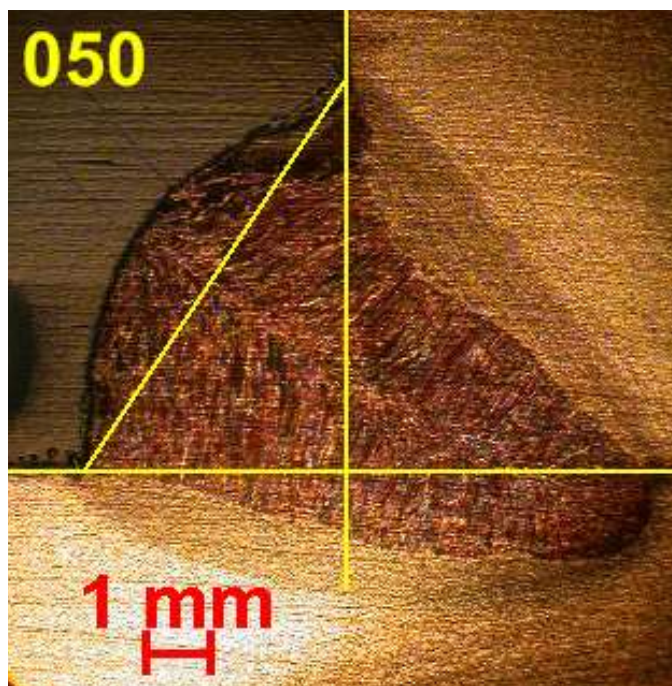
Vzorek č. 050 byl vyhodnocen jako nevyhovující. Překračuje vymezené regulační meze regulačního diagramu. Ze záznamu svařovacích parametrů obr. 13.22 je zřejmá nestabilita svařovacího procesu v celé délce svařovaného vzorku.



Obr. 13.22: Záznam svařovacích parametrů vzorku 050



Obr. 13.23: Detail záznamu svařovacích parametrů vzorku 050

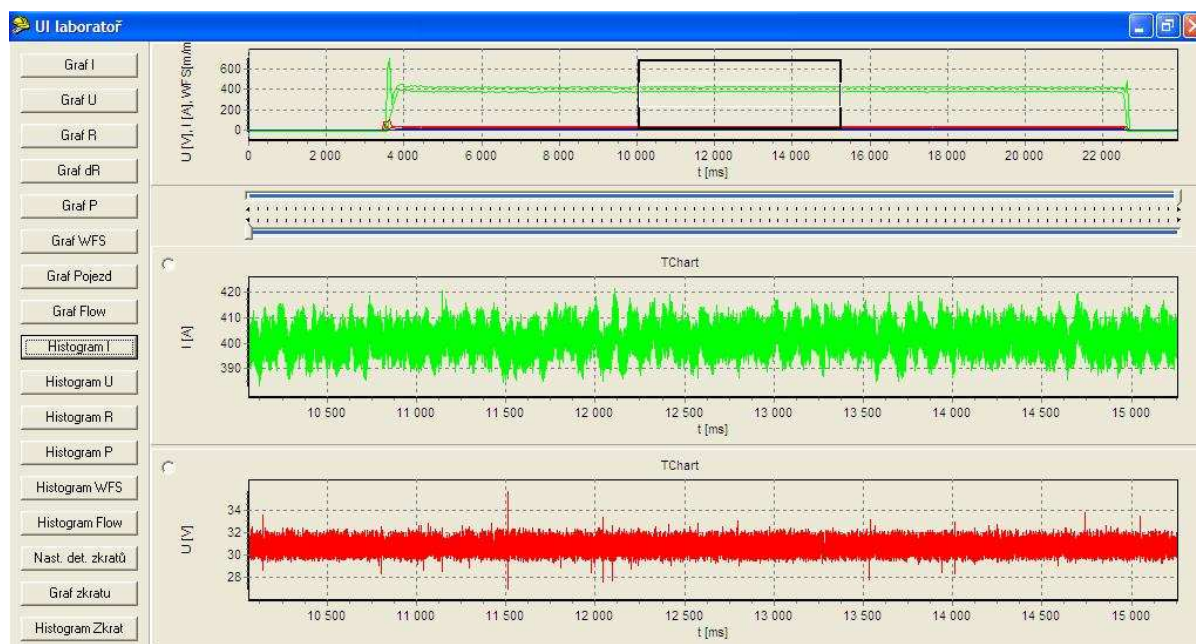


Obr. 13.24: Metalografický výbrus vzorku 050

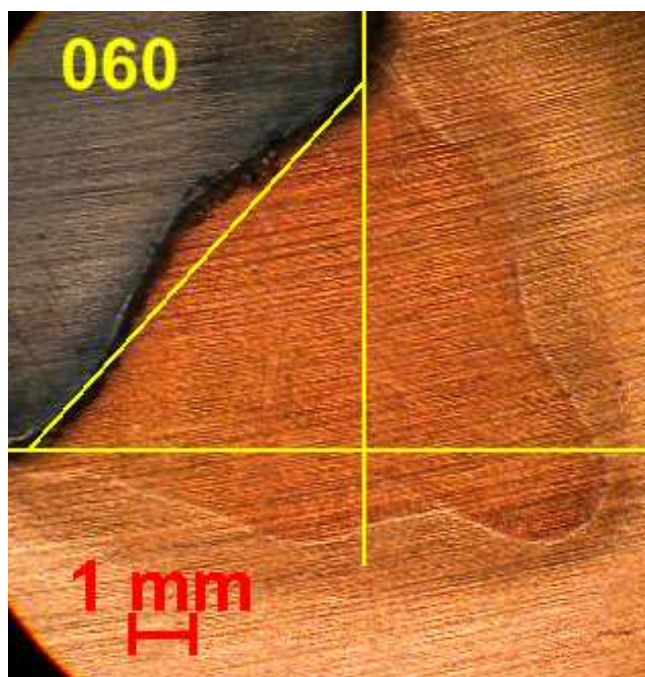
Diskuze: Svařovací parametry vzorku 050, byly zvoleny podle metody centrální kompozice. Kombinace těchto parametrů byla nejnižší hodnota svařovacího napětí $U=25,2$ V a hodnota vzdálenosti kontaktní špičky $CTWD=14$ mm. Ze záznamu svařovacích parametrů je zřejmá nestabilita svařovacího procesu v celé délce svařování vzorku. Tato nestabilita je následkem velmi nízkého svařovacího napětí a zkratování oblouku což je patrné z obr. 13.23 Metalografický výbrus z oblasti nestability vykazuje vadu svaru 503, převýšení koutového

svaru, podle ČSN EN ISO 6520-1. Toto převýšení dosahuje hodnoty 1,4 mm, což v souladu s normou ČSN EN ISO 5817 odpovídá všem stupňům kvality svarových spojů B, C, D.

Vzorek č. 060 byl vyhodnocen jako nevyhovující. Překračuje vymezené regulační meze regulačního diagramu. Ovšem ze záznamu svařovacích parametrů obr. 13.25 je stabilní svařovací proces v celé délce svařovaného vzorku.



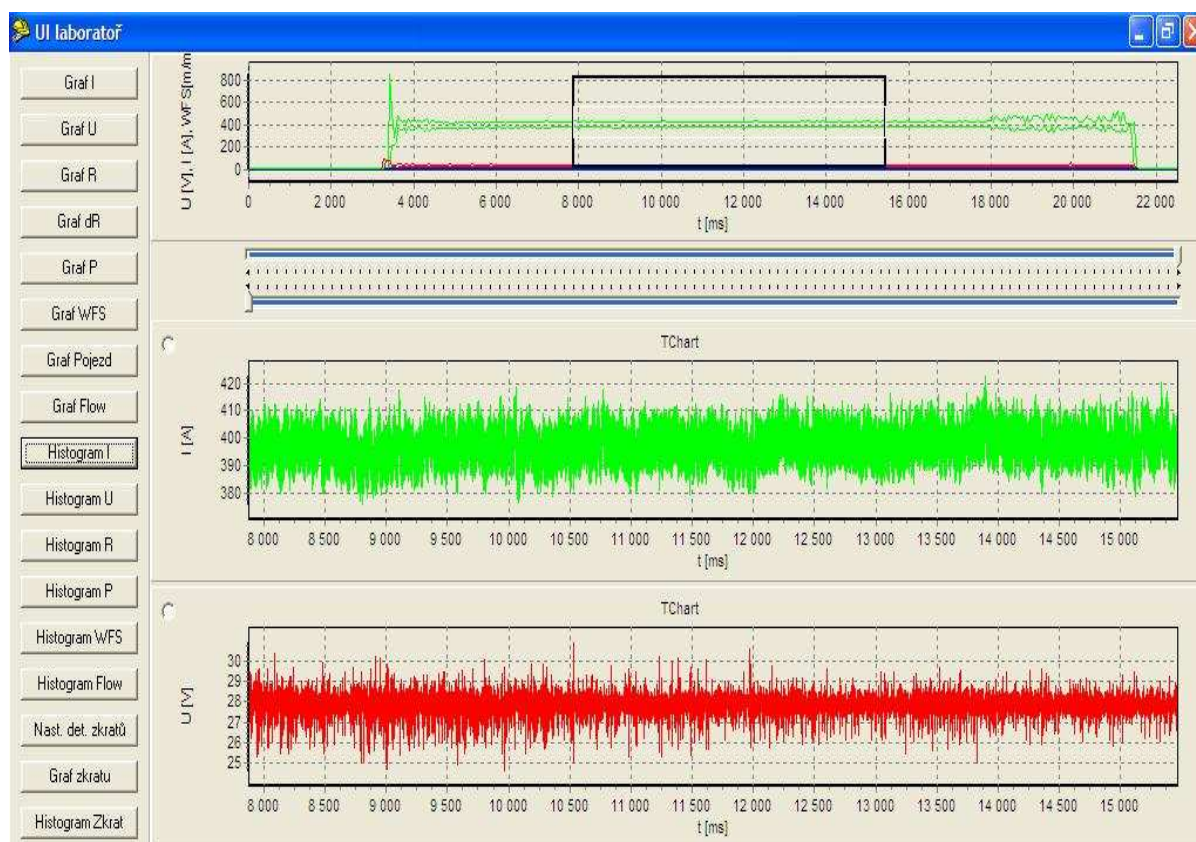
Obr. 13.25: Záznam svařovacích parametrů vzorku 060



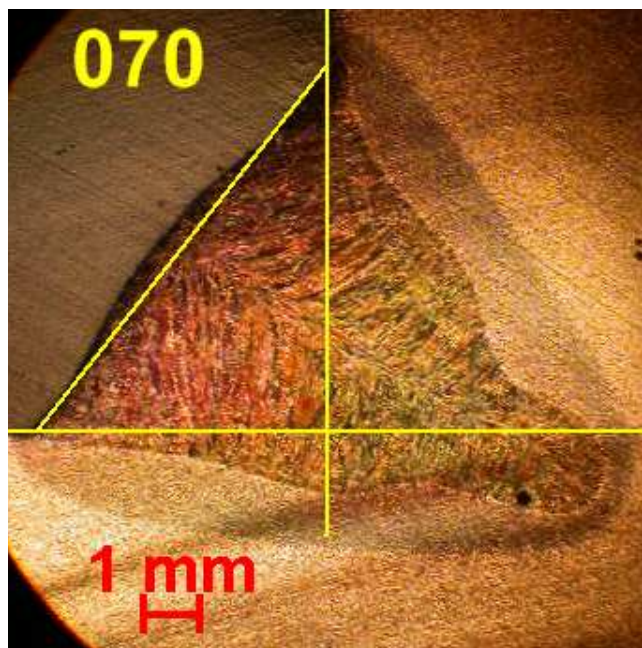
Obr. 13.26: Metalografický výbrus vzorku 060

Diskuze: Svařovací parametry vzorku 060, byly zvoleny podle metody centrální kompozice. Kombinace těchto parametrů byla nejvyšší hodnota svařovacího napětí $U=31,2V$ a hodnota vzdálenosti kontaktní špičky CTWD= 14 mm. Ze záznamu svařovacích parametrů je zřejmé, že svařovací proces je stabilní v celé délce svařovaného vzorku. Z hlediska geometrie koutového svaru vykazuje vzorek celkovou plochu svaru P_S o 16% vyšší než je u středového vzorku. Toto navýšení plochy svaru je následkem kombinace svařovacích parametrů vysokého svařovacího napětí $U=31,2V$ a svařovacího proudu $I=400A$. Metalografický výbrus vzorku 060 obr. 13.26, nevykazuje žádné vady svaru a je v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-1 a ČSN EN ISO 5817.

Vzorek č. 070 byl vyhodnocen jako nevyhovující. Překračuje vymezené regulační meze regulačního diagramu. Ze záznamu svařovacích parametrů obr. 13.27 je ovšem zřejmá stabilita svařovacího procesu do 2/3 délky svařovaného vzorku. Nestabilita procesu na konci svaru je vysvětlena v kap. 13.5.



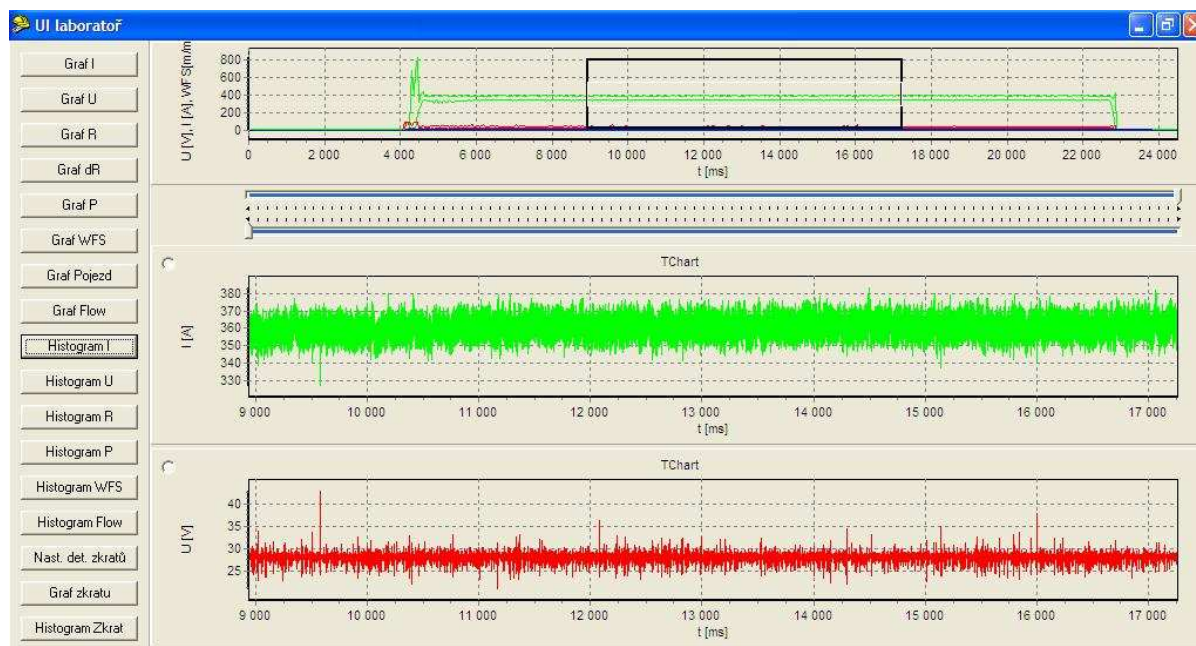
Obr. 13.27: Záznam svařovacích parametrů vzorku 070



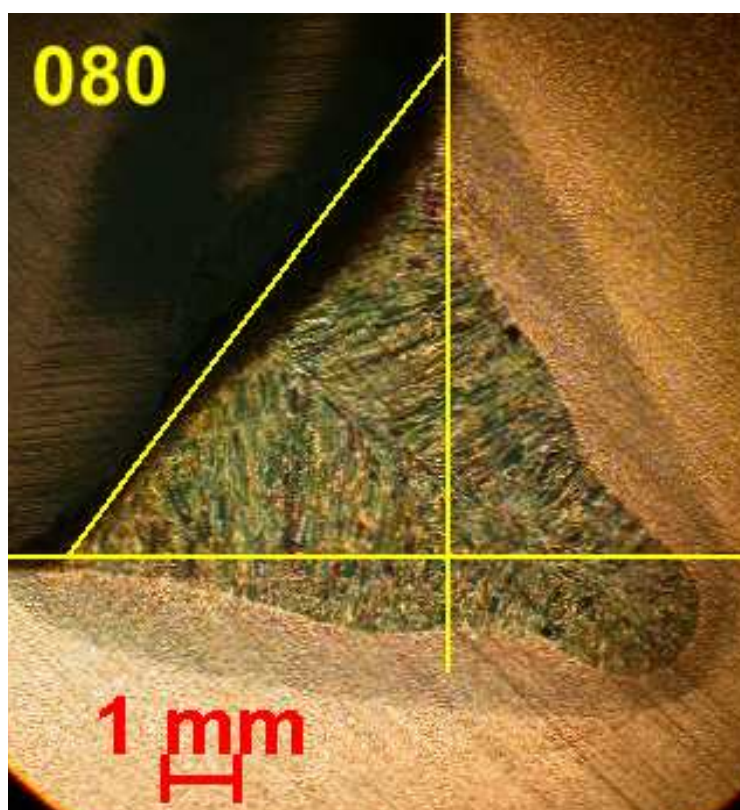
Obr. 13.28: Metalografický výbrus vzorku 070

Diskuze: Svařovací parametry vzorku 070, byly zvoleny podle metody centrální kompozice. Kombinace těchto parametrů byla hodnota svařovacího napětí $U=28,2V$ a nejnižší hodnota vzdálenosti kontaktní špičky $CTWD=12\text{ mm}$. Ze záznamu svařovacích parametrů je zřejmé, že svařovací proces je stabilní v celé délce svařovaného vzorku. Z hlediska geometrie koutového svaru vykazuje vzorek minimální převýšení koutového svaru a zároveň hluboký prstový tvar závaru, což je následkem vysokého svařovacího proudu $I=395A$. Metalografický výbrus vzorku 070 obr. 13.28, nevykazuje žádné vady svaru a je v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-1 a ČSN EN ISO 5817.

Vzorek č. 080 byl vyhodnocen jako nevyhovující. Překračuje vymezené regulační meze regulačního diagramu. Ze záznamu svařovacích parametrů obr. 13.29 je zřejmá stabilita svařovacího procesu v celé délce svařovaného vzorku.



Obr. 13.29: Záznam svařovacích parametrů vzorku 080



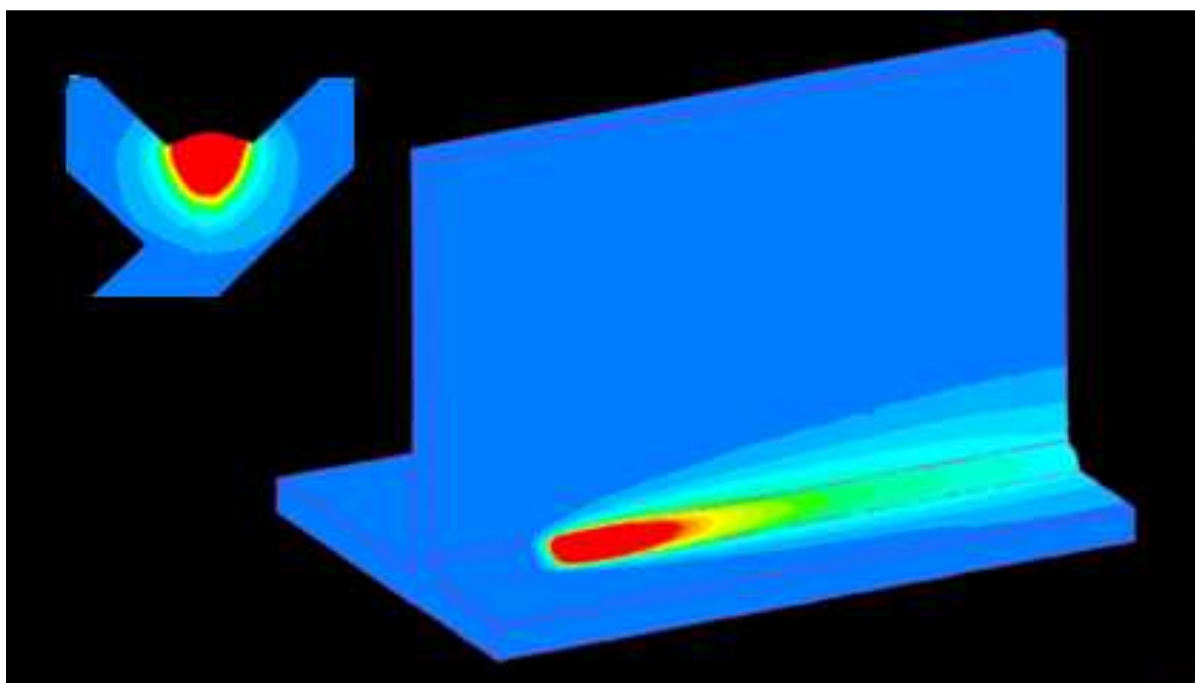
Obr. 13.30: Metalografický výbrus vzorku 080

Diskuze: Svařovací parametry vzorku 080, byly zvoleny podle metody centrální kompozice. Kombinace těchto parametrů byla hodnota svařovacího napětí $U=28,2V$ a hodnota vzdálenosti kontaktní špičky $CTWD=16\text{ mm}$. Ze záznamu svařovacích parametrů je zřejmé,

že svařovací proces je stabilní v celé délce svařovaného vzorku. Z hlediska geometrie koutového svaru vykazuje vzorek minimální převýšení koutového svaru, ovšem závar nemá vysokou hodnotu, což je následkem nižšího svařovacího proudu $I=357\text{A}$. Metalografický výbrus vzorku 080 obr. 13.30, nevykazuje žádné vady svaru a je v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-1 a ČSN EN ISO 5817.

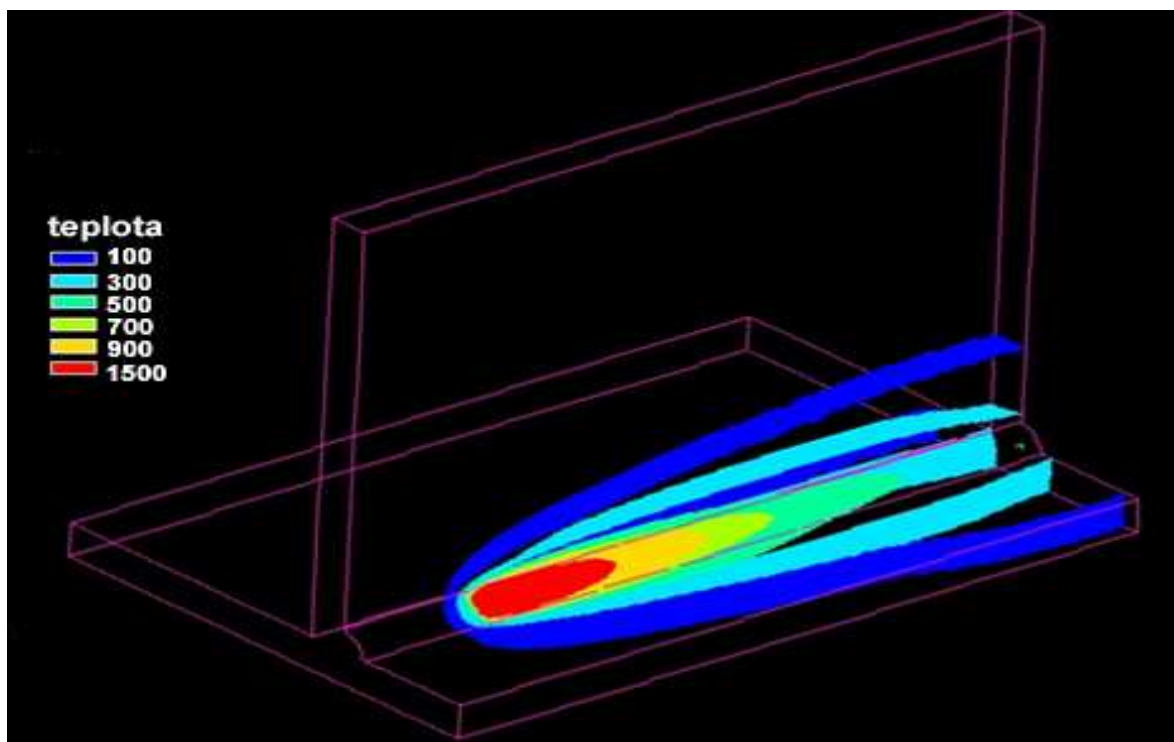
13.5 Nestabilita svařovacího procesu na konci vzorku

U svařovaných vzorků č. 030 a č. 070 byly zvoleny nejmenší vzdálenosti kontaktní špičky CTWD. Pro vzorek č. 030 to byla vzdálenost 12,6 mm a pro vzorek 12 mm. Tato nestabilita je následkem velmi malé vzdálenosti kontaktní špičky CTWD. Příčinou je deformace vzorku, kdy vzorek není pevně upnutý do přípravku. Touto deformací se vzdálenost kontaktní špičky stane kritickou a svařovací proces začíná být nestabilní. Na základě této predikce byla provedena výpočetní simulace svařovaného vzorku systémem SYSWELD. Byl zkonstruován model koutového svaru, zadány vstupní parametry a provedena simulace svařovacího procesu obr. 13.31. Vstupní parametry pro simulaci byly voleny podle vzorku č. 30.

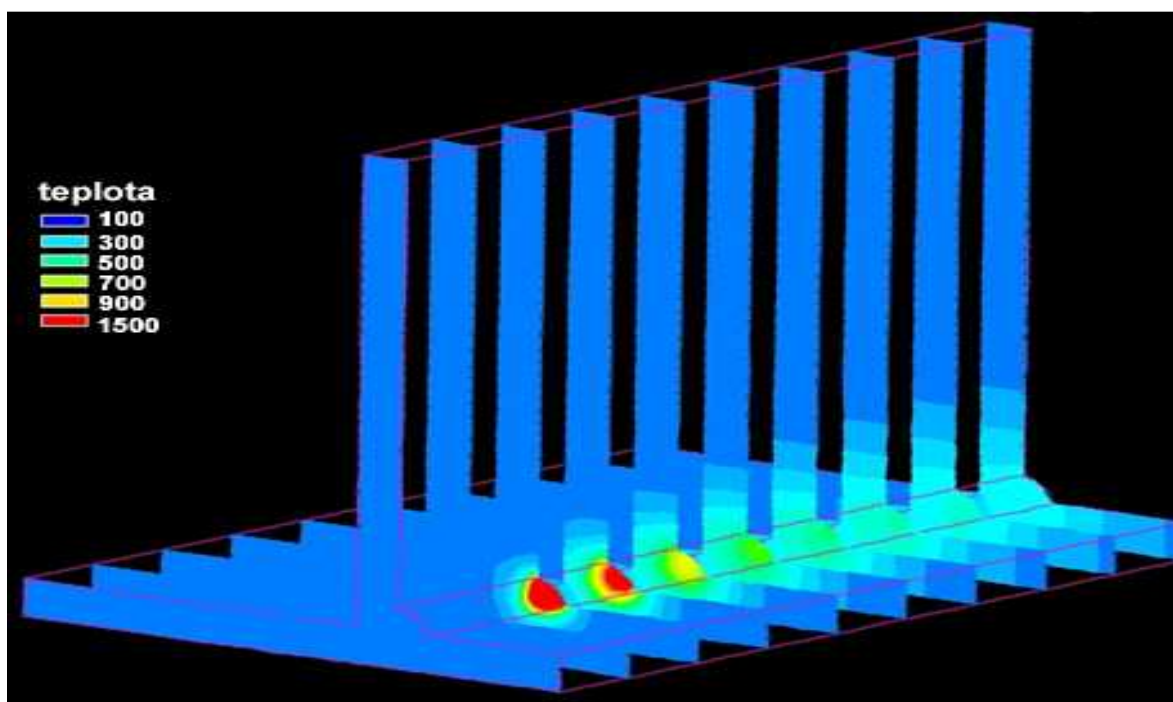


Obr. 13.31: Simulace koutového svaru, detail tvaru svarové lázně

Výsledek teplotní analýzy je zobrazen na obr. 13.32. Barevné odstíny odpovídají teplotám uvedeným u modelu. Teplotní pole je rovnoměrné v celé délce svaru, postupně a rovnoměrně vzorek chladne, což dokazují jednotlivé řezy obr. 13.33.



Obr. 13.32: Simulace teplotního pole



Obr. 13.33: Jednotlivé řezy teplotního pole

V rámci simulačních výpočtů byla provedena mechanická analýza, jejímž úkolem bylo zjistit celkové posunutí linie svaru ve směru osy svařovacího hořáku. Účelem bylo zjištění, o jakou vzdálenost se vlivem deformace vzorku zkrátí vzdálenost kontaktní špičky od základního materiálu. Maximální spočítaná hodnota této deformace je 0,75 mm, což dokazuje predikci příčiny nestability.

13.6 Zhodnocení výsledků experimentů při studiu vlivu výletu drátu

Pro studium vlivu výletu drátu byl použit návrh experimentů podle metody centrální kompozice pro plánování experimentů. Tuto metodu bylo vhodné použít z toho důvodu, že parametrické oblasti byly zmapovány, již v předchozích experimentech uvedených v rešeršní části práce. Byla sestavena matice experimentů pro 2 parametry – svařovací napětí U a vzdálenosti kontaktní špičky CTWD, v pěti hladinách. Tento návrh experimentů byl realizován ve svařovací laboratoři za daných podmínek uvedených v kapitolách 12.1 a 12.2.

Pro záznam svařovacích parametrů byl použit monitorovací systém WeldMonitor, který je detailně popsán v kapitole 8.1. Ze všech svařovaných vzorků byly odebrány vzorky pro metalografické vyhodnocení, viz kap. 13.2. K vyhodnocování stability svařovacího procesu byly použity regulační diagramy kapitola 7.2. Tyto regulační diagramy lze aplikovat pro vyhodnocování záznamů svařovacích parametrů. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v počtu překračujícím 10^3 a jsou statisticky měřitelné a vyhodnotitelné.

Z výsledků experimentů je patrné, že do vymezených regulačních mezí spadají pouze středové body návrhu experimentu a experimenty č. 010 a č. 040. U těchto dvou vzorků je vhodně zvolena kombinace svařovacího napětí a vzdálenosti kontaktní špičky, což dokazuje stabilita svařovacího procesu. Ostatní kombinace svařovacího napětí U a vzdálenosti kontaktní špičky překračují regulační meze a jsou vyhodnoceny jako nestabilní. Vzorky, které nespádají do oblasti vymezených regulačních mezí, nevykazují žádné vady a z hlediska technologického jsou vyhodnoceny jako vyhovující. Tyto vzorky byly navrženy metodou centrální kompozice, a tudíž jejich kombinace parametrů se blíží optimální parametrické oblasti. Bylo zjištěno, že kombinace nízkého svařovacího napětí a velké vzdálenosti kontaktní špičky vede k nestabilitě hoření oblouku na počátku svařovacího procesu. Zcela opačná situace nastává při kombinaci vysokého svařovacího napětí a nízké hodnoty vzdálenosti kontaktní špičky. Tato kombinace svařovacích parametrů vede k nestabilnímu

hoření svařovacího oblouku. Při vysokých hodnotách svařovacího napětí a malé hodnoty vzdálenosti kontaktní špičky je svarový spoj náchylný ke vzniku nevyhovujících zápalů.

Diskuze: Regulační diagramy mohou být vhodné pro zjišťování stability svařovacích procesů. Z uvedených experimentů je patrné, že kombinace svařovacího napětí a vzdálenosti kontaktní špičky je velmi citlivá na stabilitu svařovacího procesu. K možné implementaci regulačních diagramů do monitorovacího systému, je potřeba blíže specifikovat předem zadané proměnné: napětí, vzdálenost kontaktní špičky. Je potřebné stanovit výpočetní funkci, která by blíže specifikovala, za jakých podmínek bude svařovací proces stabilní. Pro zajištění statistické stability je potřebné vhodně zvolit svařovací parametry, které nebudou mít tak velký rozsah, jako zvolené experimenty v této práci.

14. Stanovení kritické rychlosti svařování

Experimenty byly navrženy pro jednotnou plochu svaru P_m vypočtenou podle vztahu:

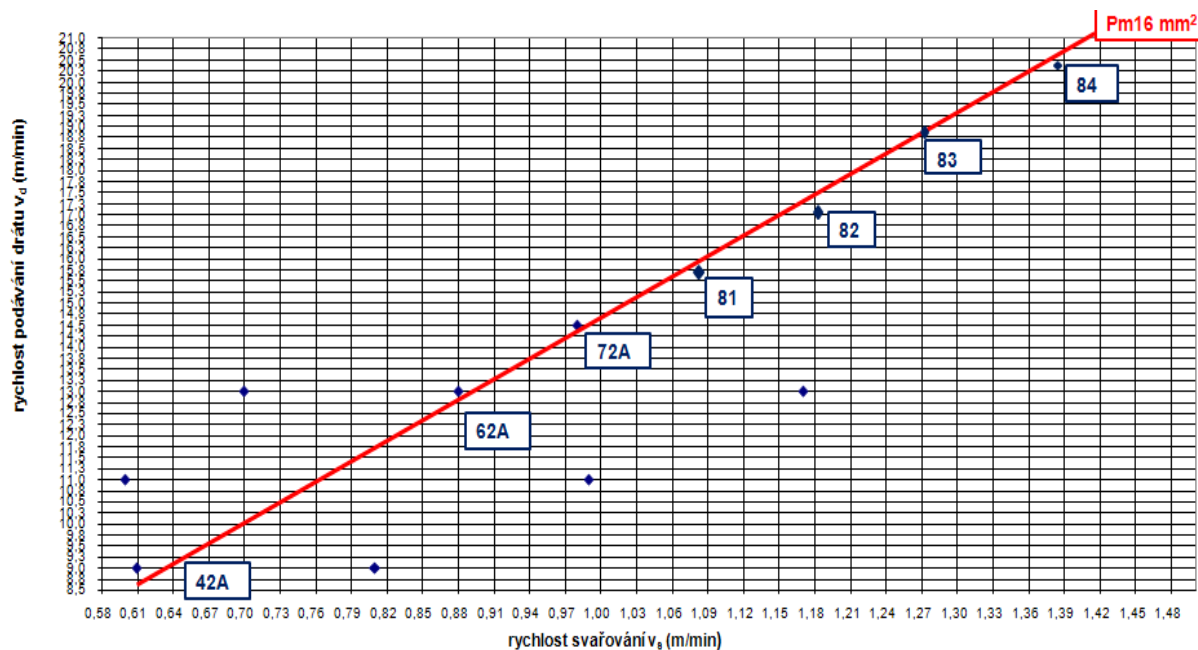
$$P_m = 1,08 \frac{v_d}{v_s} \quad (14.1)$$

Kde: P_m - plocha svaru (mm^2),

v_d - rychlost podávání drátu (m.min^{-1}),

v_s - rychlost svařování (m.min^{-1}).

Navržený experimentu je zobrazeno na obr. 14.1, kde je vynesena závislost rychlosti podávání drátu v_d na svařovací rychlosti v_s . Přímka P_m udává velikost plochy svaru v tomto případě 16mm^2 .



Obr. 14.1: Navržení experimentů pro konstantní plochu svaru

Navržené hodnoty svařovaných parametrů jsou uvedeny v tab. 14.1. Byly navrženy svařovací parametry: rychlost podávání drátu v_d , svařovací rychlost v_s , svařovací napětí U a plocha svaru P_m . Použitý ochranný plyn byl FERROMAXX PLUS 68% Ar, 12% CO₂, 20% He.

Tab. 14.1. Navržené hodnoty experimentu

vzorek	v_d (m.min ⁻¹)	v_s (m.min ⁻¹)	U (V)	P_m (mm ²)
42A	9	0,68	27,6	16
62A	13	0,88	28,5	16
72A	14,5	0,98	29,2	16
81	16	1,08	29,6	16
82	17,5	1,18	30,2	16
83	19	1,28	30,7	16
84	20,5	1,38	31,2	16
85	16	1,08	29,4	16

Naměřené hodnoty svařovaných parametrů jsou uvedeny v tab. 14.2. Byly sledovány svařovací parametry: rychlost podávání drátu v_d , svařovací rychlost v_s , svařovací napětí U a svařovací proud I .

Tab. 14.2. Naměřené hodnoty experimentu

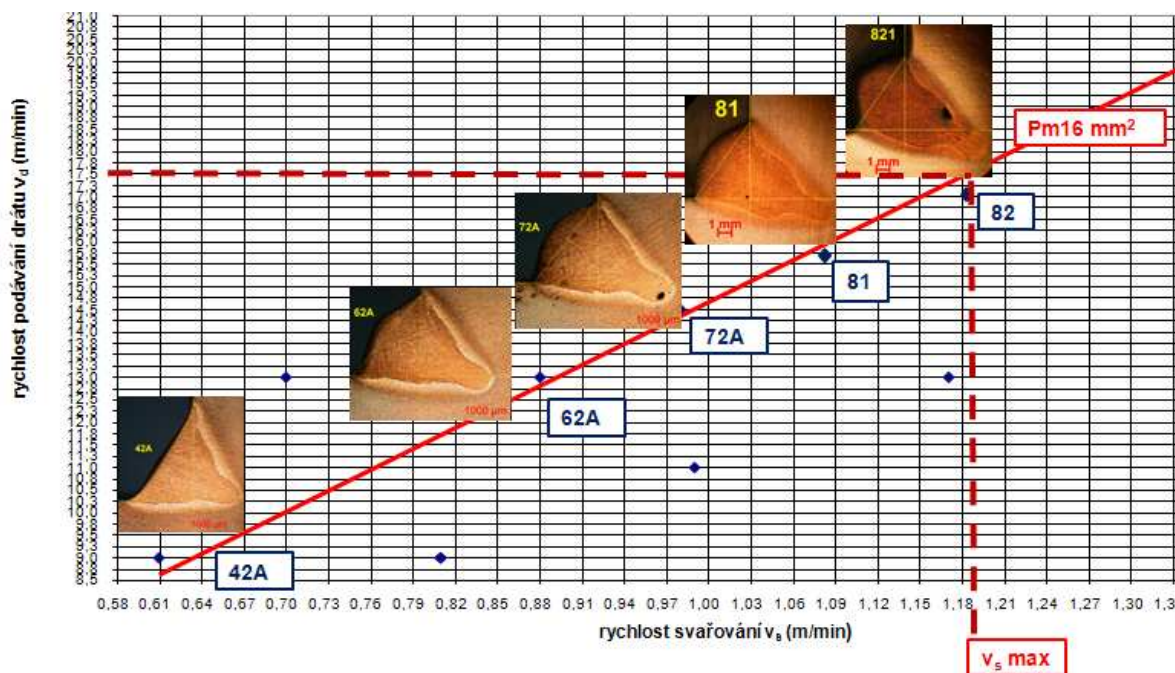
vzorek	v_d (m.min ⁻¹)	v_s (m.min ⁻¹)	U (V)	I (A)
42A	9	0,68	27,6	315
62A	13	0,88	28,5	400
72A	14,5	0,98	29,2	425
81	16	1,08	29,5	463
82	17,5	1,19	29,8	500
83	19	1,28	30,2	520
84	20,5	1,39	30,5	550
85	16	1,08	29,4	460

Byly zhotoveny metalografické výbrusy všech vzorků a vyhodnoceny podle obr. 13.2 a výsledky zaznamenány do tabulky 14.3. Taktéž byly analyzovány záznamy svařovacích parametrů. Z tabulky 14.3 je zřejmé, v jakém bodě byla určena maximální svařovací rychlost. Tato rychlost svařování se projevila jako mezní, kdy nastala nestabilita svařovacího procesu. Nestabilita se projevila na svařovacích parametrech a byla i potvrzena metalografickým výbrusem u vzorku 82, kdy se tvořil nežádoucí „humping efekt“.

Tab. 14.3. Naměřené hodnoty koutového svaru

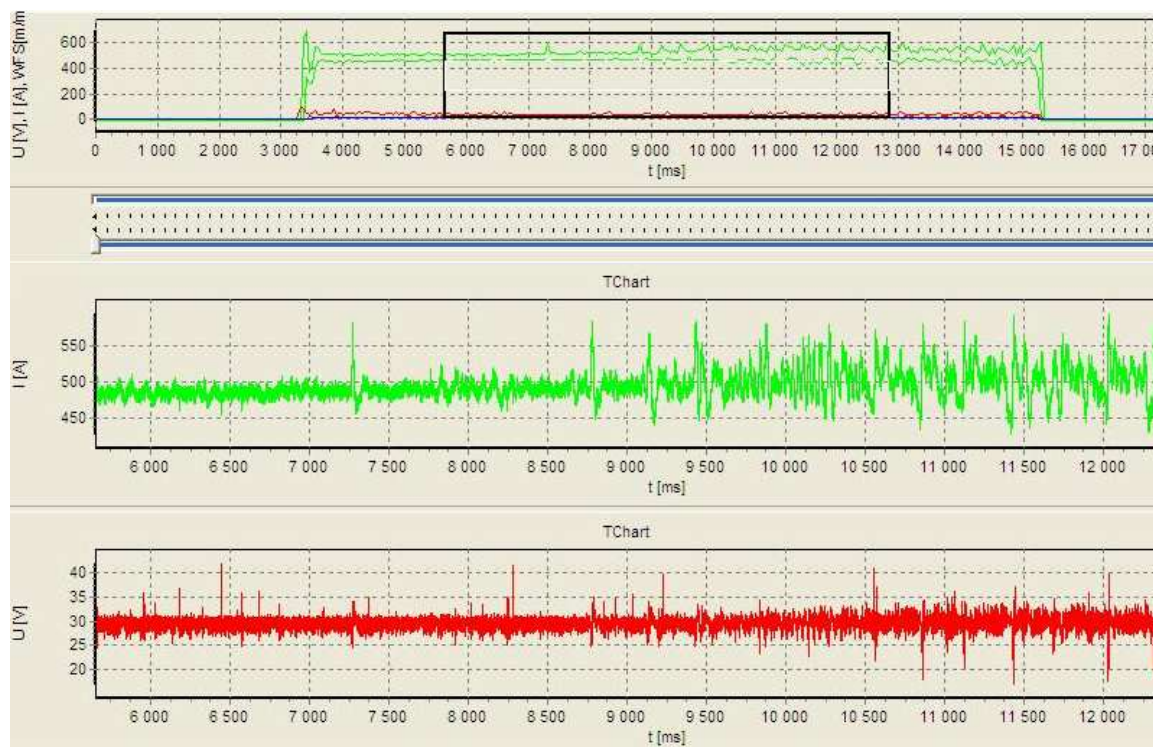
číslo vzorku	r (mm)	a (mm)	z (mm)	v (mm)	w (mm)	b (mm)	c (mm)	P _P (mm ²)	P _N (mm ²)	P _C (mm ²)	trhlina (mm)
42A	0	3,8	2,9	6,8	8,3	4,5	6,9	—	16,3	30,9	—
62A	1	3,5	3,8	7,3	7,2	4,5	5,5	—	16,1	33,2	—
72A	1,5	4,2	3,9	8	8,4	5,8	6,1	—	23,2	39,4	—
81	1,4	3,3	3,8	8,8	7,1	5,7	4,2	6,6	11,8	39,7	—
821	1,8	3,1	3,8	8,8	6,5	5,5	3,6	8,1	10,4	39,4	—
822	2,3	3,1	3,1	7,7	6,4	5	4,1	9,2	10,3	30,3	—
822-1	2,1	3,3	3,5	8,3	6,7	5,3	4,3	8,4	12,1	33	1,6
822-2	1,9	3,3	3,2	8,5	6,8	5,2	4,3	7,4	11,5	34,5	1,1
822-3	1,9	3,1	3,2	8,4	6,3	5,2	3,9	6,6	9,7	35,2	—
822-4	1,7	3,4	2,9	8,5	6,4	5	4,3	5,6	11,9	37,4	—
83	3,3	2,7	2	8,1	5,6	4,2	3,9	12,6	7,7	41,6	—
84	3,1	3,2	3	7,9	6,6	5	4,2	12,8	10,6	41,2	—
85	1,2	4,1	1,6	8,9	7,9	5,6	5,5	4,1	16,1	36,9	2,3

Naměřené hodnoty vzorků č. 42A, 62A a 72A jsou převzaty z práce Hudce a Hrstky [22].



Obr. 14.2: Vyhodnocené experimenty

Na obr. 14.2 je grafické znázornění vyhodnocených experimentů. Záznamy a metalografické výbrusy potvrdily nestabilitu svařovacího procesu ve vzorcích 82, 83 a 84. Podle záznamu vzorku č. 82, obr. 14.3, je patrný náběh nestability procesu v čase 9 s a proto se práce soustředila na tuto oblast.



Obr. 14.3: Záznam svařovaného vzorku 82

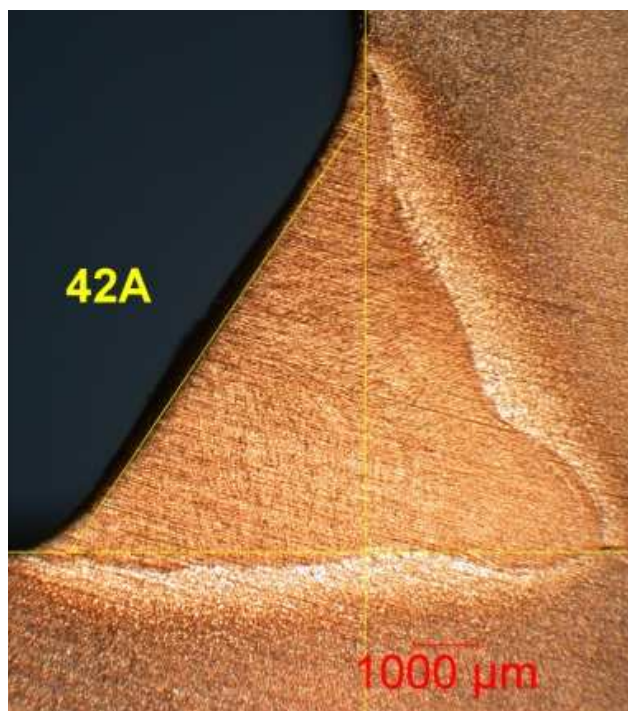
Při použití funkce vybrání určité oblasti U-I laboratoře, lze zobrazit náběh nestability v okamžiku 9 s obr. 14.4. Nestabilita svařovacího procesu je nejvíce zřejmá z průběhu svařovacího proudu, kdy lze odečíst hodnoty pohybující se v diferenci hodnot 110 A.



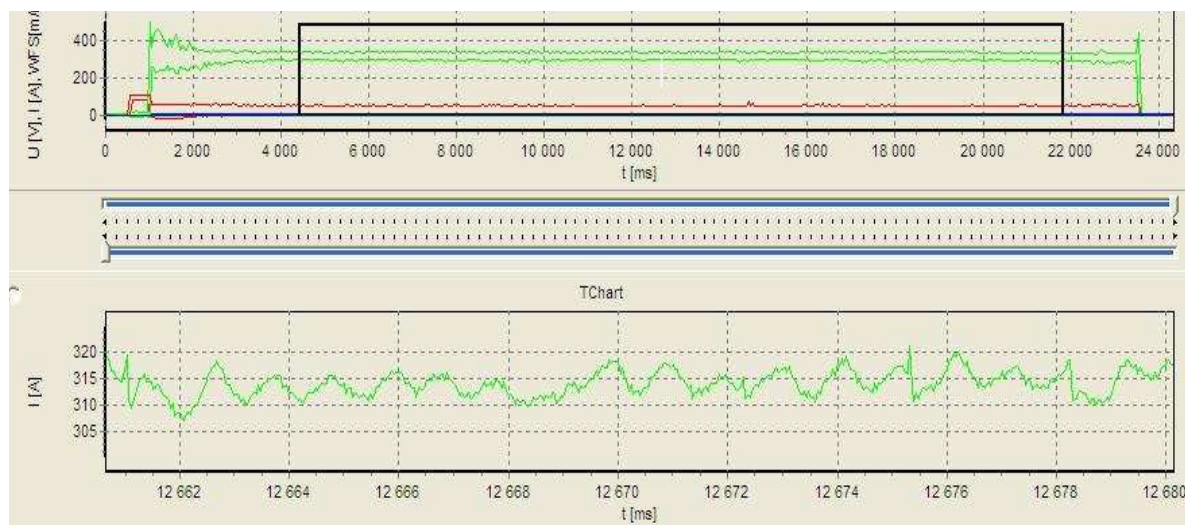
Obr. 14.4: Detailní záznam oblasti nestability

Svařovaný vzorek 42A

Ze zvolených parametrů svařování je zřejmé, že se jedná o sprchový přenos kovu. Záznam svařovacích parametrů je stabilní a na metalografickém výbrusu vzorku 42A na obr. 14.5, se nevyskytuje žádná vada dle ČSN EN ISO 6520-1 a podle normy ČSN EN ISO 5817 splňuje všechny stupně kvality svarového spoje. U tohoto vzorku je minimální závar až na hranici studeného spoje, ovšem vyhovuje výše zmíněným normám.



Obr. 14.5: Metalografický výbrus vzorku 42A

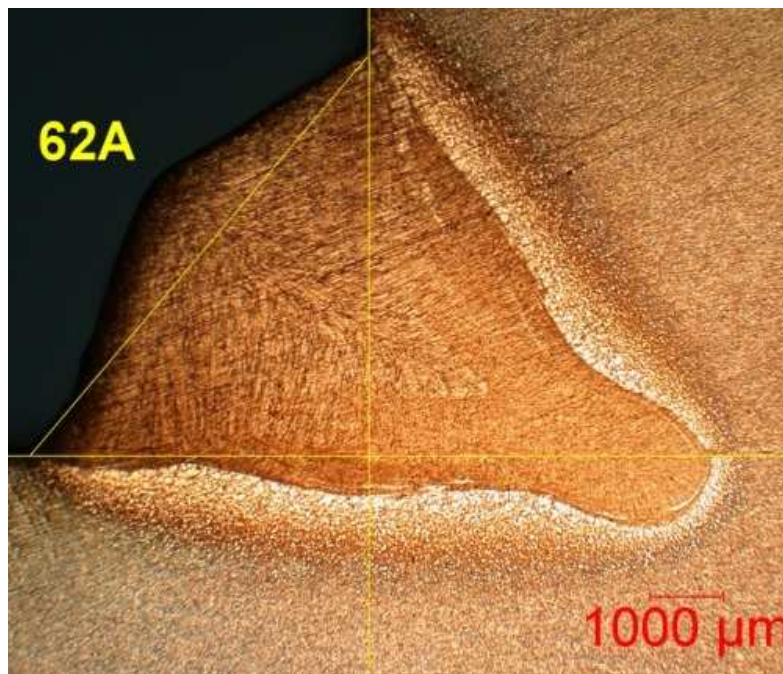


Obr. 14.6: Záznam svařovacího proudu vzorku 42A

Svařovaný vzorek 62A

Naměřené parametry svařování $v_d = 13 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $U = 28,5 \text{ V}$ a $I = 400 \text{ A}$ vzorku 62A ukazují na svařovací režim se sprchovým přenosem kovu a s krátkým obloukem. Záznam svařovacích parametrů je stabilní, hodnoty svařovacího proudu se mění v maximálním rozmezí 10 A. Na metalografickém výbrusu vzorku obr. 14.7, není žádná vada dle ČSN EN

ISO 6520-1 a podle normy ČSN EN ISO 5817 splňuje všechny stupně kvality. Převýšení svaru je větší než u předchozího vzorku a zvyšuje se hloubka závaru.



Obr. 14.7: Metalografický výbrus vzorku 62A

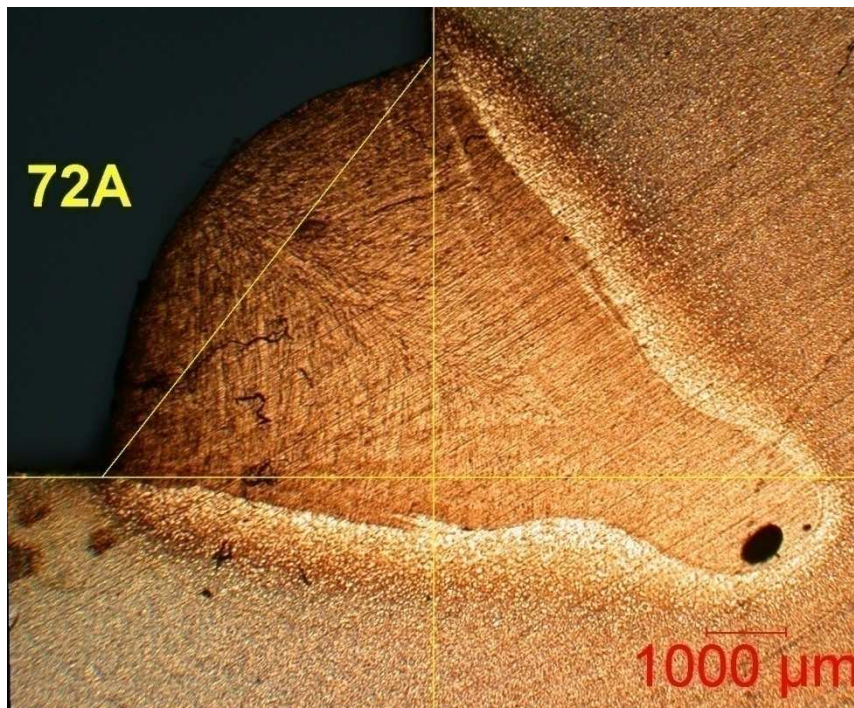


Obr. 14.8: Záznam svařovacího proudu vzorku 62A

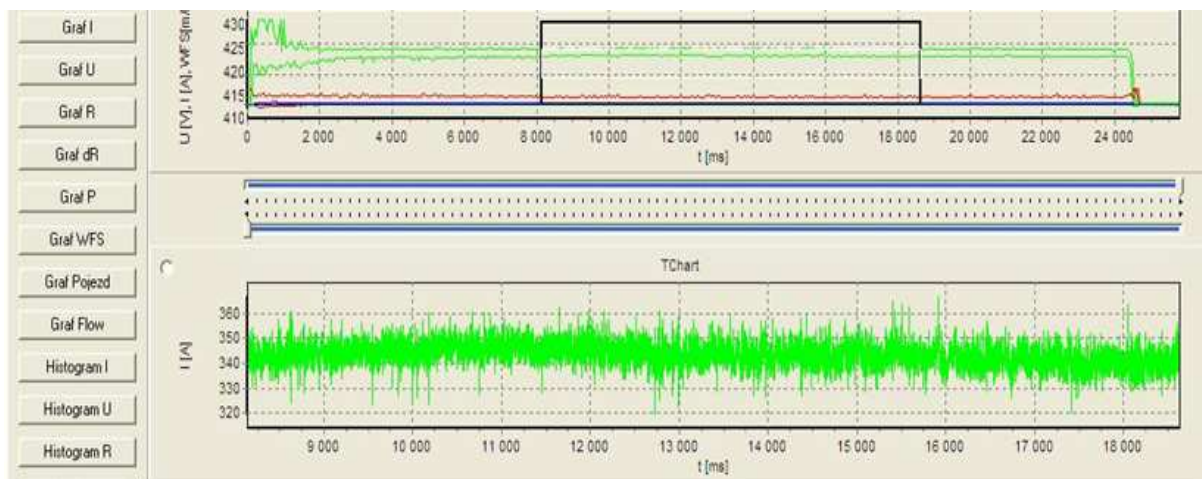
Vznik nestability na konci svařovaného vzorku je vysvětlen v kap. 13.5.

Svařovaný vzorek 72A

Svařovaný vzorek 72A je téměř geometricky totožný se vzorkem 62A. Svařovací parametry jsou vyšší ovšem stabilita procesu vyhovující obr. 14.8.



Obr. 14.7: Metalografický výbrus vzorku 72A

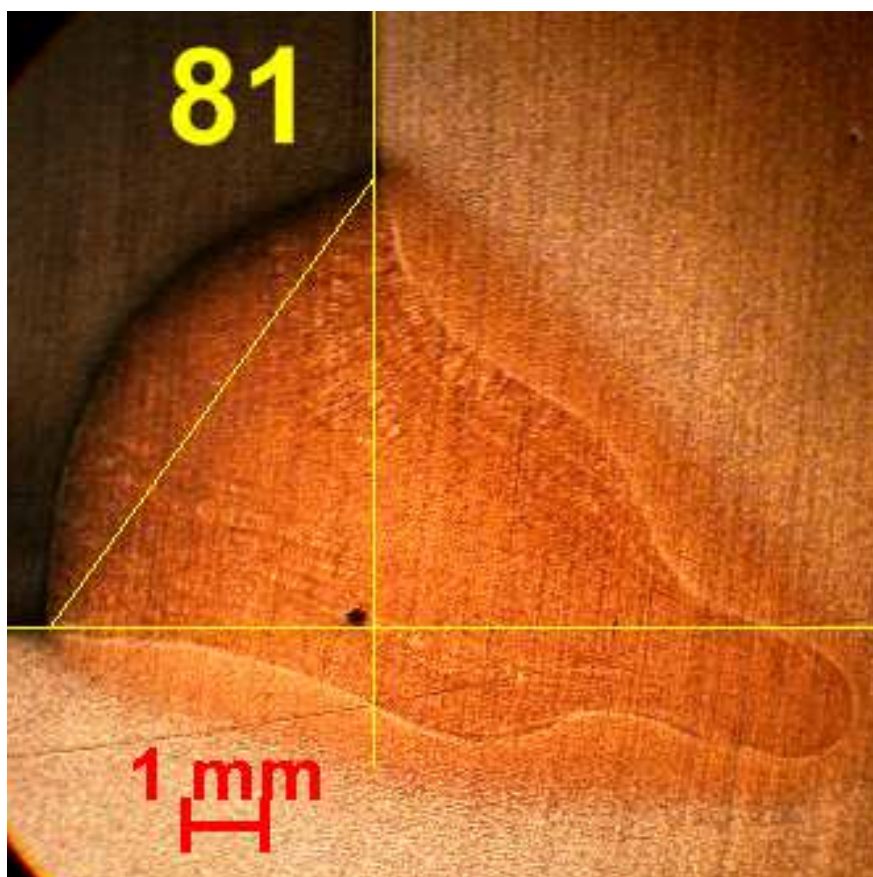


Obr. 14.8: Záznam svařovacího proudu vzorku 62A

Svařovaný vzorek 81

Naměřené parametry svařování $v_d = 16 \text{ m.min}^{-1}$, $U = 29,5 \text{ V}$ a $I = 463 \text{ A}$ vzorku 81 vykazují svařovací režim se sprchovým přenosem kovu a s krátkým obloukem. Svařovací rychlost přesahuje hodnotu 1 m.min^{-1} a lze tedy očekávat jistou nestabilitu procesu. Záznam

svařovacích parametrů je stabilní, hodnoty svařovacího proudu se mění v maximálním rozmezí 20A, obr. 14.9. Na metalografickém výbrusu vzorku obr. 14.8, není žádná vada dle ČSN EN ISO 6520-1 a podle normy ČSN EN ISO 5817 splňuje všechny stupně kvality. Mění se výrazně tvar svaru a zvyšuje se hloubka závaru. Tvar svaru je zúžený a vytváří takzvaný tvar prstového závaru.



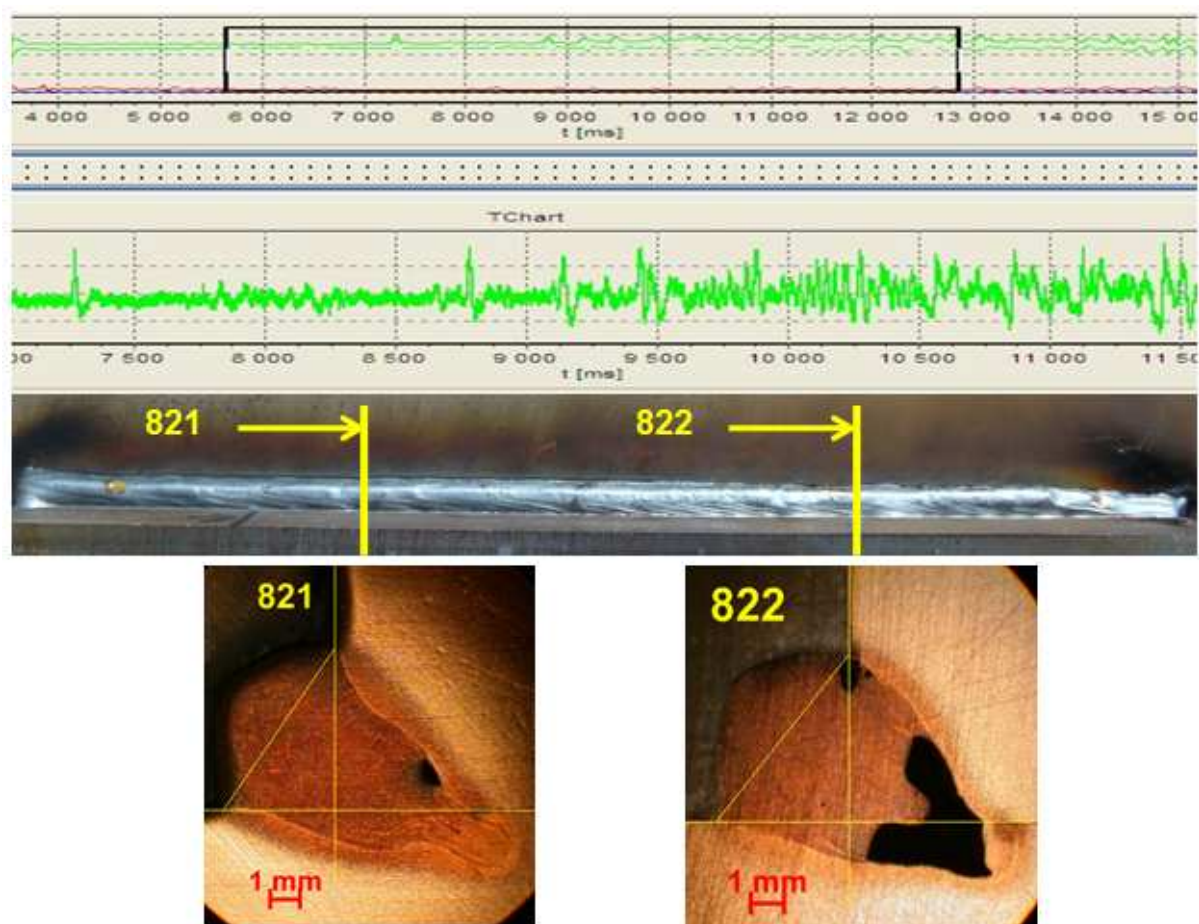
Obr. 14.8: Metalografický výbrus vzorku 81



Obr. 14.9: Záznam svařovacího proudu vzorku 81

Svařovaný vzorek 82

Svařovací parametry tohoto vzorku $v_d = 17,5 \text{ m.min}^{-1}$, $U = 29,8 \text{ V}$ a $I = 500 \text{ A}$, lze považovat za vysokovýkonný proces svařování metodou 135. Svařovací rychlost dosahuje hodnoty $1,19 \text{ m.min}^{-1}$. Záznam svařovacích parametrů je nestabilní, hodnoty svařovacího proudu se mění v rozmezí 120A, obr. 14. 10. Metalografický výbrus vzorku obr. 14. 10, zobrazuje vadu dle ČSN EN ISO 6520-1, nepřípustné póry. Podle normy ČSN EN ISO 5817 nesplňuje všechny stupně kvality. Mění se výrazně tvar svaru a zvyšuje se hloubka závaru. Tvar svaru je zúžený a vytváří takzvaný tvar prstového závaru. Ze záznamu svařovacích parametrů byl zjištěn náběh nestability zhruba v polovině svařovaného vzorku. Z tohoto důvodu byly provedeny dva řezy 821 a 822 vyznačené na snímku svařovaného vzorku obr. 14.10. Pod vyznačenými místy řezu jsou umístěny metalografické výbrusy a záznam.

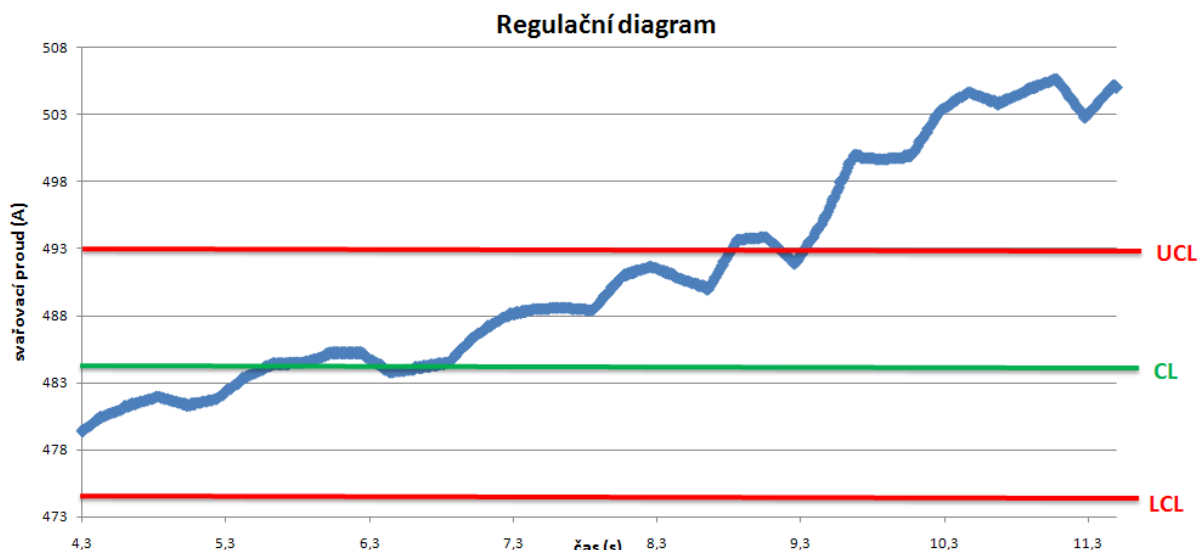


Obr. 14.10: Svařovaný vzorek 82

Podle normy ČSN EN ISO 5817 nesplňuje všechny stupně kvality. Překračuje mez převýšení svaru a vyskytují se nepřipustné póry ve svarovém kovu. Detailní rozbor svařovaného vzorku 82 a vznik mechanismu tvorby dutiny ve svarovém spoji je uvedený v kapitole 14.6. Aplikací regulačních diagramů, bylo zjištěno, že záznamy svařovacích parametrů vzorků 42A, 62A a 81 jsou stabilní a nepřekračují regulační meze příloha 3. Při stanovení kritické rychlosti svařování, byl vyhodnocen záznam svařovacích parametrů jako nestabilní u vzorku číslo 82. Pro zvolení centrální přímky CL regulačního diagramu obr. 14.11, byla vypočtena hodnota aritmetického průměru svařovacího proudu vzorku 82 ve stabilní oblasti od 4s do 8 s. Určení horní UCL a dolní meze LCL bylo vypočítáno v souladu s normou ČSN ISO 7873 [45]. Tyto meze byly stanoveny klasickým způsobem, jako trojnásobek směrodatné odchylky. Hodnoty centrální přímky, horní a dolní meze jsou uvedeny v tab. 14.4.

Tab. 14.4. Hodnoty regulačního diagramu

č. vzorku	centrální přímka CL (A)	horní mez UCL (A)	dolní mez LCL (A)
82	484,2	492,8	475,6

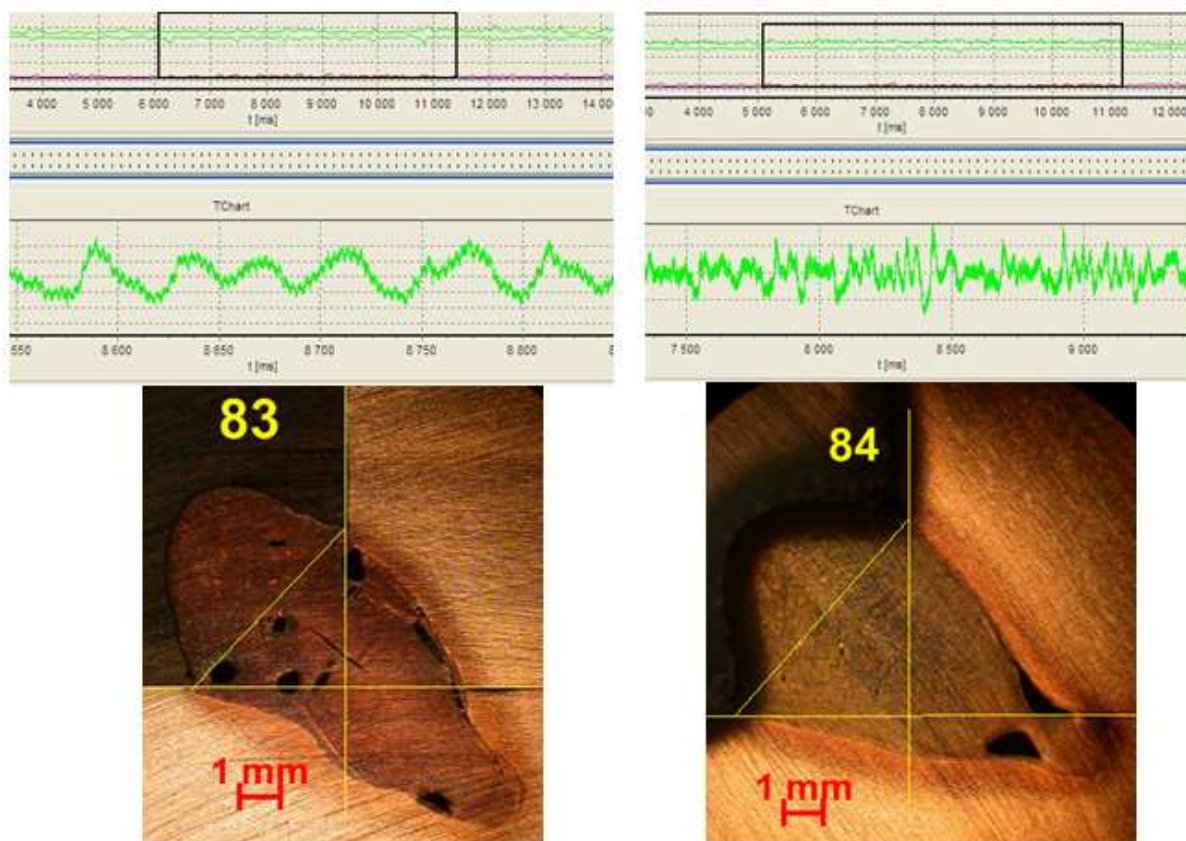


Obr. 14.11: Regulační diagram vzorku 82

Diskuze: Aplikace regulačních diagramů pro stanovení kritické rychlosti může být vhodný nástroj pro podporu zajištění jakosti svarových spojů. Při vyhodnocení nasnímaných dat je možné detekovat nestabilitu svařovacího procesu. Pro danou kombinaci svařovací zdroj-ochranný plyn a přídavný materiál, lze stanovit meze stability a detekce překročení těchto mezí. Pro možnou implementaci do systému WeldMonitor je nutné, aplikovat přímo do vyhodnocovacího softwaru systému, výpočet střední hodnoty svařovacího proudu a směrodatné odchylky z nasnímaných dat. Po svaření by byl záznam vyhodnocen, vypočteny regulační meze, centrální přímka a byl by proveden grafický výstup do menu programu. Po té by bylo možné detekovat změnu stability, která by mohla být následkem kritické svařovací rychlosti.

Svařovaný vzorek 83 a84

U svařovaných vzorků 83 a 84 na obr. 14. 11, byla překročena kritická rychlost svařování.



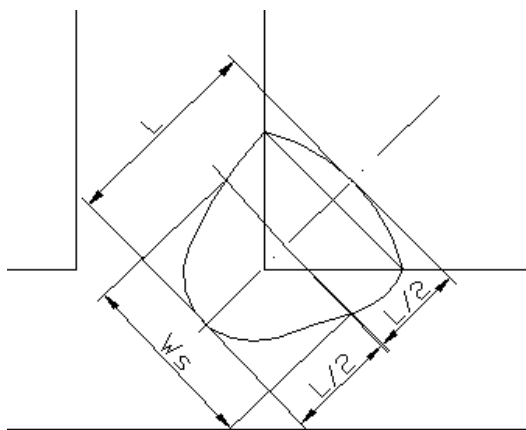
Obr. 14.11: Svařovaný vzorek 83, 84

Metalografický výbrus vykazuje vznik trhliny za horka v ose svaru. Trhliny za horka vznikají a šíří se přímo ve vzniklé svarové lázni při tuhnutí a to většinou v ose svaru. Výskyt trhlín při tuhnutí svarového kovu je určen termomechanickými a metalurgickými procesy. Trhliny jsou iniciovány, pokud se vyčerpá plasticita svarového kovu a důsledkem termomechanických napětí, nebo nevhodným chemickým složením základního materiálu. Rozměry trhlín se mohou pohybovat od několika mikrometrů až po celé délce svaru [44]. Příčinou trhliny u vzorku č. 83, může být nevhodný tvar svaru a velké termomechanické napětí ve svarovém kovu. Pro určování náchylnosti k tvorbě trhlín za tepla existují různá kritéria. Zvolil jsem kritérium „K“ založené na stanovení poměru maximální délky průřezu svaru k jeho střední šířce W_s [43] podle vztahu (14.1) a obr. 14.12.

$$K = \frac{L}{w_s} \leq 2 \quad (14.1)$$

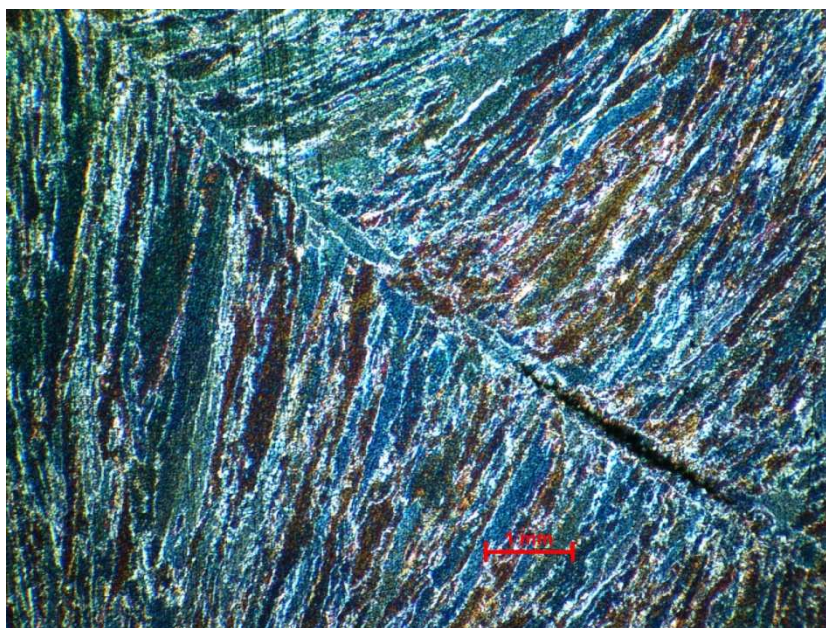
w_s - střední šířka housenky [mm]

L - celková délka svaru [mm]



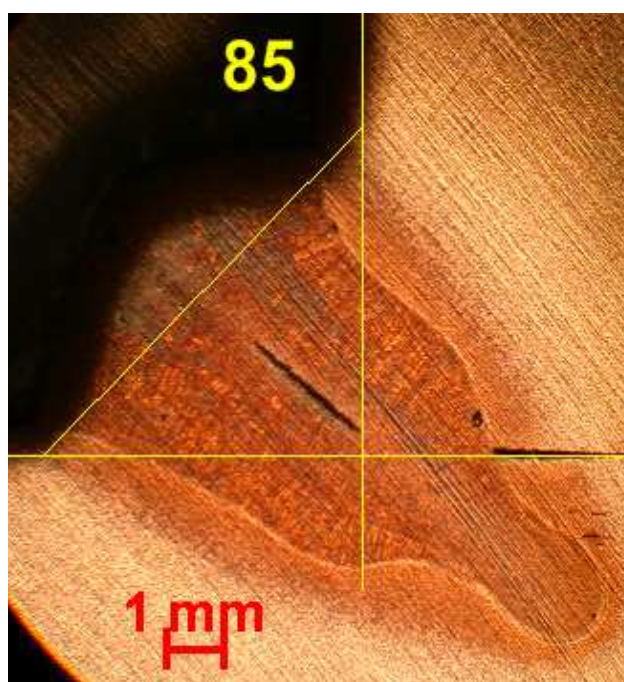
Obr. 14.12: Určení rozměrů pro výpočet K

U vzorku 83 je vypočítaná hodnota $K=2,83$, což přesahuje dovolenou hodnotu danou vztahem 14.1. Metalografický snímek trhliny za horka u vzorku 822 je zobrazen na obrázku 14.13. Trhlina se iniciovala přímo v ose svaru, což je patrné na výbrusu.



Obr. 14.13: Trhlina za horka

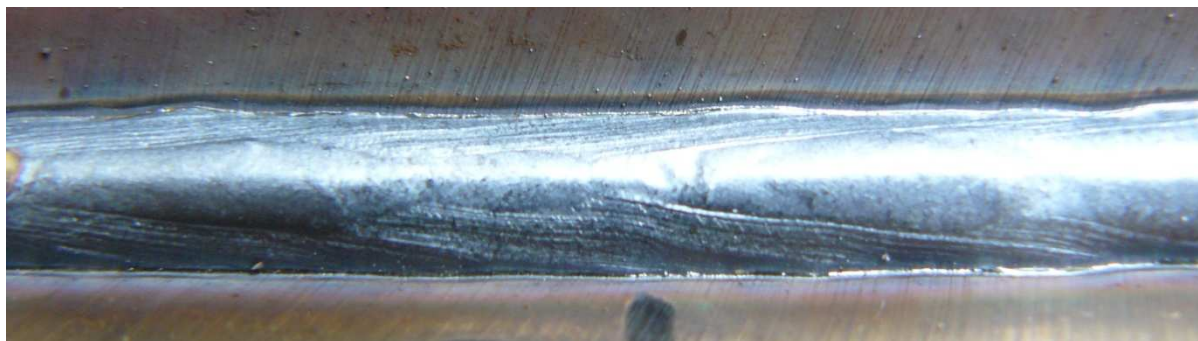
Jelikož byly svařovací rychlosti u vzorku č. 84 nevyhovující, byl vzorek č. 85 svařován při použití ochranného plynu EUROMIX M21 82% Ar, 18% CO₂. Na obr. 14.13 je zobrazen metalografický výbrus vzorku 85, který byl svařován stejnými parametry jako vzorek 81: $v_d=16\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, $U=29,5\text{ V}$ a $I=460\text{ A}$ a svařovací rychlostí $v_s=1,08\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Je zřejmé, že z hlediska geometrie je svar vyhovující. Ovšem vyskytuje se zde nevyhovující trhlina za horka. Potvrdila se teorie, že směsný plyn s heliem posunuje parametrickou oblast pro použití větších svařovacích rychlostí. Při použití plynu 82% Ar, 18% CO₂, se hranice kritické svařovací rychlosti posunula pod $1\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.



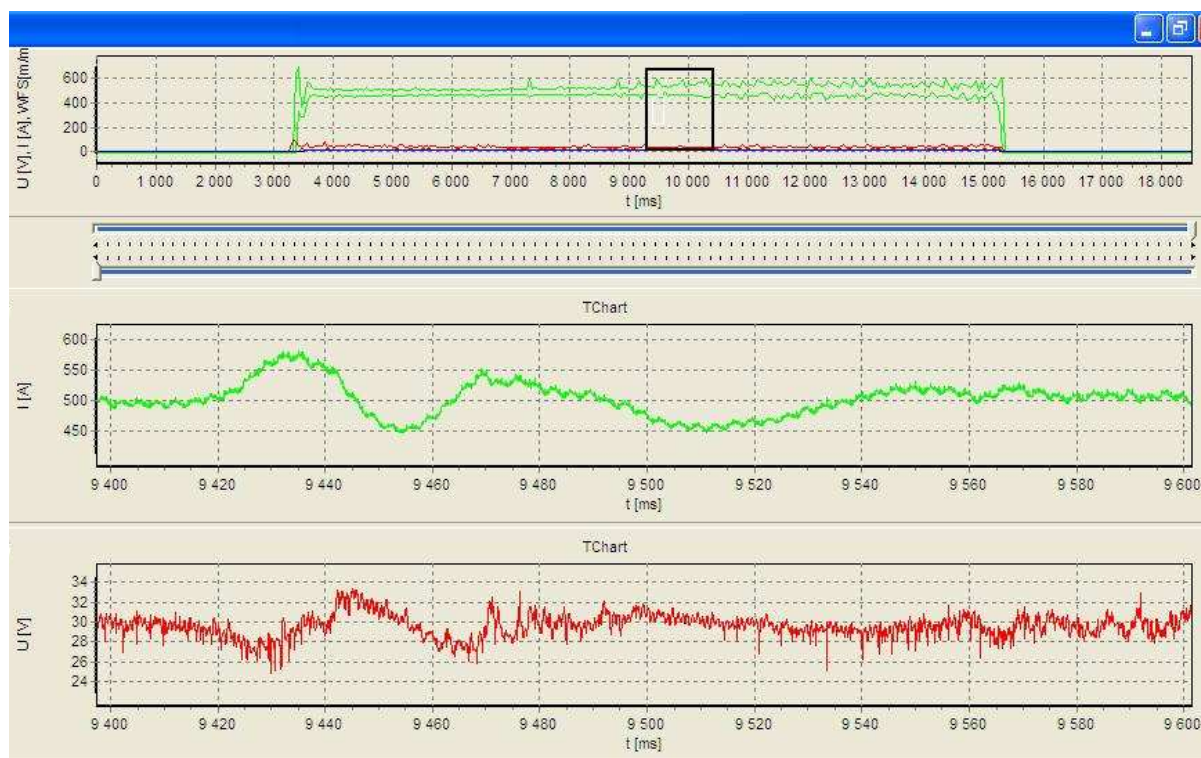
Obr. 14.8: Metalografický výbrus vzorku 85

14.6. Mechanismus vzniku dutin ve svarovém kovu při kritické rychlosti svařování

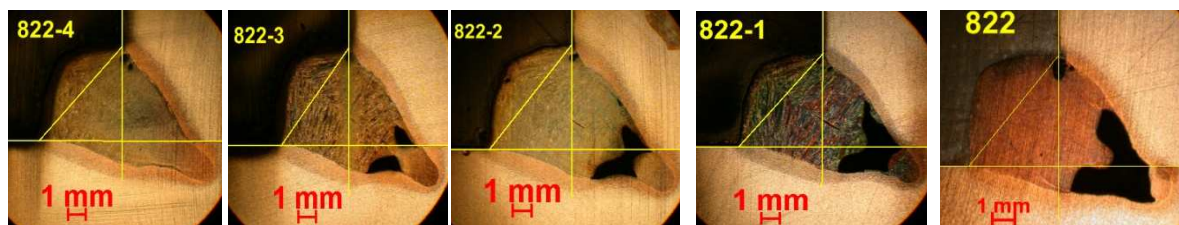
Při stanovení kritické rychlosti svařování se u vzorku 82 vyskytl jev, kdy na povrchu housenky není vizuálně zjištělná žádná vada (obrázek 14.9), ovšem při metalografickém vyhodnocení byl zjištěn výskyt nevyhovujících dutin ve svarovém spoji. Na záznamu svařovacích parametrů je patrný náběh nestability zhruba v polovině délky svařovaného vzorku. V dané oblasti byl odebrán vzorek pro metalografický výbrus. Tento výbrus byl postupně odbušován po 0,5mm. Na obr. 14.10 je znázorněn záznam průběhu časového úseku 0,2 s, což odpovídá vzdálenosti 1mm, který je přepočten z rychlosti svařování. Pod tímto obrázkem jsou snímky metalografických výbrusů odpovídající vzdálenostem 0,25mm.



Obr. 14.9: Povrch housenky svaru vzorku 82

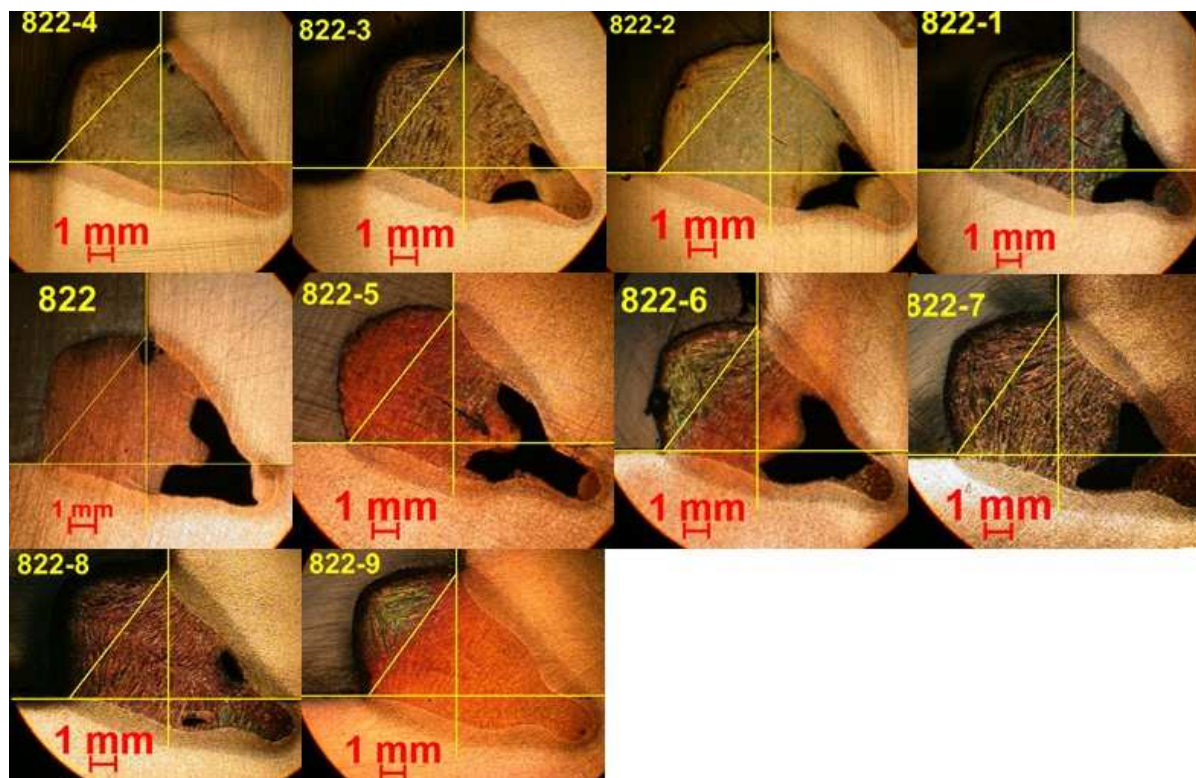


Obr. 14.10: Detailní záznam svařovacích parametrů



Obr. 14.11: Metalografické výbrusy odstupňované po 0,25mm.

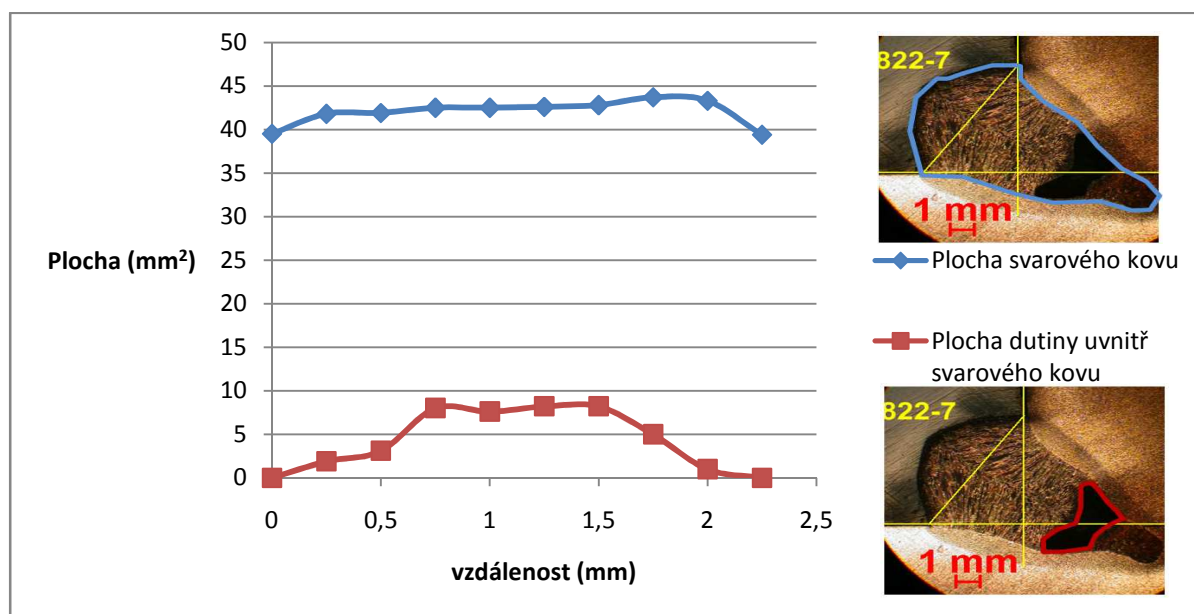
Z obr. 14.11 je patrné, že vznik dutiny postupuje v podélné ose svaru. Mechanismus vzniku dutiny ve svarovém kovu se opakuje periodicky, což dokazuje obr. 14.12.



Obr. 14.12: Metalografické výbrusy vzorku 82, odstupňované po 0,25mm.

Svarový kov bez vady znázorňuje metalografický výbrus 822-4. Počátek vzniku dutiny je patrný z metalografického výbrusu 822-3, kdy se vytváří zaškrbený můstek svarového kovu v oblasti prstového závaru. Odtržení zaškrbeného můstku je zobrazeno na výbrusu 822-2, kdy došlo k oddělení svarového kovu na dvě části a to v nosné části koutového svaru a v oblasti prstového závaru. Zároveň dochází k inicializaci trhliny za horka popsané v kapitole 14.5. Dutina se nadále rozšiřuje a zvětšuje, což dokazuje metalografický výbrus 822-1 a 822. Na metalografickém výbrusu 822-5 je velikost dutiny maximální a má charakteristický tvar písmene Y. Zmenšování dutiny a opětovné vyplňování svarového kovu potvrzují metalografické výbrusy 822-6 a 822-7. Postupné homogenní spojení v jeden svarový kov je zřejmé z metalografických výbrusů 822-8 a 822-9.

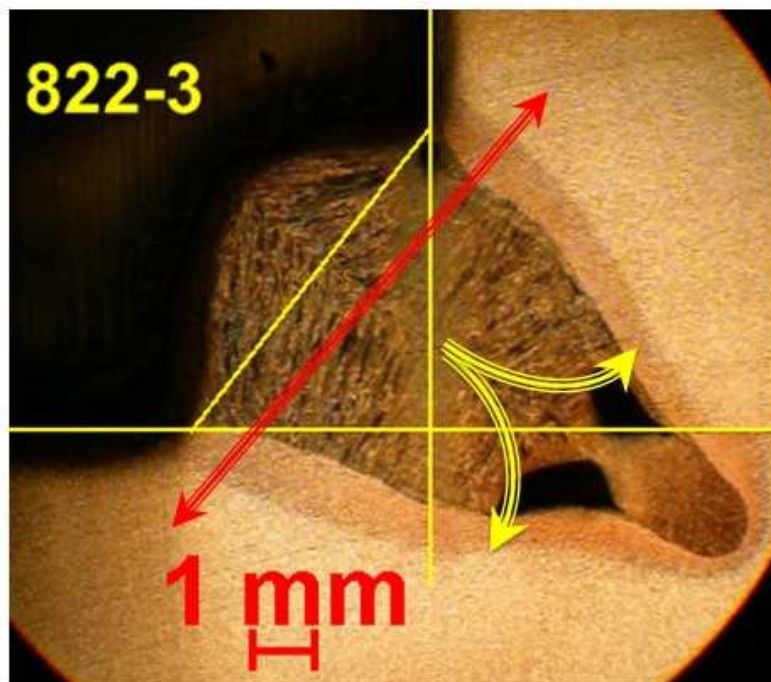
Na obr. 14.13 je znázorněna závislost plochy svarového kovu a plochy dutiny uvnitř svarového kovu. V polovině cyklu vytvoření dutiny je patrný nárůst plochy svarového kovu. Obě plochy vykazují určitou souměrnost.



Obr. 14.13: Závislost plochy svarového kovu a plochy dutiny uvnitř svarového kovu

Diskuze: k možnému vysvětlení podstaty vzniku mechanismu pro tvorbu dutiny ve svarovém kovu, lze použít hypotézu změny charakteru hydrodynamických proudů ve svarové lázni v závislosti na Marangoniho proudění. Tímto problémem se zabývali Heiple [46] a Tanaka [47]. Na povrchu svarové housenky s teplotním gradientem síly povrchového napětí vhání tok z oblasti s nízkým povrchovým napětím (teplejší oblast) do oblasti s vyšším povrchovým napětím (chladnější oblast).

Hydrodynamické působení sil na povrch svarové lázně se podstatně mění. Vytváří se intenzivní tryskové proudění, které je schopné velmi účinně přemísťovat přehřátý kov do velké hloubky. V objemu roztaveného svarového kovu se hydrodynamické proudění šíří k bočním stěnám viz žluté šipky na obr. 14.14.



Obr. 14.14: Vyznačení proudění svarového kovu a tahového napětí

Červená šipka na obr. 14.14, znázorňuje šíření velkého tahového napětí, které inicializuje trhlinu za horka. Oba tyto faktory, proudění ke stěnám svarové lázně a tahové napětí v kombinaci s vysokou rychlostí svařování, mají za následek vznik dutiny uvnitř svarového kovu. Vlivem vysoké rychlosti svařování dochází k intenzivnímu chladnutí povrchu svarové lázně, tím nastane jev hladkého povrchu svarové housenky obr. 14.9, ovšem pod povrchem se vytváří nepřípustné dutiny.

15. Vědecký přínos pro rozvoj technologických oborů a aplikace pro praktické využití

Přínos práce pro rozvoj vědy

Přínosem této disertační práce pro rozvoj vědního oboru strojírenská technologie je především rozbor podmínek stability svařovacího procesu metodou 135 s využitím monitorovacího systému WeldMonitor. Tento systém zaznamenává svařovací proces se vzorkovací frekvencí 25 000 Hz, což umožňuje velmi detailní studii jednotlivých svařovacích veličin. Dále se jedná o způsob dalšího zpracování nasnímaných dat pomocí regulačních diagramů. Dalším vědeckým přínosem je podrobné studium periodické nestability tavení a velikosti svarové lázně tzv. „Humping efektu“. Tímto jevem se zabývají zahraniční studie, tuzemská absence je velmi znatelná. Zahraniční literatura uvádí klasický „humping efekt“, ovšem v této práci je popsán i modifikovaný efekt, vyznačující se tvorbou dutin pod povrchem svarové housenky.

Přínos práce pro rozvoj vědy lze shrnout v následujících bodech:

- ✓ Detailní rozbor podmínek stability svařovacího procesu metodou 135
- ✓ Aplikace regulačních diagramů pro stanovení stability svařovacího procesu
- ✓ Podrobné studium periodické nestability svařovacího procesu, ověřené experimenty
- ✓ Popis dosud nepozorovaného efektu periodické nestability svařovacího procesu

Přínos práce pro praxi

Největším přínosem této práce pro praxi je aplikování monitorování svařovacích procesů do strojírenské výroby, jako prostředek k zajištění kvality svaru v souladu s platnými normami. Experimenty byly navrženy tak, aby byl přínos pro technickou praxi co nejefektivnější. Zvolené proměnné pro studium vlivu svařovacích parametrů tj. výška svařovací hubice a velikost svařovacího napětí jsou pro stabilitu svařovacího procesu významné. Dalším přínosem je vytvoření metodiky pro stanovení kritické svařovací rychlosti s využitím monitorování svařovacího procesu. Důležitým přínosem je i aplikace regulačních diagramů pro stanovení regulačních mezí stability svařovacího procesu a možná implementace těchto regulačních diagramů do monitorovacího systému WeldMonitor.

Přínos práce pro praxi můžeme shrnout v následujících bodech:

- ✓ Zařazení monitorování svařovacích procesů do strojírenské výroby, jako prostředek k zajištění kvality svaru.
- ✓ Studium vlivu svařovacích parametrů tj. výška svařovací hubice a velikost svařovacího napětí na stabilitu svařovacího procesu.
- ✓ Stanovení kritické svařovací rychlosti s využitím monitorování svařovacího procesu.
- ✓ Aplikace regulačních diagramů pro stanovení regulačních mezí stability svařovacího procesu.
- ✓ Možná implementace těchto regulačních diagramů do monitorovacího systému WeldMonitor.

16. Závěr

Analýza svařovacího procesu s využitím monitorovacího systému je vítaným přínosem pro zajištění kvality svarových spojů, jak svařovaných konstrukcí, tak i elementárních svařovaných dílů. Monitorování svařovacích procesů je v současnosti využíváno především pro dokumentaci nastavení a dodržení svařovacích parametrů při stanovení svařovacího postupu WPS, popřípadě při schvalování těchto postupů WPQR.

Tato disertační práce je zaměřena především na problematiku zajištění jakosti svarových spojů spojenou se studií stability svařovacího procesu. Je řešena ve dvou částech - teoretické a experimentální. Teoretická část je složena z deseti kapitol. První kapitola popisuje historii obloukových metod svařování. V kapitole 2 je popsána technologie svařování metodou 135 (MAG), zvláště pak v podkapitolách přenosy tekutého kovu při svařování v ochranných atmosférách a vlivech parametrů na geometrii svarové lázně.

Rozborem podmínek stability procesu svařování se zabývá kapitola 3. Moderní trendy obloukového svařování jsou uvedeny v kapitole 4. Kapitola 5 se věnuje nestabilitě svařovacího procesu. V kapitole 6 je popsán proces svařování v systému jakosti a v kapitole 7 principy moderních metod zabezpečování jakosti. Kapitola 8 popisuje monitorování a záznam veličin svařovacího procesu v podkapitolách potom monitorovací systém WeldMonitor. Dílčí výsledky jsou uvedeny v kapitole 9 a uzavírající kapitolou 10 teoretické části je plánování programu experimentů.

Cíle dizertační práce byly řešeny v experimentální části práce. Co se týče prvního bodu, vyhodnocení citlivosti parametrů na kvalitu svařovaného spoje, byla získána všechna potřebná data. Naměřená data, vyhodnocení a metalografické výbrusy vzorků realizovaných v této části práce jsou uvedeny v kapitole 13. V této kapitole je uvedena diskuze výsledků jednotlivých měření.

Druhý z cílů disertační práce „Stanovení kritické rychlosti svařování“ je řešen v rámci kapitoly 14, kde jsou uvedeny výsledky s následnou diskuzí všech svařovaných experimentů. Při realizaci těchto experimentů byly zaznamenány dva faktory ovlivňující kvalitu svarového spoje. První faktor byla inicializace a růst trhlin za horka popsány v podkapitole 14.5. Bylo zvoleno kritérium pro posouzení náchylnosti ke vzniku trhlin za horka. Druhým faktorem byl negativní vznik dutin ve svarovém kovu koutového svaru, který je popsán v kapitole 14.6.

Třetí cíl „Poskytnutí podkladů pro možnou implementaci další funkce monitorovacího systému WeldMonitor“ byl řešen souběžně v rámci kapitol 13 a 14. Hlavním podnětem jsou získané výsledky aplikace regulačních diagramů na záznamy svařovacích parametrů. Při

aplikaci regulačních diagramů, lze určit regulační meze, které by při implementaci do systému WeldMonitor, vymezily hranice stability svařovacího procesu a zajistit tak odpovídající kvalitu svarových spojů. Ovšem je zde nutná spolupráce a konzultace s programátory systému o možnostech implementace do systému WeldMonitor.

Tato disertační práce nepřímo navazuje na další práce, především na diplomové práce a odborné příspěvky. Využívá monitorovacího systému WeldMonitor jenž se ukázal jako vhodný nástroj k zajištění a kontrole kvality svarových spojů v souladu s platnými normami.

Doporučení pro další výzkum.

Shrnutím poznatků o monitorování svařovacích procesů a z vyhodnocených experimentů je vhodné doporučit navázání výzkumu na tuto oblast. Bylo by potřebné vyhodnotit další vlivy a faktory ovlivňující kvalitu svarových spojů. K navazujícímu výzkumu lze doporučit aplikaci záznamu akustického signálu nebo termografie pro detekci vad svarových spojů. K možné implementaci regulačních diagramů do monitorovacího systému WeldMonitor, je potřeba konzultovat poznatky z této práce s vývojovými pracovníky a programátory monitorovacího systému WeldMonitor. Zajímavé by bylo pokračovat i v počítačové simulaci. Tato oblast však bude vyžadovat samostatný výzkum.

Práce vznikla v rámci řešení výzkumného záměru MŠM 4674788501

17. Literatura použitá k řešení

- [1] Svařovací procesy. Praha: Fronius, 2005.
- [2] HUDEC, Z. *Optimalizace konstrukčních a technologických parametrů koutových svarů zhotovených metodou MAG*. Liberec: TUL FS, 2006. Disertační práce
- [3] ZVÁRANIE. VUZ Bratislava, 1996, vychází dvouměsíčně, ISSN 0044-5525
- [4] JÖNSSON, P.G., SZEKELY, J., MADIGAN, R. B., QUINN, T.P. Power Characteristics in GMAW. *Welding Journal* , 1995, vol.74, no.5, s. 30-37
- [5] J. F. LANCASTER. *The Physics of Welding*, 1986, Oxford, Pergamon Press
- [6] KIM, Y.S., EAGAR, T.W. Analysis of metal transfer in gas in GMAW, *Welding Journal*, 1993, vol. 72, no.6, : s. 169 – 178
- [7] CHOI, J.H., LEE, J.Y., YOO, C.D. Simulation of Dynamic Behavior in a GMAW System, *Welding Journal*, 2001, vol. 10, s. 239 – 245
- [8] DUTRA, J.C. Statistical Analysis of Arc Stability in GMA Welding with Short-Circuit Transfer, IIW Doc.XII-1172-90
- [9] Svařování MAG., Praha: Airliquide, 2008.
- [10] JÖNSSON, P.G., MURPHY, A.B., SZEKELY, J. The Influence of Oxygen Additions on Argon-Shielded GMAW Processes, *Welding Journal*, 1995 vol.74, s. 230 – 239
- [11] JÖNSSON, P.G., EAGAR, T.W., SZEKELY, J. Heat and Metal Transfer in GMAW Using Argon and Helium, *Metallurgical and Materials Transactions*, 1995, vol. 26B

-
- [12] Citace [online] [cit. 2010-1-17].
URL:<[https:// fs1.vsb.cz/~hla80/](https://fs1.vsb.cz/~hla80/)>
- [13] ČSN EN ISO 5817, *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) – Určování stupňů kvality* (2008)
- [14] TŮMA, J. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT, In *Sdělovací technika*, Praha, 1997
- [15] NEUMANN, H. – HRSTKA, D. Kvalita koutových svarů u vysokovýkonného svařování metodou MAG. In *Zváranie 2007*, Tatranská Lomnica, 2007, s.200-205. ISBN 978-80-89296
- [16] BY T. P. QUINN, C. SMITH, C. N. McCOWAN, E. BLACHOWIAK AND R. B. MADIGAN. Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc, *Welding Journal*, 1999, vol.9,
- [17] S.C. ABSI ALFARO , G.C. CARVALHO , F.R.DA CUNHA. A statistical approach for monitoring stochastic welding processes, *Journal of Materials Processing Technology* , 2006, s. 4–14
- [18] DRÁPELA.P. *Vliv vybraných parametrů na geometrii svarů u MAG procesu svařování*, Liberec: TUL FS, 2008, Diplomová práce
- [19] E. SODERSTROM, P. MENDEZ. Humping mechanisms present in high speed Welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, vol1,s. 579
- [20] E. O. PATON, S. L. MANDEL'BERG AND B. G. SIDORENKO. Automatic Weld. 1971
- [21] W. SHIMADA AND S. HOSHINOUCHI: Q. J. *Welding. Society*, 1982, s. 280–286

-
- [22] HUDEC, Z. - HRSTKA, D. Řešení nadměrného svařování MAG koutových svarů. In *Prvý regionálny medzinárodný IIW kongres v strednej Európe*, 2009, Stará Lesná ISBN 978-80-88734-61-1
- [23] BY T. C. NGUYEN, D. C. WECKMAN, AND D. A. JOHNSON.: The Discontinuous Weld Bead Defect in High-Speed Gas Metal Arc Welds, *Welding Journal*, 2007, vol.86
- [24] ZVÁRANIE. VUZ Bratislava, 2008, vychází dvouměsíčně, ISSN 0044-5525
- [25] KOMÍNEK, J. Provozní aspekty defektů svarových spojů provedených metodou MAG, In *XXIX. Dny svařovací techniky 2009*, Vamberk, ISBN 978-80-02-02138-4
- [26] DILTHEY. U. Key technologies welding and joining, In *Prvý regionálny medzinárodný IIW kongres v strednej Európe*, 2009, Stará Lesná 2009, ISBN 978-80-88734-61-1
- [27] BRUCKNER. J. The CMT process - news and advantages in industry, In *Prvý regionálny medzinárodný IIW kongres v strednej Európe*, 2009 Stará Lesná 2009, ISBN 978-80-88734-61-1
- [28] MENDEZ, P.F., EAGAR, T.W. Estimation of the Characteristic Properties of the Weld Pool during High Productivity Arc Welding, In *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, , London, U.K. Institute of Materials.
- [29] MENDEZ, P.F., EAGAR, T.W. Penetration and Defect Formation in High-Current Arc Welding, *Welding Journal*, 2003, vol. 82, s. 296 – 306
- [30] *Hightec Welding*, Praha, EWM, 2009

-
- [31] GRAD.L , GRUM.J, POLAJNAR.I, .MARKO.J. Feasibility study of acoustic signal for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, vol. 44, s. 555–561
- [32] MIRAPEIX.J , COBO.A, CONDE.O, .MARKO.J. Real-time arc welding defect detection technique by means of plasma spectrum optical analysis, *NDT&E International*, 2006, vol. 39, s. 356–360
- [33] VENKATRAMAN. B , MENAKA.M, VASUDEAN.M, .BALDEF.R. Thermography for Online Detection of Incomplete Penetration and Penetration Depth Estimation In *Asia-Pacific Conference on NDT*, 2006, Auckland, New Zealand
- [34] KÁLNA. K. Nové prístupy v európskych normách pre navrhovanie a výrobu zváraných ocelových konštrukcií, In *XXIX. Dny svařovací techniky 2009*, Vamberk, ISBN 978-80-02-02138-4
- [35] BRADSTREET. B. J: *Welding Journal*, 1968, vol. 47, s. 314–322
- [36] NGUYEN, D. C. WECKMAN, D. A. JOHNSON AND H. W. KERR. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, vol.10, s. 447–459
- [37] SAVAGE.W.F, *Welding journal*, 1979, vol.58, s. 212–224
- [38] ZMATLÍK, J. Shewhartovy regulační diagramy a jejich účinnost, In *Automatizace*, 2006, s. 74–76
- [39] C. SMITH, C. N. *Welding Journal*, 1999, vol. 98, s. 135
- [40] HUDEC, Z. *Optimalizace konstrukčních a technologických parametrů koutových svarů zhotovených metodou MAG*. Liberec: TUL FS, 2006. Disertační práce
- [41] PHADKE, M.S. Quality Engineering using Robust Design. In *ATaT Laboratories*, 1989, Prentice Hall

-
- [42] BELAVENDRAM, N. Quality by Design, In *Prentice Hall International*, 1995.
- [43] BALDEF.R . *Welding Journal*, 2000, vol. 12, s. 123
- [44] WOLF, M. ,SCHOBBER, H.,BOLLINGHAUS, T. Influence of the Weld Pool Geometry on Solidification Crack Formation, In *Hot Cracking Phenomena in Welds*, 2005, Berlin, s. 249-256
- [45] ČSN ISO 7873, *Regulační diagramy pro aritmetický průměr s výstražnými mezemi* (1995)
- [46] HEIPLE, C.R. ,ROPER, J.R,STAGNER,R.T,ADEN,R.J. Surface aktive element effects on the shape of GTA, laser and elektron beam welds, *Welding Journal*, 1983, vol. 62, s.72-77.
- [47] TANAKA, M. ,SHIMIZU, T.,TERASAKI, H. Effects of activating flux on arc phenomena in GTAW, *Science and Technology of welding and Joining*, 2005, s. 397- 402



Příloha č. 1

Lineární pojezdová dráha, monitorovací systém WeldMonitor

-uživatelská příručka

1. Monitorovací zařízení a hardware

1.1 Lineární pojzdová dráha

Modul pohaněný elektromotorem s nastavitelnou kontinuální rychlostí s rozsahem dráhy pojezdu 600mm. Nastavení rychlosti pojezdu je v rozmezí 0-2,5m/min. Na lineární dráze je nastaven magnetický koncový snímač na každé straně z důvodu bezpečnosti nevyjetí modulu z dráhy.

1.2 Komunikační moduly a snímače



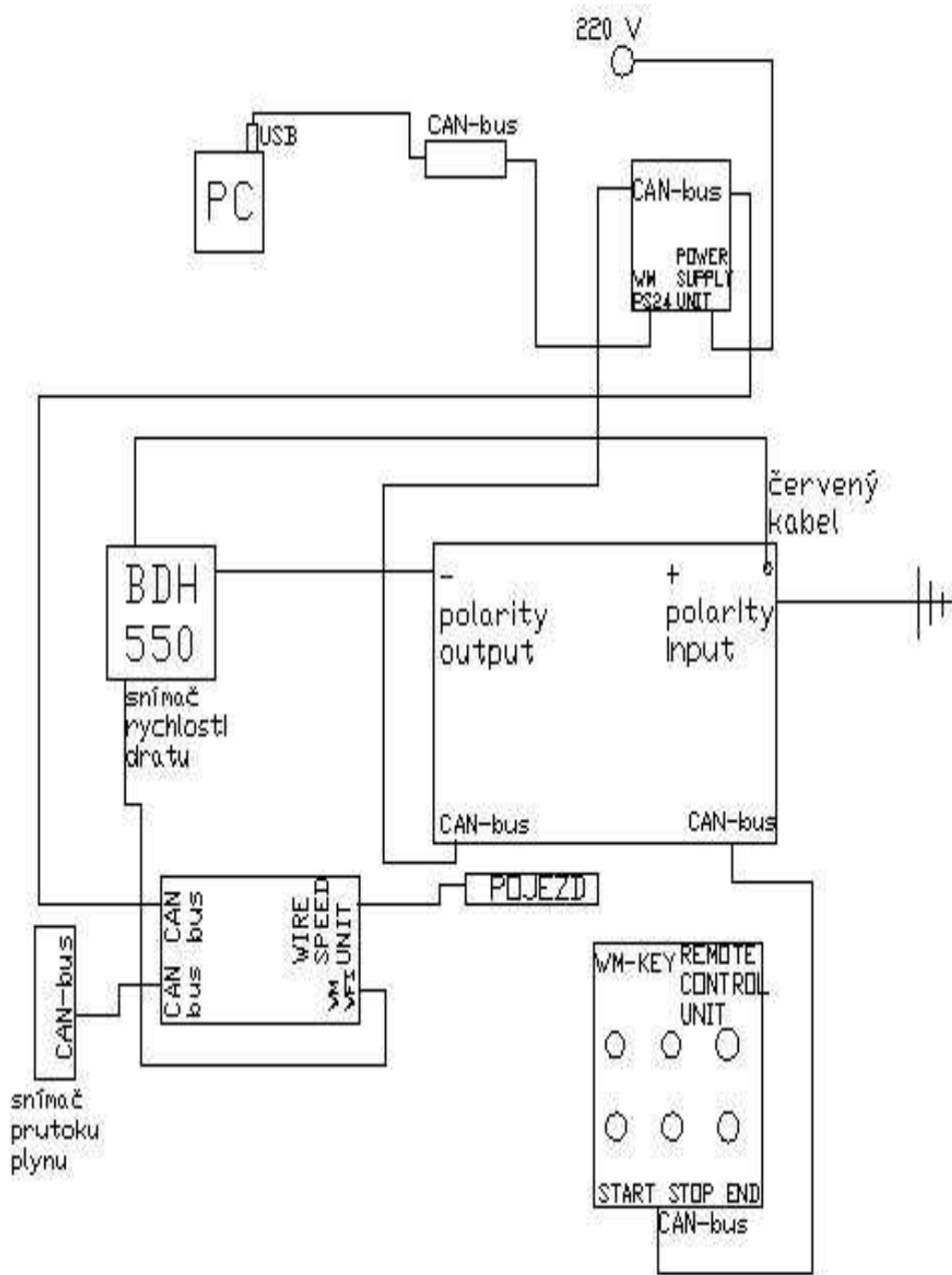
Obr. 1.: Komunikační moduly s PC



Obr. 2.: Snímač posuvu drátu, snímač proudu a napětí, snímač průtoku plynu

1.3 Zapojení komunikačních modulů a snímačů

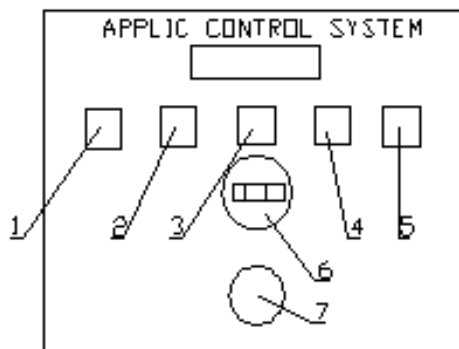
Na obr. 3 je zobrazeno schéma zapojení a propojení jednotlivých modulů a snímačů monitorovacího zařízení WeldMonitor.



Obr. 3.: Schéma zapojení a propojení jednotlivých modulů a snímačů

1.4 Nastavení rychlosti pojezdu lineární dráhy

Na ovládací bloku APPLICONTROL SYSTÉM, který je součástí lineární pojezdové dráhy jsou umístěny ovládací prvky obr. 4, změna parametrů se provádí pomocí stisknutého tlačítka ENTER a dvou sousedních prvků, přepínáním různých funkcí.



Obr. 4: Ovládací blok lineární pojezdové dráhy

Nastavitelné funkce ovládacího bloku:

1- rozjezd do zapálení oblouku

- stehování (ano-ne)
- doba stehování
- doba stehu
- doba přejetí

2- automatická reverzace

3- ENTER-potvrzení operace, přepínání

4- STOP-při zmáčknutí během pohybu modulu se zastaví v dané vzdálenosti, pokračuje opět z tohoto místa po zmáčknutí tlačítka START

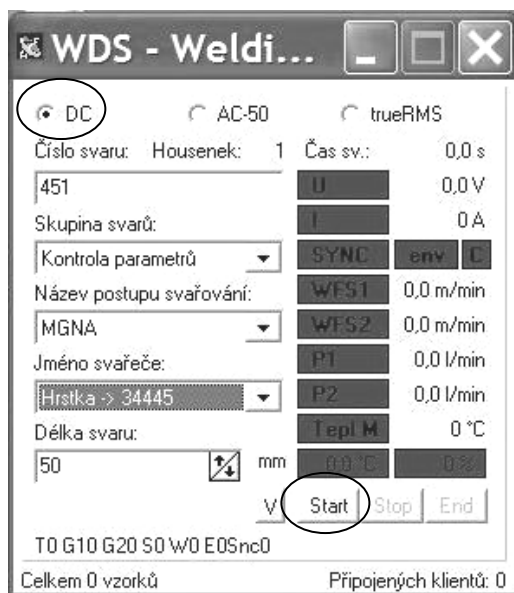
5- START-pohyb modulu

6- nastavení rychlosti

7- vypnutí-zapnutí pojezdu

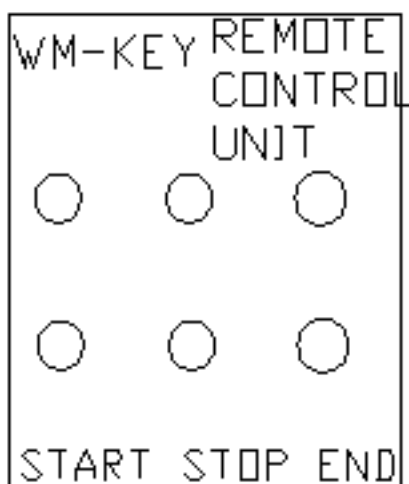
1.5 Monitorování procesu

Před samotným monitorováním se musí spustit soubor **WDS. exe**, který je umístěn v následující cestě: **C:\Program Files\WeldMonitor**, a nastavit následující parametry:



- 1) Potvrdit ikonu DC, AC-50, true RMS
- 2) Zadat číslo svaru
- 3) Skupina svaru- kontrola parametrů
- 4) Jméno svařeče
- 5) Aktivovat pomocí tlačítka Start

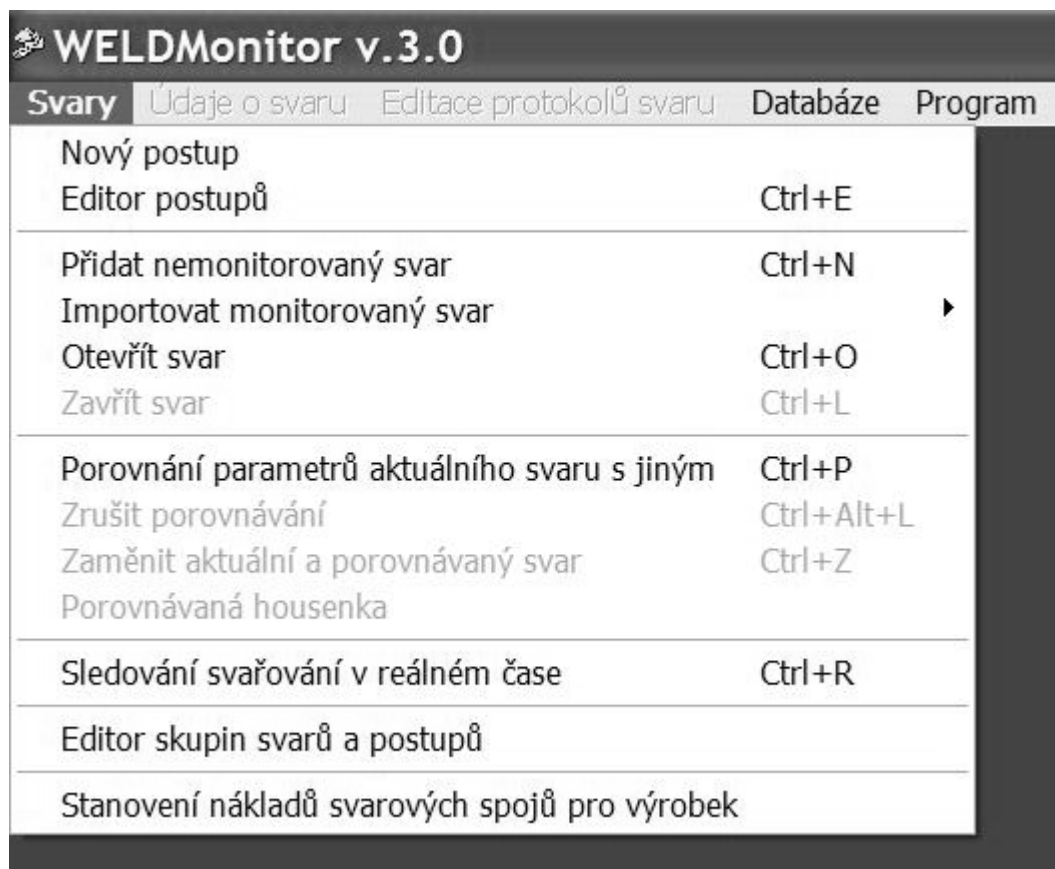
Pro spuštění záznamu svařovacích parametrů je nutné stlačit tlačítko START na ovládacím panelu a po skončení svařování stlačit tlačítko STOP pro ukončení záznamu a tlačítko END pro export dat obr. 5.



Obr. 5.: Ovládací panel monitorovacího zařízení

2. WeldMonitor v.3.5

2.1 Nabídka svary



Obr. 6. : Nabídka okna- Svary

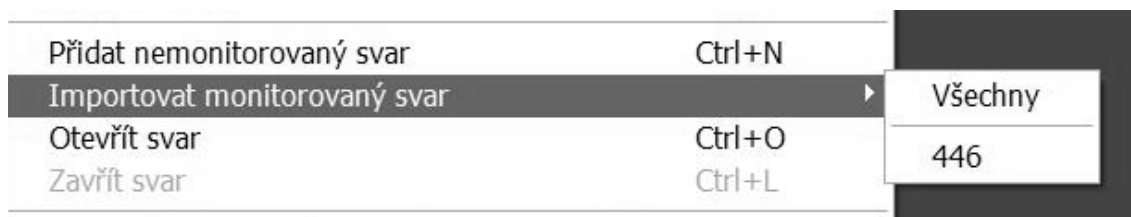
Nabídka Svary obsahuje následující položky:

Nový postup – nabídka je přípustná, pouze pokud není otevřen žádný svar, použijte ji pro přidání nového postupu

Editor postupů – nabídka je přípustná, pouze pokud není otevřen žádný svar, použijte ji pro přidání nového postupu nebo pro úpravu existujícího

Přidat nemonitorovaný svar – slouží pro doplňování svarů do databáze programu bez použití monitorovacího zařízení

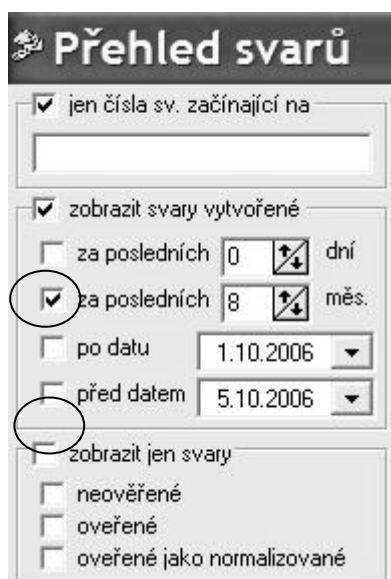
Importovat monitorovaný svar – slouží pro doplňování svarů do databáze programu pomocí monitorovacího zařízení



Obr. 7.: Import namonitorovaného svaru

Po otevření nabídky importovat monitorovaný svar zvolíme číslo nemonitorovaného svaru. Například svar číslo 446 obr. 7.

Otevřít svar – slouží pro otevření nemonitorovaného svaru. Po otevření této nabídky je důležité označit položky podle obrázku 8.



Obr. 8.: Nabídka otevření svaru podle zadaných parametrů

Poté se zobrazí všechny svary, které se nacházejí v databázi obr. 9. Označíme namonitorovaný svar, který budeme vyhodnocovat a dvojklikem otevřeme.



Přehled svarů Počet záznamů: 71 ☒ čísla sv. ☐ postupu sv. ☐ data svař. ☐ počtu hous. ☐ jména sv.									
Číslo svaru	Poč.hous.	Skupina svarů	Postup svařování	Datum	Čas zač.	Jméno svařeče	I	Čas konce	Datum
051121U56	1	Kontrola parametrů	MGNA	11.4.2006	10:35:52	N/A	0	10:36:04	11.4.2006
051121U57	1	Kontrola parametrů	MGNA	11.4.2006	10:47:09	N/A	0	10:47:21	11.4.2006
051121U58	1	Kontrola parametrů	MGNA	11.4.2006	10:58:15	N/A	0	10:58:29	11.4.2006
051121U59	1	Kontrola parametrů	MGNA	11.4.2006	11:15:35	N/A	0	11:15:51	11.4.2006
051121U60	1	Kontrola parametrů	MGNA	11.4.2006	11:21:07	N/A	0	11:21:22	11.4.2006
051121U61	1	Kontrola parametrů	MGNA	11.4.2006	11:26:02	N/A	0	11:26:21	11.4.2006
427	1	Kontrola parametrů	MGNA	25.4.2006	10:58:25	N/A	0	10:58:39	25.4.2006
428	1	Kontrola parametrů	MGNA	25.4.2006	11:09:15	N/A	0	11:09:33	25.4.2006
429	1	Kontrola parametrů	MGNA	25.4.2006	11:16:28	N/A	0	11:16:52	25.4.2006
430	1	Kontrola parametrů	MGNA	25.4.2006	11:22:38	N/A	0	11:23:00	25.4.2006

Obr. 9.: Databáze namonitorovaných svarů

Zavřít svar – nabídka je přípustná, pouze je-li otevřen nějaký svar, příkaz uzavře otevřený svar, povolí se nabídka Nový postup a Editor postupů

Porovnání aktuálního svaru s jiným – nabídka je přípustná, pouze je-li otevřen nějaký svar, použijte pro porovnání svařovacích parametrů dvou různých svarů viz.

Údaje o svaru - Grafy průběhu měřených veličin

Údaje o svaru - Graf odchylky pracovního bodu

Zrušit porovnávání – nabídka je přípustná, pouze pokud je zadán porovnávaný svar, tento příkaz porovnávaný svar uzavře

Zaměnit aktuální a porovnávaný svar – nabídka je přípustná, jsou-li otevřené oba svary, vyvoláním příkazu se např. změní omezení pracovního pole grafu odchylky pracovního bodu

Porovnávaná housenka – umožňuje porovnávat různé housenky stejného nebo odlišných svarů

Sledování pracovišť v reálném čase – použijte pro vzdálenou kontrolu monitorovaných pracovišť

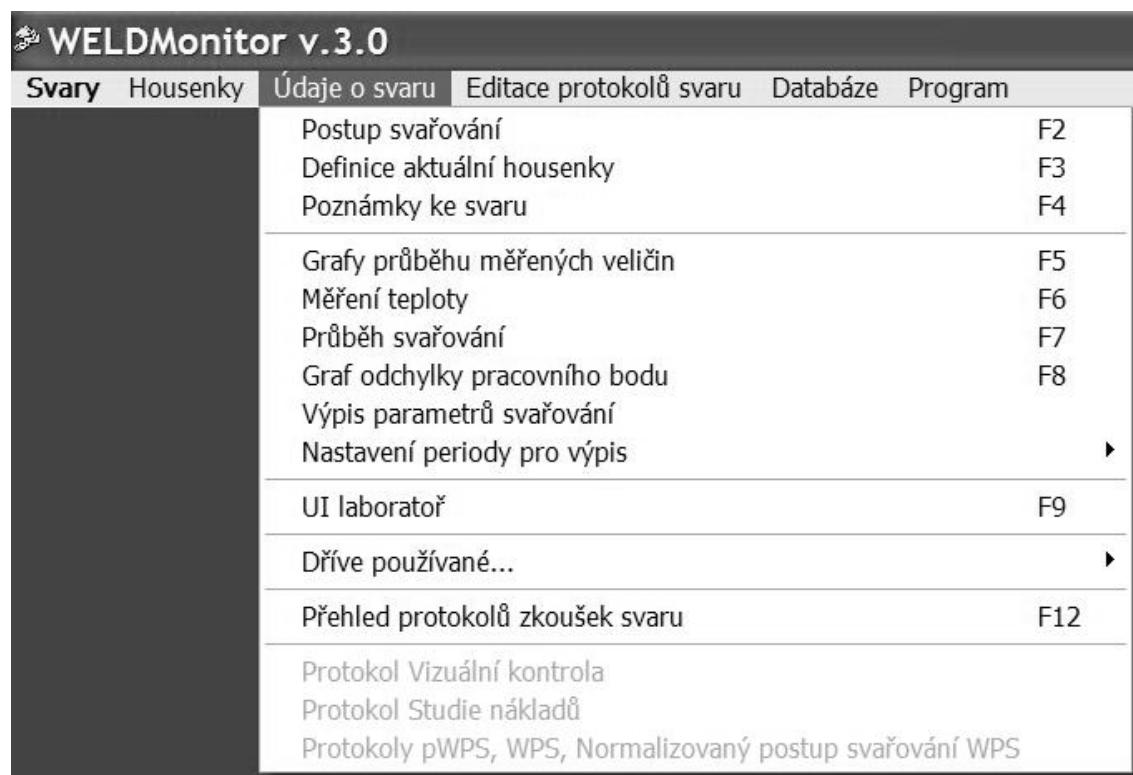
Editor skupin svarů/postupů – použijte pro přidání nové skupiny, nebo úpravu poznámek některé skupiny

Stanovení nákladů svarových spojů pro výrobek (za přítomnosti modulu Studie nákladů) – obsahuje výpočet a protokol nákladů pro výrobek

2.1 Nabídka housenky

Nabídka Housenky svaru je přístupná, je-li otevřen nějaký monitorovaný svar. Obsahuje položky pro sekvenční procházení housenek otevřeného svaru a položky pro přechod na jednotlivé housenky svaru při vícevrstvě svařování. Maximální počet housenek je 60. Změnou housenky se zobrazované měřené hodnoty budou týkat zvolené housenky. Aktuální svar a číslo housenky se zobrazuje ve spodní části hlavního okna.

2.3 Nabídka Údaje o svaru



Obr. 10. : Nabídka okna- Údaje o svaru

Nabídka Údaje o svaru je přístupná, je-li otevřen nějaký svar, obsahuje tyto položky:



Postup svařování – zobrazí přiřazený postup svařování, editace postupu není povolena

Definice aktuální housenky – zobrazí část postupu – definici housenky, která je právě otevřená (viz. Nabídka Housenky svaru), editace není povolena, tato položka je viditelná jen pro monitorované svary

Grafy průběhu měřených veličin – zobrazí grafy s měřenými veličinami s možností tisku, tato položka je viditelná jen pro monitorované svary. Je přístupná, pokud je otevřený nějaký monitorovaný svar. Po vyvolání tohoto příkazu se zobrazí okno s grafy některých měřených veličin. Při pohybu kurzoru nad grafy se přes ně zobrazuje vertikální čára, která označuje časový okamžik, pro který se v pravé části okna zobrazují svařovací parametry. Pozice posuvníků odpovídá času svařování od začátku do jeho konce. Nejprve se zobrazí náhled odkud můžeme grafy vytisknout.

Měření teploty – zobrazí graf měření teploty základního materiálu s možností tisku, tato položka je viditelná jen pro monitorované svary

Graf odchylky pracovního bodu – nabídka je přípustná pouze pro metody MIG/MAG a příbuzné metody, vyvoláním příkazu se zobrazí graf odchylky pracovního bodu a limitu pracovního pole, graf je možné vytisknout, tato položka je viditelná jen pro monitorované svary

Průběh svařování - nabídka je přípustná pouze pro metody MIG/MAG a příbuzné metody, vyvoláním příkazu se zobrazí simulace svařování s pracovním polem a parametry svařování, tato položka je viditelná jen pro monitorované svary.

Výpis parametrů svařování – zobrazí náhled výpisu měřených a vypočítaných veličin s možností tisku, tato položka je viditelná jen pro monitorované svary. Náhled nám dává jasnou představu o výstupním protokolu ještě před tiskem. K dispozici jsou tlačítka pro

- Otevření (Open), uložení (Save) a tisk protokolu (Print)
- procházení jednotlivými stránkami
- změnu měřítka náhledu (Zoom in, Zoom out, Zoom to fit page width, Zoom to fit page)

-ukončení náhledu (Exit)

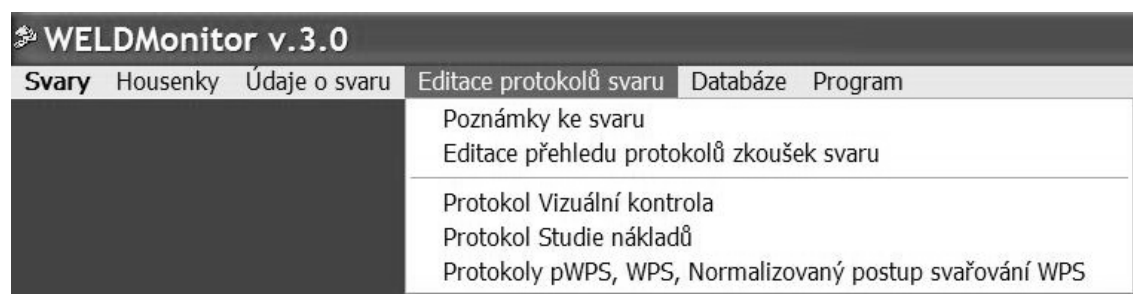
Uložení souboru je možné jako dokument pdf. nebo txt. ze kterého můžeme hodnoty dále používat i do jiných programů, např. Microsoft Excel.

Nastavení periody pro výpis – umožňuje změnit výchozí časový interval (0,5 s) pro výpis parametrů svařování viz. předchozí položka, tato položka je viditelná jen pro monitorované svary.

U-I Laboratoř- Zobrazí se graficky zobrazený průběh svařovacího napětí a proudu.

Kliknutím na první graf kde je zobrazen průběh napětí, proudu, a wfs vybereme kurzorem oblast, kterou chceme zvětšit. Pod tímto grafem se zobrazí graf průběhu proudu, napětí a poslední graf lze vybrat z nabídky uvedené vlevo v panelech, po kliknutí na dané pole se graf mění podle vybrané veličiny. Například elektrický proud, elektrické napětí, elektrický odpor, derivace odporu, výkon, svařovací rychlost, rychlost pojezdu, plyn, histogramy těchto veličin.

2.4 Nabídka Editace protokolů svaru



Obr. 11. : Nabídka okna- Editace protokolů svaru

Nabídka Editace protokolů je přístupná, je-li otevřen nějaký svar, obsahuje položky patřící k jednotlivým protokolům. Protokoly lze editovat jen pro neověřené svary (viz. Údaje o svaru – Přehled protokolů zkoušek). Vyvoláním některého příkazu se zobrazí okno pro editaci daného protokolu. Pokud protokol ještě nebyl k danému svaru vyplněn, je vyplněn automaticky známými údaji.

Bližší popis jednotlivých formulářů:

Vizuální kontrola:

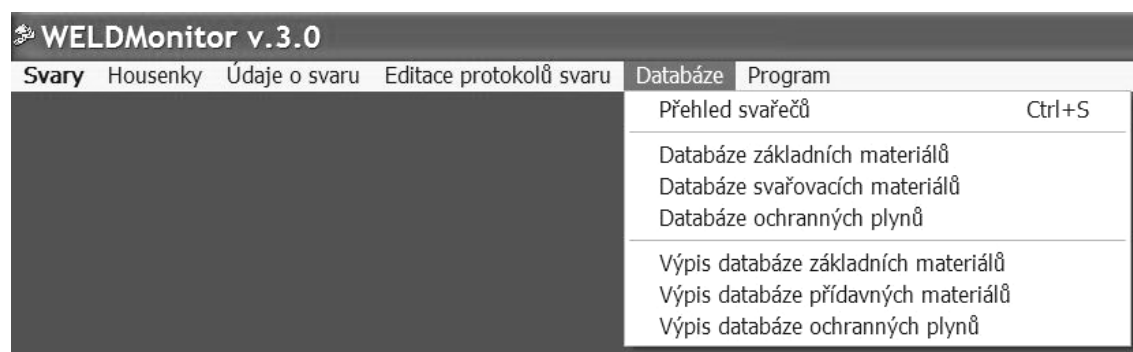
Je základní nedestruktivní zkouška. Program obsahuje protokol o vizuální kontrole s usnadňujícími funkcemi pro jeho vyplnění. V nabídce Údaje o svaru je příkaz Vizuální kontrola pro zobrazení protokolu pro tisk, v nabídce Editace protokolů i pro jeho vytvoření/úpravy.

Okno formuláře se skládá ze tří záložek. První obsahuje informace o svaru, některé naměřené parametry svaru (b, s, a), použité pomůcky a informace o provádění kontroly. Další dvě záložky obsahují nejčastější a 5 volitelných vad svarů z hlediska vizuální kontroly, doplňuje se poloha vady, zjištěná velikost vady (rozsah) a hodnocení. Pro některé vady, kde je mezní přípustná hodnota dána výrazem (např. $h \leq 0,05t \text{ max. } 0,5$), program automaticky spočítá tuto mezní hodnotu a zobrazí ji k porovnání s naměřenou velikostí vady. Ve spodní části okna je celkové hodnocení vizuální kontroly a tlačítka pro tisk, uložení/zrušení změn a smazání celého protokolu daného svaru

Protokoly pWPS, WPS a Normalizovaný postup svařování WPS:

Je možné doplnit další protokoly (např. WPAR pro zkušební organizace, protokoly vypracované na základě jiných norem, v jiných jazycích apod.).

2.5 Nabídka Databáze



Obr. 12. : Nabídka okna- Databáze

Nabídka Databáze obsahuje následující položky:



Přehled svářečů – slouží k udržování informací o svářečích a jejich zkouškách, obsahuje i funkce pro kontrolu platnosti zkoušek a pokročilé možnosti vyhledávání, další možností je evidence zařízení a jejich přezkoušení.

Databáze základních materiálů – zobrazí přehled základních materiálů přístupných v programu s možností jejich doplnění a změn

Databáze svařovacích materiálů – zobrazí přehled svařovacích materiálů přístupných v programu s možností jejich doplnění a změn

Databáze ochranných plynů – zobrazí přehled základních materiálů přístupných v programu

Tisk obsahu databází – obsahuje 3 položky pro tisk databáze základních, svařovacích materiálů a ochranných plynů, po zvolení některého z příkazů se zobrazí náhled odkud můžete přehled vytisknout.

2.5 Nabídka Program

Nabídka Program obsahuje následující položky:

Použití vlastního loga v protokolech – používané logo pro program je obrázek logo. bmp v adresáři programu, záloha minulého stavu je v souboru logox. bmp; po zvolení nabídky se zobrazí editor obsahující příkazy:

Zobrazit akt. obrázek – zobrazí obrázek aktuálně používaný jako logo v protokolech

Nahrát jiný obrázek – po zadání jména souboru zobrazí zvolený obrázek loga

Použít obrázek jako logo – zobrazený obrázek rozměrově přizpůsobí a použije jako logo v protokolech

Použít standardní logo – zruší aktuálně používané logo



Zálohování databáze – z důvodu možné havárie počítače s databázemi je důležité data pravidelně zálohovat, po vyvolání tohoto příkazu se objeví dialogové okno pro zadání adresáře pro zálohu dat. Po zvolení tohoto adresáře se do podadresáře označující datum a čas zálohuje databáze programu, po potvrzení i měřené hodnoty všech svarů

Ukázky měření monitorovacího systému – obsahuje ukázky průběhu proudu a napětí při různých svařovacích procesech

Informace o programu a modulech – seznam zavedených modulů

Vyvolání nápovědy – vyvolá soubor nápovědy na úvodní stránce

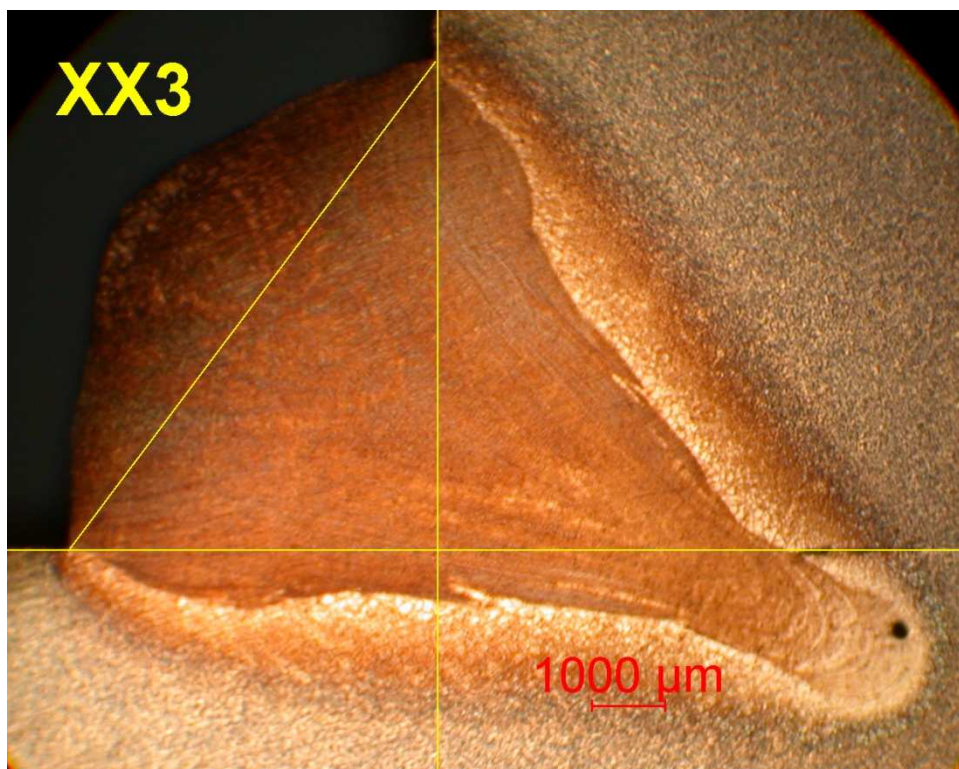
Informace – vyvolá soubor nápovědy s informacemi poskytovanými programem

Ukončit program – po potvrzení ukončí program



Příloha č. 2

Metalografické výbrusy vzorků svařovaných v extrémních případech

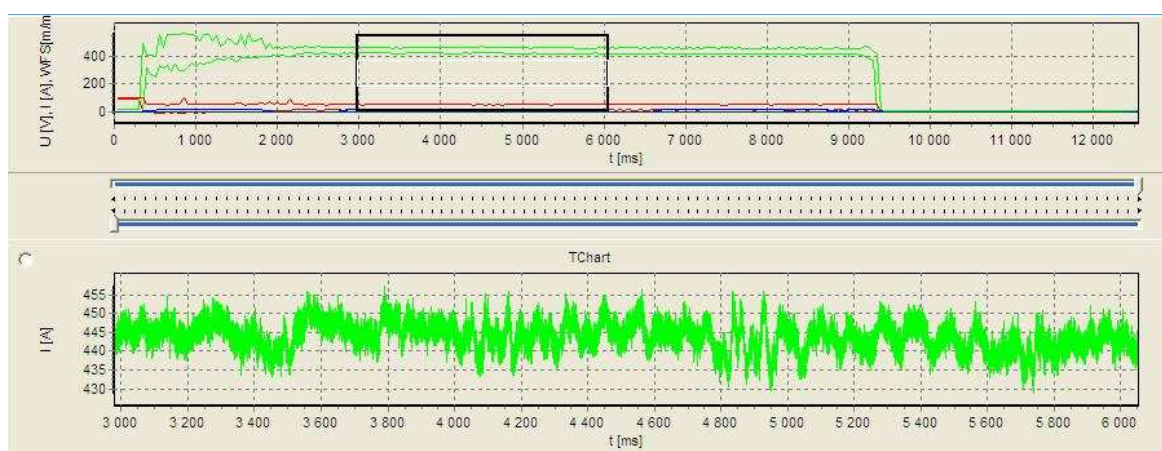


Obr. 13: Metalografický výbrus vzorku XX3

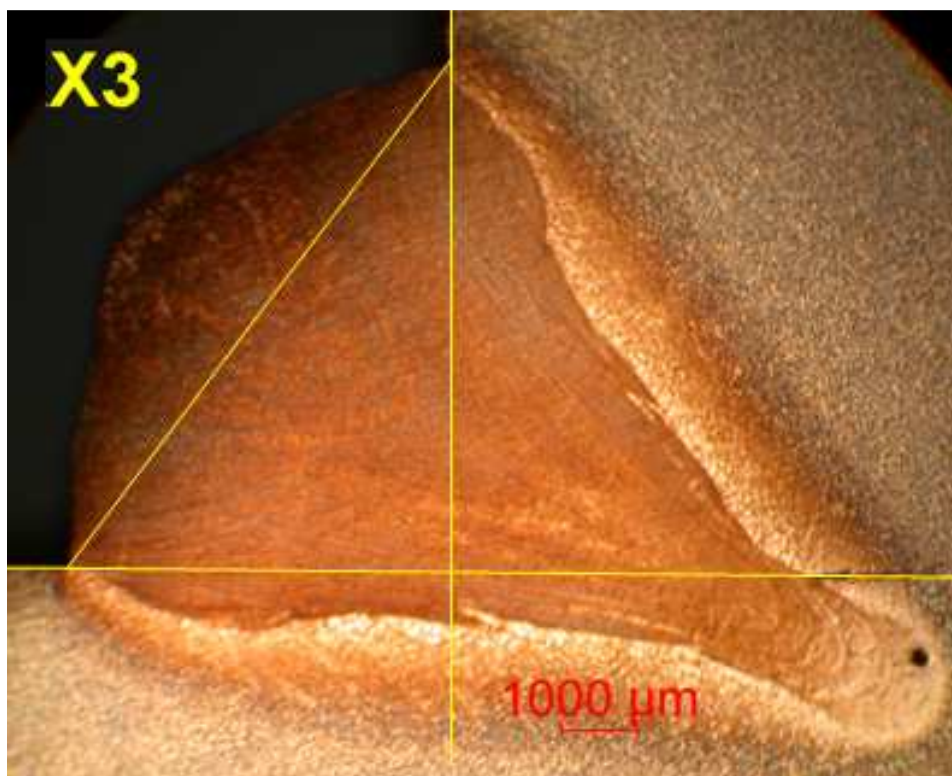
V tabulce 1 jsou uvedeny naměřené svařovací parametry, kdy hodnoty svařovacího proudu se blíží k maximu výkonu zdroje.

Tab. 1. Naměřené hodnoty svařovacích parametrů

vzorek	v_d (m/min ⁻¹)	v_s (m/min ⁻¹)	I (A)	U (V)
XX3	16,0	0,75	442	29,5



Obr. 14: Průběh svařovacího proudu u vzorku XX3

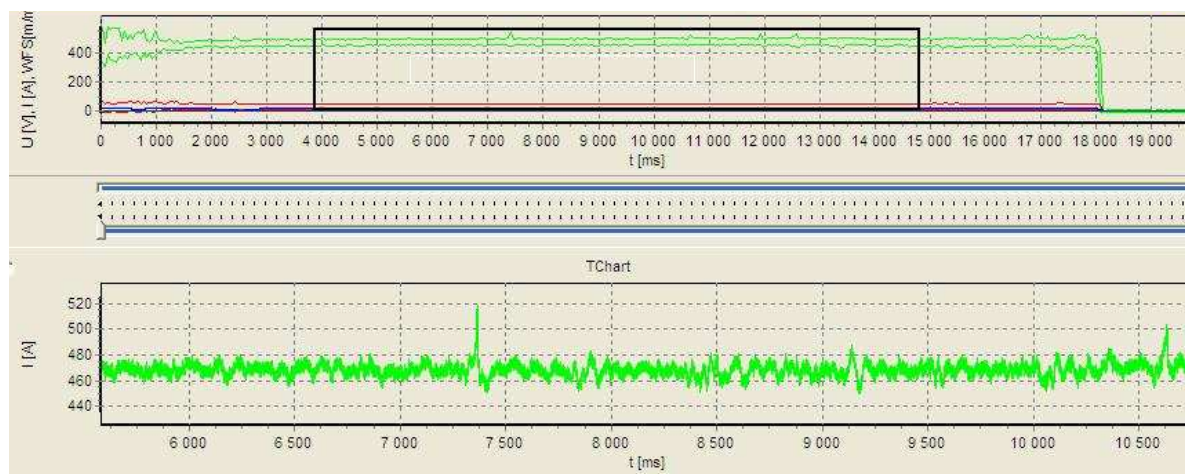


Obr. 15: Metalografický výbrus vzorku X3

V tabulce 2 jsou uvedeny naměřené svařovací parametry, kdy hodnota svařovacího proudu dosáhla hodnoty 467 A.

Tab. 2. Naměřené hodnoty svařovacích parametrů

vzorek	v_d (m/min ⁻¹)	v_s (m/min ⁻¹)	I (A)	U (V)
XX3	17,0	0,80	467	30

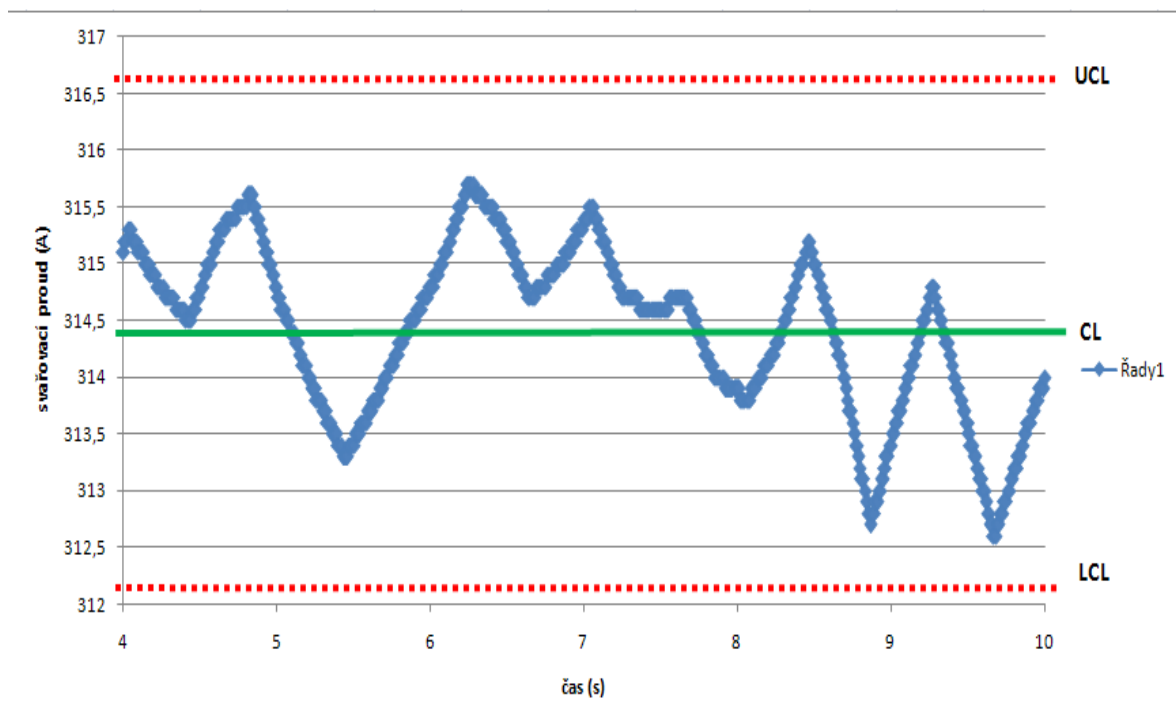


Obr. 16: Průběh svařovacího proudu u vzorku XX3

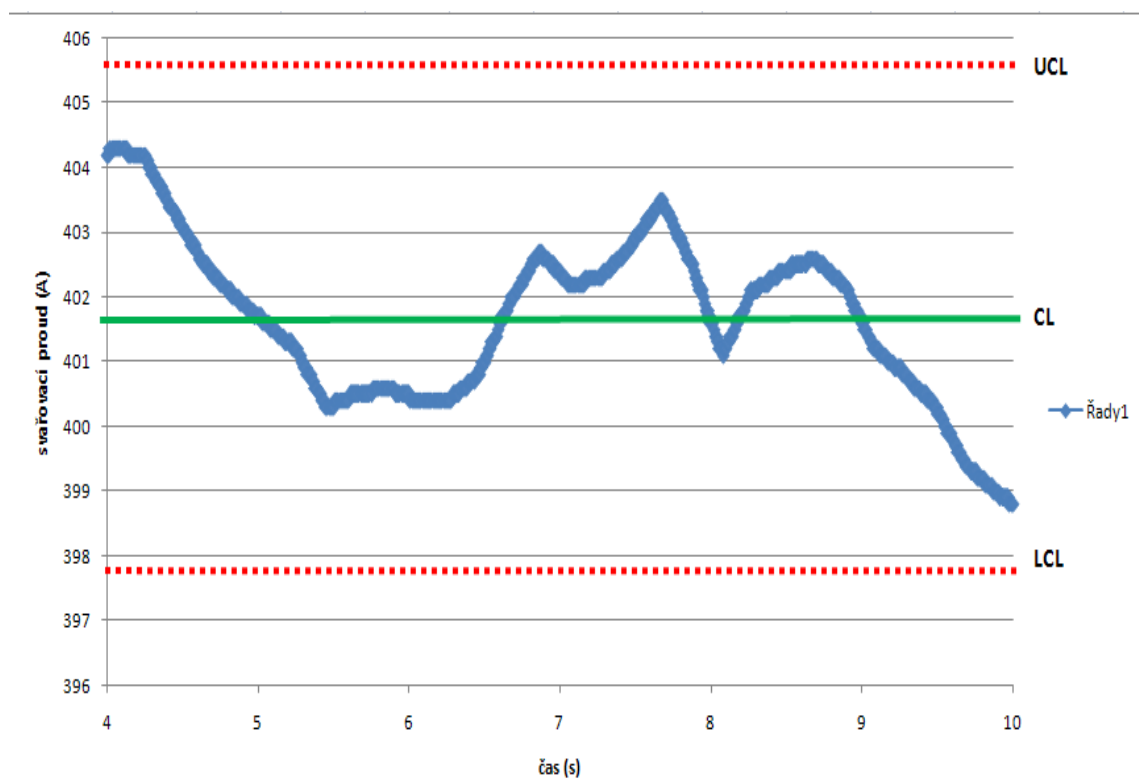


Příloha č. 3

Regulační diagramy vzorků při stanovení kritické rychlosti svařování



Obr. 17: Regulační diagram vzorku 42A



Obr. 18: Regulační diagram vzorku 62A



Obr. 19: Regulační diagram vzorku 81



Příloha č. 4

Součinitele pro výpočet přímek regulačních diagramů

Rozsah podskupiny n	Součinitele pro regulární more										Součinitele pro centrální příčku						
	A	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	C ₁	1/C ₁	d ₁	1/d ₁
2	2,121	1,886	2,659	0,000	3,267	0,000	2,606	0,000	2,606	0,000	3,686	0,000	3,267	0,797 9	1,253 3	1,128	0,886 5
3	1,732	1,021	1,954	0,000	2,558	0,000	2,276	0,000	2,276	0,000	4,358	0,000	2,574	0,886 2	1,128 4	1,093	0,907 7
4	1,500	0,726	1,628	0,000	2,266	0,000	2,088	0,000	2,088	0,000	4,698	0,000	2,282	0,921 3	1,085 4	2,059	0,485 7
5	1,342	0,577	1,437	0,000	2,089	0,000	1,964	0,000	1,964	0,000	4,918	0,000	2,114	0,940 0	1,063 8	2,336	0,429 9
6	1,225	0,482	1,287	0,030	1,970	0,029	1,874	0,000	1,874	0,000	5,078	0,000	2,004	0,951 5	1,051 0	2,534	0,394 6
7	1,134	0,415	1,182	0,118	1,882	0,113	1,806	0,204	1,806	0,204	5,204	0,076	1,924	0,959 4	1,042 3	2,704	0,369 8
8	1,061	0,372	1,099	0,185	1,815	0,179	1,751	0,388	1,751	0,388	5,306	0,136	1,864	0,965 0	1,036 3	2,847	0,351 2
9	1,000	0,337	1,032	0,239	1,761	0,232	1,707	0,547	1,707	0,547	5,393	0,184	1,816	0,969 3	1,031 7	2,970	0,336 7
10	0,949	0,306	0,975	0,284	1,716	0,276	1,669	0,687	1,669	0,687	5,469	0,223	1,777	0,972 7	1,028 1	3,078	0,324 9
11	0,905	0,285	0,927	0,321	1,679	0,313	1,637	0,811	1,637	0,811	5,535	0,256	1,744	0,975 4	1,025 2	3,173	0,315 2
12	0,866	0,266	0,886	0,354	1,646	0,346	1,610	0,922	1,610	0,922	5,594	0,283	1,717	0,977 6	1,022 9	3,258	0,306 9
13	0,832	0,246	0,850	0,382	1,618	0,374	1,585	1,025	1,585	1,025	5,647	0,307	1,693	0,979 4	1,021 0	3,336	0,299 8
14	0,802	0,230	0,817	0,406	1,594	0,399	1,563	1,118	1,563	1,118	5,696	0,328	1,672	0,981 0	1,019 4	3,407	0,293 5
15	0,775	0,223	0,789	0,428	1,572	0,421	1,544	1,203	1,544	1,203	5,741	0,347	1,653	0,982 3	1,018 0	3,472	0,288 0
16	0,750	0,212	0,763	0,448	1,552	0,440	1,526	1,282	1,526	1,282	5,782	0,363	1,637	0,983 5	1,016 8	3,532	0,283 1
17	0,728	0,203	0,739	0,466	1,534	0,458	1,511	1,356	1,511	1,356	5,820	0,378	1,622	0,984 5	1,015 7	3,588	0,278 7
18	0,707	0,194	0,718	0,482	1,518	0,475	1,496	1,424	1,496	1,424	5,856	0,391	1,608	0,985 4	1,014 8	3,640	0,274 7
19	0,688	0,187	0,698	0,497	1,503	0,490	1,483	1,487	1,483	1,487	5,891	0,403	1,597	0,986 2	1,014 0	3,689	0,271 1
20	0,671	0,180	0,680	0,510	1,490	0,504	1,470	1,549	1,470	1,549	5,921	0,415	1,585	0,986 9	1,013 3	3,735	0,267 7
21	0,655	0,173	0,663	0,523	1,477	0,516	1,459	1,605	1,459	1,605	5,951	0,425	1,575	0,987 6	1,012 6	3,778	0,264 7
22	0,640	0,167	0,647	0,534	1,466	0,528	1,448	1,659	1,448	1,659	5,979	0,434	1,566	0,988 2	1,011 9	3,819	0,261 8
23	0,626	0,162	0,633	0,545	1,455	0,539	1,438	1,710	1,438	1,710	6,006	0,443	1,557	0,988 7	1,011 4	3,858	0,259 2
24	0,612	0,157	0,619	0,555	1,445	0,549	1,429	1,759	1,429	1,759	6,031	0,451	1,548	0,989 2	1,010 9	3,895	0,256 7
25	0,600	0,153	0,606	0,565	1,435	0,559	1,420	1,806	1,420	1,806	6,056	0,459	1,541	0,989 6	1,010 5	3,931	0,254 4

Pramen: ASTM, Philadelphia, PA, USA.

Pramen: ASTM, Philadelphia, PA, USA.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé doktorské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se svým školitelem disertační práce.

Datum:

Podpis:



Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Arc No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the dissertation.

Date:

Signature: