

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

Katedra materiálu a strojírenské technologie



**Vliv navařovacích parametrů na geometrii
návarové housenky**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.**

Autor diplomové práce: **Bc. Rusul Abdul Hamidová**

PRAHA 2011

Vysoká škola: Česká zemědělská univerzita v Praze	Fakulta: technická
Katedra: materiálu a strojírenské technologie	Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant: Bc. Abdul Amidová Rusul

Studijní obor: Obchod a podnikání s technikou

Název práce: Vliv navařovacích parametrů na geometrii návarové housenky

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Určení vlivu navařovacích podmínek – navařovacího napětí, posuvu drátu a rychlosti navařování na geometrii návarové housenky.

Osnova práce:

- 1.Úvod
- 2.Rozbor současného poznání problematiky
- 3.Metodika experimentální části práce
- 4.Výsledky a jejich diskuse
- 5.Závěr

Metodika práce:

-Rozbor současného poznání bude zaměřen na vliv navařovacích podmínek na geometrii návarové housenky. Popis metody plánovaného experimentu a jeho vyhodnocení se zaměřením na problematiku navařování.

-V metodické části budou uvedeny zvolené metody přípravy vzorků, postup měření.

Rozsah hlavní textové části: 40 - 60 stran

Doporučené zdroje:

1. ANTONY, J.: Design of experiments for engineering and scientists, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, 152 s., ISBN 0-7506-4709-4
2. BAILEY, R.: Design of comparative experiments, Cambridge University Press, 2008, 330 s., ISBN 978-0-521-68357-9
3. KOU, S.: Welding metallurgy, Hoboken: Wiley-Interscience, 2003, 461 s., ISBN 0-471-43491-4
4. MALOUM, M., MILITKÝ, J.: Statistická analýza experimentálních dat, Academia, 2004, 953 s., ISBN 80-200-1254-0
5. MLČOCH, J., RÖSSLER, T.: Teorie měření a experimentu, Olomouc: Univerzita Palackého, 2005, 234 s., ISBN 80-244-1230-6
6. THEUS, M., URBANEK, S.: Interactive graphics for data analysis – principles and examples, Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2009, 280 s., ISBN 978-1-58488-594-8
7. RYAN, T. P.: Modern regression methods, Hoboken: Wiley, 2009, 642 s., ISBN 978-0-470-08186-0
8. WEMAN, K., LINDÉN, G.: MIG welding guide, Cambridge: Woodhead, Boca Raton, CRC Press, 2006, 303 s., ISBN 0-8493-9112-1
9. časopisy: Welding Journal, International Welding Journal, aj.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2011

L.S.



Vedoucí katedry



Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením pana doc. Ing. Rostislava Chotěborského, Ph.D. a uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne 9. dubna 2011

.....

vlastnoruční podpis

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Rostislavovi Chotěborskému, Ph.D. a Ing. Petru Hraběti, Ph.D. za odborné rady, vedení a připomínky, které mi v průběhu vypracování diplomové práce poskytovali.

Abstrakt: Navařování patří k nejhospodárnějším způsobům, zlepšení výkonnosti součástí vystavených náročným pracovním podmínkám a opotřebením. Navařovací proces lze optimalizovat pro dosažení co nejlepšího výkonu a jakosti. Tato diplomová práce zkoumá účinky navařovacího napětí, navařovacího proudu, rychlosti navařování a vzdálenost průvlaku na geometrii housenky. Experimentální data byla pořízena z vyhotovených vzorků. Pomocí Taguchiho metody plánovaného experimentu (DoE). Pomocí nich byly zkoumány vztahy mezi vstupními a výstupními faktory. Spolehlivost použitého modelu byla testována pomocí rozptylové analýzy (ANOVA). Výsledky byly posouzeny prostřednictvím Paretova grafu odhadu standardizovaných efektů. Bylo zjištěno, že zvolená metoda může být použita pro posouzení a spolehlivou předpověď efektů parametrů navařování na geometrii housenky. Porovnání získaných dat s jinými studiemi ukázalo, že existuje shoda v metodě a ve výsledcích. Byla prokázána platnost použitého modelu a navrhovaného postupu optimalizace.

Klíčová slova: navařování, geometrie návarové housenky, DoE, navařovací proces.

Effects of Welding Process Parameters on the Weld Bead Geometry

Summary: Hard-facing is one of the most economical ways to improve the performance of components subject to severe wear conditions. The welding process can be optimized in order to reach the best performance and ensure a good. This thesis examines the effects of welding voltage; welding current; welding speed and nozzle-to-plate distance on weld bead geometry. Experimental data have been collected from prepared samples and evaluated using Taguchi method of experimental design (DoE) in order to establish the relation between the input and the output data. The adequacy of the model has been evaluated using analysis of variance (ANOVA) for fitting and prediction. The results have been interpreted using Pareto graph for Standardized Effect Size Estimation. It has been concluded that the applied method may be used for evaluating and predicting the effects of welding process parameters on bead geometry. Comparing the data with other studies shows a consensus about the method and its results. Validity of the model and the suggested optimization procedure is demonstrated.

Key words: hardfacing, weld bead geometry, DoE, welding process parameters.

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Rozbor současného poznání problematiky	3
2.1	Co je navařování.....	3
2.2	Povrchová úprava dílců	3
2.3	Použití technologie v praxi	4
2.4	Faktory navařování	5
2.4.1	Navařovací proces.....	5
2.4.2	Promísení materiálů.....	7
2.4.3	Základní materiál	10
2.4.4	Přídavný materiál pro navařování	11
2.5	Druhy opotřebení	14
2.5.1	Adhezivní opotřebení.....	14
2.5.2	Erozivní opotřebení.....	14
2.5.3	Kavitační opotřebení.....	15
2.5.4	Únavové opotřebení	15
2.5.5	Vibrační opotřebení	16
2.6	Navařovací metody	17
2.7	Rozdělení metod svařování	17
2.7.1	Navařování elektrickým obloukem.....	19
2.7.2	Navařování odtavující se elektrodou.....	22
2.7.3	Navařování neodtavující se elektrodou – GTAW.....	26
2.7.4	Navařování plazmou.....	29
2.7.5	Navařování laserem.....	30

2.8	Vliv navařovacích parametrů na geometrii návarové housenky	30
2.8.1	Co je návarová housenka.....	30
2.8.2	Co je geometrie návarové housenky a její promísení.....	32
2.8.3	Vyhodnocování geometrie návarové housenky pomocí DoE	33
2.8.4	Vědecký výzkum	39
3.	Metodika experimentální části práce	44
3.1	Úvod experimentální části	44
3.2	Použitý materiál a postup	45
4.	Výsledky experimentu a jejich diskuze	50
4.1	Šířka návaru b	51
4.2	Šířka tepelně ovlivněné oblasti b_t	52
4.3	Výška návaru h	53
4.4	Průvar p	54
4.5	Hloubka tepelně ovlivněné oblasti p_t	55
4.6	Plocha návaru G	56
4.7	Plocha přetaveného základního materiálu Z	57
4.8	Promísení	58
4.9	Úhel formování housenky φ	59
4.10	Úhel provaření kořene ω	60
4.11	Shrnutí výsledku pozorování	61
5.	Závěr	63
	Použitá literatura.....	64
	Seznam zkratk.....	69
	Seznam obrázků.....	70

Seznam tabulek	71
Seznam grafů.....	72
Příloha A	I
Příloha B:	II
Příloha C:	III
Příloha D:	VII

1. Úvod

Tato diplomová práce je věnována problematice navařování, konkrétně vlivu technologických parametrů procesu navařování na geometrii návarové housenky. Experimentální data byla získána vlastním laboratorním výzkumem a vyhodnocena pomocí matematického modelu centrálně kompozitních systémů návrhu plánovaného experimentu.

První část předkládané práce je věnována aplikacím technologie navařování a různým používaným metodám, zejména opravě dílců, tak jako jejich povrchové úpravě, která představuje ochranu před různými druhy opotřebení a dodává dílci specifické požadované vlastnosti, kterých je dosaženo použitím vhodného přídavného materiálu a vhodného procesu navařování. Uváděny jsou ty svařovací procesy, které mohou být použity pro účely technologie navařování. Popsána je pak zejména ta metoda tavného navařování, která byla použita při experimentu, tedy navařování pod elektrickým obloukem kontinuálně podávanou elektrodou – trubičkovým drátem s vlastní ochrannou atmosférou. Experimentální část práce je zaměřena na kvantifikaci výsledků měření geometrických veličin v závislosti na definovaných variabilních parametrech navařovacího procesu.

Prostřednictvím matematického modelování jsou získaná data vyhodnocována metodou centrálně kompozitních systémů návrhu plánovaného experimentu, díky které může být počet jednotlivých pokusů podstatně snížen, ale spolehlivost výsledků zůstává zachována. Nastavení a vyhodnocení experimentu je prováděno prostřednictvím programu STATISTICA 9 s doplňkem DoE. Model byl testován technikou rozptylové analýzy. Pro popis vlivu navařovacích parametrů na geometrii návarové housenky bývají používány lineární modely. Tato metoda analýzy může být použita pro model, zaměřený určení minima, nebo maxima vlivu faktoru na odezvu, či případnou interakci mezi jednotlivými faktory (Chotěborský & Navrátilová, 2011). Pro komplexnější vztahy jsou modely vyjádřeny pomocí kvadratických modelů druhého řádu. Vliv jednotlivých parametrů je proto posuzován pomocí Paretova grafu standardizovaných efektů jak lineárních tak kvadratických. V Paretově grafu efektu příčiny na důsledek, jsou efekty

řazeny podle síly vlivu na výsledek v sestupném sledu od nejsilnějšího efektu po nejslabší.

Cílem prováděného výzkumu je nalézt a popsat souvislosti mezi vstupními a výstupními faktory navařovacího procesu. Při tavném navařování dochází z podstaty technologie k promísení navařovaného, tzv. přídavného materiálu se základním materiálem právě v oblasti návarové housenky. Výsledná struktura návaru je proto funkcí navařovacích parametrů procesu a fyzikálních vlastností přídavného materiálu se základním. Kvalita a efektivita návaru má praktický dopad v průmyslové praxi. Predikce výsledku vlivu navařovacích kontrolovatelných variabilních parametrů navařovacího procesu může kontrolu kvality a efektivitu výroby značně usnadnit. Předložená diplomová práce proto zkoumá, které parametry procesu mají jaký vliv na geometrii návarové housenky. Ty interakce, které mají silný vliv, mohou být při matematické predikci výsledků zohledněny a naopak, parametry s nepodstatným vlivem mohou být (vypuštěny) zanedbány. Správný matematický model a jeho korektní interpretace je důležitým nástrojem optimalizace procesu. Tato diplomová práce názorně ukazuje vhodnost využití centrálně kompozitního plánovaného experimentu, jako teoretického nástroje pro optimalizaci navařovacích procesů zejména tím, že dokumentuje, kvantifikuje a interpretuje intenzitu jednotlivých navařovacích parametrů na geometrii návarové housenky.

2. Rozbor současného poznání problematiky

2.1 Co je navařování

Navařování je metalurgický termofyzikální proces, který lze také označit jako nánosové svařování.¹ (Bajda, 2006). Tato výrobní technologie, určená pro vytváření homogenních kovových vrstev z přídavného odtaveného materiálu spojených s nataveným základním materiálem metalurgicky. Použití tohoto procesu sahá od běžného doplnění rozměru opotřebené součásti výrobku, kdy se navařením obnoví používaný nástroj návarem materiálu se stejným, nebo podobným chemickým složením, jako je jeho základ, tedy *renovace dílce za účelem prodloužení jeho životnosti*, až po vytvoření definované vrstvy vykazující často odlišné fyzikálně-chemické vlastnosti než má základ, na kterém je vrstva navařena.

2.2 Povrchová úprava dílců

Vlastnosti dosažené navařováním bývají zpravidla velmi specifické. Aplikace specifické kovové návarové vrstvy se provádí za účelem *zvýšení odolnosti dílce, proti různým formám opotřebení*, konkrétně proti opotřebení adhezivnímu, abrazivnímu, erozivnímu, kavitačnímu, únavovému či vibračnímu, proti korozi chemické nebo elektrochemické i proti působení několika těchto vlivů současně v nejrůznější kombinaci.²

Nanesení návarové vrstvy musí být provedeno tak, aby ochrana dílce byla efektivní a aby ochranná vrstva a spoj mezi návarem a základním materiálem taktéž dobře odolával námaze a pracovním podmínkám dílce. (Chotěborský, Hrabě, Jirka, Müller, & Savková, 2009).

¹Něm. *Auftragsschweißung*, angl. *deposit welding*

²Dle ČSN 015050

V druhém případě se tedy jedná o použití technologie navařování k výrobě nových součástek.

Dílce je díky této technologii možné vyrobit z levnějšího základního materiálu a opatřit je pomocí navařování přídavného materiálu vrstvou odolnějšího, avšak dražšího materiálu, vykazujícího požadované vlastnosti. Takto lze zásadně snížit výrobní náklady.

2.3 Použití technologie v praxi

Přídavné materiály lze na základní materiál nanášet hned několika různými způsoby navařování, dosažitelnými, známými a všeobecně používanými svařovacími technologiemi. Navařování se používá v rozsáhlé míře v průmyslových výrobních odvětvích zejména tam, kde je vyžadováno zlepšení odolnosti funkčních povrchů, které mají vykazovat specifické vlastnosti během pracovního nasazení. Aplikaci lze proto nalézt zejména v rejdářství, letectví, automobilovém průmyslu, jaderné energetice, nástrojařství, stavebnictví a zbrojařství. V praxi se lze setkat s takto zpracovanými materiály například u hrotů radlic buldozerů, korečků rýpadel, lopat bagrů, u pístů spalovacích motorů či u lopatek turbín, u kladiv, drtičů, zubů lopat exkavátorů, nástrojů na stříhání za studena, atd. – všude tam, kde jsou na materiály kladeny vysoké požadavky na zvýšenou odolnost proti opotřebení, či prodloužení životnosti, viz Tab. 1. Vzhledem k rozsáhlému nasazení v praxi a velké poptávce po této technologii byl zaznamenán velký pokrok v jejím vývoji, především ve výzkumu a vývoji metod a materiálů.

Tab. 1 Příklady použití návarů v praxi

KATEGORIE	PŘÍKLADY
Návar rychlořezné oceli	forma pro plasty z nerezové oceli, lisovací forma, lisovací forma leptaná
Nástrojové oceli pro práci za tepla	kovadlo, forma na tlakové lití, zápustka, axiální válec, zápustka kliky, hrana nože nůžek na sochory
Litina „za studena“	pouzdro ložiska otočného podvozku, podstavec z tvárné litiny, víko čerpadla austenitické litina, blok motoru lokomotivy, tvářecí nástroj, tělo šoupátka plynovodu
Návar nástrojové oceli pro práci za studena	střížná čelist, razník, střížníky a matrice
DALŠÍ KATEGORIE	
Návary čerpadel, armatur, turbín a lodních šroubů Navařování v kolejové dopravě Opravy pecí pro výrobu stavebních hmot Vrtná technika Šnekové dopravníky, šnekové lisy, míchací vrtule Díly drtičů a mlýnů	

Zdroj: (Böhler Welding Group)

2.4 Faktory navařování

Při navařování dochází k interakci mnoha faktorů, jako je difúze, deformace, rekrytalizace, precipitace, rozpouštění a vznik nových fází, aj., v závislosti na použité metodě. Procesu svařování vytvoří spoj dvou kovových materiálů, který nelze bez vložení další energie přerušit. Zásadní roli při navařování hrají čtyři faktory:

1. navařovací proces,
2. promísení materiálu,
3. základní materiál,
4. přídatný materiál.

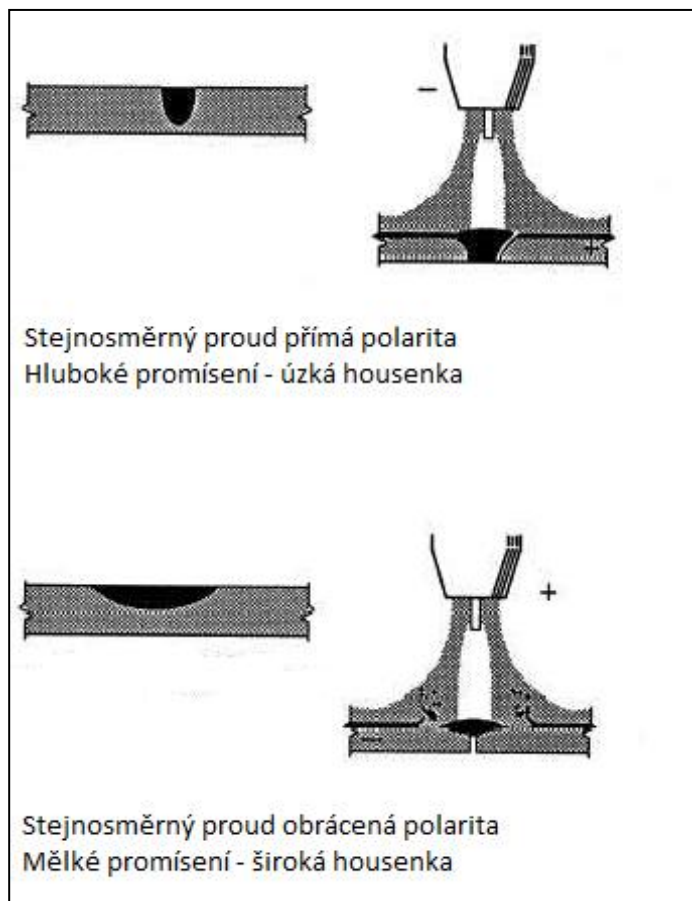
2.4.1 Navařovací proces

Samotný proces (zde navařování) je definován jako soubor (komplex) vzájemně souvisejících nebo vzájemně působících faktorů, který přeměňuje konkrétní vstupy na konkrétní výstupy. Konkrétní znamená kvantifikovatelné. Výstupem je pro účely této studie geometrie návarové housenky a průvar. Ovlivňujícími vstupními faktory

navarovacího procesu například při technologii navařování **MOG** (*Metallschweißen ohne Gasen*), která je předmětem této diplomové práce, jsou mimo jiné navařovací napětí a proud, navařovací rychlost, vzdálenost průvlaku od základního materiálu, průtok ochranného či aktivního plynu, průměr a polarita návarové elektrody, úhel špičky elektrody (sklon svařovací hubice) délka oblouku a rychlost podávání drátu.

Jako příklad může sloužit schéma vlivu polarity elektrody na morfologii housenky a hloubku promísení, viz *Zdroj*: . Například při svařování metodou WIG zase ovlivňuje přenos materiálu úhel elektrody - ostrý úhel přenáší energii na malou plochu s velkým natavením, tupý úhel elektrody přenáší stejný svařovací proud na velkou plochu s poměrně mělkým natavením.

Obr. 1 Vliv polarity stejnosměrného proudu na navařování.



Zdroj: (www.tpub.com)

2.4.2 Promísení materiálů

Jak technologie, tak i materiály jsou vyvíjeny k jednomu účelu: při navařování dochází k promísení návarového kovu a základního materiálu. Cílem je v obou případech, tedy při opravě nebo obnově dílců, i při vytvoření vrstvy se speciálními vlastnostmi, udržet promísení obou materiálů tak nízké, jak je to jen možné, aby se udržely optimální vlastnosti navařené vrstvy při zachování dobrého metalurgického spoje bez studených závarů (to je dáno úhlem mezi housenkou a základním materiálem) a bez zhoršení vlastností základního materiálu. To znamená, že hloubka závaru by měla být co nejmenší, tak jako i množství tepla vneseného do navařovaného dílu (což vede ke vzniku menší deformace a pnutí v základním materiálu). Měkčí návarové materiály vykazují nárůst tvrdosti, když se navaří na výše legované základní materiály v důsledku zvýšení obsahu uhlíku a legur promísením se základním materiálem. Velmi často je ale základní materiál nelegovaný nebo nízkolegovaný. V takovém případě může být potřebné navařit několik vrstev návaru, aby se získala potřebná tvrdost. V běžných případech ale postačují dvě nebo tři vrstvy návaru. Jelikož stupeň promísení závisí na použité technologii navařování, na svařovacím procesu, ale i na konkrétním postupu navařování. Při volbě navařovacího postupu je potřebné zajistit, aby se promísení minimalizovalo. *Viz Tab. 2. (ESAB, 2008)*

Tab. 2 Renovace a povrchové úpravy

Metoda	Promísení [%]	Počet vrstev	Výška návaru [mm]
Navařování plamenem	3 – 5	1 - 3	3
Ruční obalenou elektrodou	10 – 30	2 - 4	3 – 6
TIG – navařování	7 – 5	1 - 3	3
MIG – navařování	13 – 30	2 - 4	6
MIG – PULS	6 – 20	2 - 3	4 – 8
MIG + studený drát	5 – 15	1 - 2	4 – 8
MAG – navařování	25 – 45	3 - 5	6
Pod tavidlem – jeden drát	30 – 50	3 - 4	10
Pod tavidlem – více drátů	15 – 30	2 - 3	6
Pod tavidlem – páska	8 – 20	1 - 3	4 – 6
PLASMA – horký drát	7 – 60	1 - 3	2 – 7
ELEKTRO struskové – páska	5 – 10	1 - 2	4 – 5
MOG – trubičky s vlastní ochranou	20 – 40	2 - 3	4 – 8

Zdroj: (Kubíček, 2006)

Poznatky o mechanismech promísení materiálu a interakci různých faktorů na jakost výsledného produktu, jsou při vývoji technologií a postupů, zaváděny do praxe průmyslové výroby. Cílem je optimalizace výroby, zvýšení kvality a v neposlední řadě snížení výrobních nákladů.

Tab. 3 Faktory ovlivňující promísení

Svařovací rychlost:	Nízká rychlost - vysoké promísení Vysoká rychlost - nízké promísení
Svařovací polarita:	DC (-) nízké promísení AC střední promísení DC (+) vysoké promísení
Tepelný příkon:	Nízký - nízké promísení Vysoký - vysoké promísení
Technika svařování:	Tahové housenky - nízké promísení Svařování s rozkyvem - vysoké promísení
Poloha svařování:	Svislá nahoru - vysoké promísení Vodorovná shora, svislá dolů - nízké promísení
Počet vrstev:	Se stoupajícím počtem vrstev promísení klesá
Typ svarového kovu:	Přelegované svarové kovy jsou méně citlivé na promísení
Vzdálenost průvlaku:	Dlouhý výlet - menší promísení (Viz vzdálenost průvlaku)

Zdroj: (ESAB, 2008)

Je proto zapotřebí pro jednotlivé technologie volit takový postup, který při dosažení požadovaných vlastností navařeného povrchu zároveň zajistí i kvalitu samotného návaru, například optimálně sníží velikost průvaru materiálu.

Rozhodující pro tuto volbu jsou konkrétní podmínky pracovního nasazení dílce s navařeným povrchem a forma opotřebení, kterému bude dílec vystaven. Tyto podmínky jsou důležité pro výběr vhodných **přídavných materiálů**. Rozhodujícím faktorem je přitom **základní materiál**, na který bude ochranná vrstva navařena a typ **svařovacího procesu**, který bude použit, ale zejména tedy forma povrchu, který má být prostřednictvím návaru přídavného materiálu vytvořen. (Hlavatý, 2003)

Interakce základního a přídavného materiálu je přitom velmi důležitá. Při navařování tvrdšího návaru na měkký základní materiál jako například na nízkouhlíkovou ocel, vykazuje při vysokém vnějším zatížení tendenci vtlačovat se do poddajného základního materiálu. To může způsobit odloupení návaru. V tomto případě lze nevhodnému efektu předejít nanesením mezivrstvy z pevného a houževnatého materiálu před samotným tvrdonávarem.

Při navařování křehkých materiálů, jako jsou materiály s obsahem karbidů chromu a slitiny kobaltu, je lepší nejdříve navařit několik mezivrstev austenitického materiálu pro snížení napětí, které může zapříčinit popraskání tvrdého kovu návaru. Mnoho návarů popraská sítí trhlinek, když se při chladnutí napětí uvolňuje. Tyto trhlinky nejsou problematické z hlediska funkce návaru, např. při abrazi, ale hrozí, že se při silných rázech a/nebo při ohýbání dílce budou šířit do základního materiálu. Tato tendence je nejvýraznější, když je základním materiálem vysoko-pevnostní ocel. (ESAB, 2008) Tomuto šíření trhlin lze zabránit použitím houževnatějších mezivrstev.

2.4.3 Základní materiál

Navařuje se na dvě základní skupiny materiálů:

- a) uhlíkové nebo nízkolegované oceli
- b) manganové austenitické oceli.

Tyto dvě skupiny materiálů lze rozlišit jednoduše pomocí magnetu. Uhlíkové a nízkolegované oceli jsou silně magnetické. (ESAB, 2008) Austenitické manganové typy ocelí nejsou magnetické (po deformačním zpevnění se ale i tyto oceli stávají magnetickými, protože austenitická struktura se přeměňuje vlivem zatížení na tzv. deformační martenzit).

Technologie zpracování těchto dvou skupin materiálů jsou rozdílné. Uhlíkové a nízkolegované oceli vyžadují závisle na obsahu uhlíku a legujících prvků různé metody, například předehřev, pomalé chladnutí, atd. Austenitické manganové oceli se musí zpracovávat bez předehřevu či tepelného zpracování po svaření. „Mezihousenková“

teplota (Koukal & Zmydlený, 2005) – maximální teplota předchozí vrstvy při vícevrstevném svařování³, musí být co nejnižší (cca 200°C), jinak základní materiál přehřátím zkřehne. Při příliš vysoké teplotě oproti této předepsané teplotě dochází v tepelně ovlivněné oblasti k růstu velikosti zrn, což nepříznivě ovlivňuje výslednou pevnost návarového spoje. Za navařovací parametry fyzikálních vlastností základního materiálu, lze považovat mimo jiné tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost a hustotu.

2.4.4 Přídavný materiál pro navařování

Pro navařování se používá celá škála přídavných materiálů, od drátů, trubiček, pásků (kompaktních i plněných) až po práškové slitiny. Proto se přídavné materiály klasifikují podle tvaru a způsobu provedení. Za navařovací parametry fyzikálních vlastností přídavného materiálu, pro účely této diplomové práce odtavující se elektrody, lze považovat - průměr elektrody, typ elektrody (plný drát, plněná elektroda), materiál elektrody apod.

Mezi všemi přídavnými materiály pro svařování i navařování zaujímají významné místo trubičkové dráty (plněné trubičky). Nejčastěji používanými navařovacími materiály jsou jednoznačně obalené elektrody, zejména v opravárenské praxi a renovacích. Často se používají nízkolegované elektrody s tvrdostí návarového kovu od 250 HV. Specifickým navařovacím materiálem jsou lité tyčinky. Dříve používané lité tyčinky s vysokým obsahem uhlíku (2,5 až 4,5 %) a chrómu (26 až 31 %), s křemíkem od 0,7 % a některé další, podle dřívější ČSN 055360, jsou již dnes nahrazeny trubičkovými dráty a obalenými elektrodami. Některé tyčinky jsou opatřovány tenkým dezoxidačním povlakem zlepšujícím čistotu tavné lázně. (Bajda, 2006)

Dráty se vyrábí se válcováním a tažením a mají výhradně kruhový průřez. Bývají vyráběny v průměrech od 0,5 mm až do 8 mm. Podle technologických požadavků jsou též povrchově upravovány. Obalované elektrody, které jsou používány pro navařování, mají plné jádro, kterým je převážně tažený drát, ale pro speciální navařovací elektrody jsou také používány lité tyčinky, vyráběné jednak kontilitním a taktéž vakuovým nasáváním, které se následně opatří speciálním nalisovaným obalem. Někteří výrobci

³ V literatuře se často používá termín „*interpass temperature*“, viz ISO 13916:1996

používají také jádro z trubičkového plněného drátu. Obalové hmoty jsou z látek ochranných, stabilizačních, dezoxidačních a struskotvorných. Převažující množství v současnosti vyráběných navařovacích elektrod je opatřován obalem obsahujícím legující prvky, podílejícími se na chemickém složení návarového kovu. Tyčinky jsou vyráběny z tažených drátů, odléváním, nebo jako kompozity. Litě tyčinky se vyrábí ze slitinových materiálů, které nejsou zpracovatelné tažením. Odlévají se do pískových forem, kokil, kontinuálním odléváním a vakuovým nasáváním do speciálních forem (například do skleněných a křemíkových trubic). Kompozitní tyčinky se vyrábí ve formách, do nichž jsou dávkovány zrnité materiály, které jsou zalévány určeným slitinovým kovem. Plněné elektrody (trubičkové dráty) jsou vyráběny s různým složením náplně od látek ionizačních, dezoxidačních a struskotvorných až po náplně středně a vysoce legované, v závislosti na technologii, pro které jsou určeny, a podle požadavku na výsledné složení návarového kovu. Vyrábí se sbalováním kovového (slitinového) pásku s požadovanou náplní, který může mít různý tvar uzávěru k zabezpečení kruhového průřezu. Mnozí výrobci již opatřují požadovanou náplní bezešvé trubičky (například pomocí speciálního vibračního zařízení). Tyto plněné trubičky mají řadu výhod, zejména kompaktnost a odolnost proti vlhku. Vyrábí se od průměru 1 mm do 4 mm. Plněné pásky jsou vyráběny sbalením ocelové pásky, která má před sbalením tvar žlábků, do něhož jsou dávkovány legující složky v práškové či zrnité formě, jednak z feroslitin a rovněž z kovů, slitin a kompozitů. Po sbalení do tvaru pásku je tento uzavřen a přetažen přes formovací kladky. (Bajda, 2006)

Mezi dosti zvláštní navařovací materiály, které nejsou příliš používány v běžné praxi, patří plněné pásky, kordy a pasty. Tyto formy přídatných materiálů se navařují plamenovou technologií a poskytují vysoce tvrdé návary. Používají se k navařování funkčních částí nástrojů pro hloubkové vrtání, nástrojů a součástí v hornictví, při úpravě rud, výstavbě silnic aj. Pásky jsou především přídatným materiálem pro navařování. Většinou se používají pásky z austenitických stabilizovaných ocelí a pásky ze slitin s vysokým obsahem niklu. Navařují se převážně pod tavidlem, zřídka elektrostruskově dvěma páskami. Využití navařování páskami je jednak ve výrobě komponentů pro jaderné elektrárny (například u kompenzátoru objemu) a rovněž pro zařízení chemického průmyslu. Využití je také v renovacích opotřebovaných povrchů. Kordy

(flexodráty) žádaného průměru se vytlačují přes průvlak z pasty, která je tvořena smícháním kovových a slitinových prášků (včetně karbidů) a potřebných složek s organickým plastifikátorem. Pásy se vyrábí z kovů a slitin válcováním, obvykle v šířkách od 20 do 60 mm a tloušťkách od 0,2 do 0,8 mm. Používají se pro navařování pod tavidlem. Pasty jsou směsi práškových kovů, slitin, feroslitin a dezoxidačních, ionizačních, struskotvorných a pojících složek.

Velmi významné místo v navařování dnes zaujímají prášky. Značné využití práškových slitin, zejména na základě kobaltu (slitiny CoCrW) je ve výrobě armatur, kde se navařují plazmově. Další značné využití je v automobilovém průmyslu, zvláště při navařování ventilů. Velmi rozsáhlé je využití práškových slitin typu NiCrSiB, tzv. samotavných práškových slitin v mnoha oblastech průmyslové výroby a v renovacích pro zvyšování životnosti součástí, které se jako stavované povlaky aplikují na funkční plochy. Prášky se vyrábí inertním plynem nebo dusíkem rozstříkané slitinové taveniny a jejich separací na požadovaný rozsah zrnění. (Bajda, 2006)

Výběr přídavného materiálu ve funkci použití a opotřebení

Výběr přídavného materiálu⁴ musí odpovídat požadavkům na způsob použití, a formu námahy, které bude dílec vystaven. Konečný účel výrobku je proto předurčuje výběr (bez přihlídnutí k finančním aspektům) přídavného materiálu. Faktorů opotřebení materiálu může být hned několik, působících jednotlivě či současně. Rozlišují se v takovém případě primární a sekundární faktory. Návarový materiál by měl ideálně vykazovat odolnost proti oběma faktorům.

⁴ Přídavný materiál byl klasifikován dle normy DIN 8555 T1 (1983). Tato norma byla později zrušena a nahrazena normou EN 14700:2005 (ČSN EN 14700:2006 - 055020).

2.5 Druhy opotřebení

Opotřebení se dle normy ČSN 015050 dělí na adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační.

2.5.1 Adhezivní opotřebení

Vzniká při smýkání tuhých protilehlých těles tlačných k sobě normálovou silou (sílu působící kolmo k podložce). V místě styku dvou kovových těles dochází touto cestou k porušování povrchových adsorpčních i oxidových⁵ vrstev a kovové povrchy těles přicházejí do bezprostředního kontaktu.

2.5.2 Erozivní opotřebení

Toto opotřebení je charakterizováno oddělováním materiálu účinkem:

- částic, nesených proudem kapaliny nebo plynu (vyskytuje se např. u čerpadel na znečištěné kapaliny, ventilátorů, cyklonů, tryskačů, potrubí pneumatické, hydraulické či spádové dopravy aj.)
- částic samotné kapaliny, páry nebo plynu (vyskytuje se např. u parních armatur, koncových stupňů parních turbín pracujících v oblasti mokré páry, plynových turbín, náběžných hran křídel a ostatních ploch letadel, ventilů spalovacích motorů aj.).

Efekt erozivního opotřebení je podobný jako u abrazivního opotřebení, kde dochází k rýhování a seřezávání materiálu. Charakteristické pro erozivní opotřebení je nerovnoměrné porušení povrchu, který je zvlněný a zvrásněný a poškozený i v prohlubeninách.

⁵ Oxidové vrstvy, vznikají např. brunýrování vytváří povrchovou vrstvu Fe_2O_3 , respektive směs $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4$

2.5.3 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic z povrchu v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině.

Mnoho součástí pracuje v různých kapalinách, velmi často ve vodě. Voda je silně agresivní prostředí, které působí provozní potíže a poruchy v důsledku koroze, eroze a kavitace. Zejména kavitační opotřebení bývá často nesprávně považováno za důsledek koroze. Ke kavitačnímu opotřebení může docházet pouze tam, kde se vyskytuje kavitace, tj. dochází ke vzniku kavitačních dutin, jejichž zánik vyvolává hydrodynamické rázy. Rázy působí na povrch materiálu zcela analogicky jako kontaktní tlaky u opotřebení povrchovou únavou. Kavitační opotřebení se vyskytuje např. ve vodních turbínách, čerpadlech, u součástí hydraulických systémů, ve vodovodech, v redukčních ventilech, v chladicích systémech pracujících s kapalinou, v pračkách, v tlakově mazaných ložiskách apod.

2.5.4 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení je charakterizováno postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě při opakovaných kontaktních napětích. Dosahují-li tato napětí hodnot nad mezí kluzu, jde o nízko-cyklovou únavu, jsou-li pod mezí kluzu, jde o vysoko-cyklovou únavu.

Nejčastější případy povrchové únavy jsou známy u valivých ložisek, ozubených kol, železničních kol, zdvihátek ventilů spalovacích motorů, pneumatických kladiv aj.

Vznik, průběh i intenzita poškození únavovým opotřebením jsou velmi závislé na provozních podmínkách.

2.5.5 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic materiálu v místech kmitavých tangenciálních posuvů funkčních ploch při jejich současném zatížení normálními silami.

Vzájemný pohyb má různý původ. Může se jednat o přímočarý vratný pohyb, o pohyb způsobený přenesenými vibracemi nebo o pohyb vzniklý v důsledku pružných deformací v uložení mechanicky namáhaných součástí. (Pošta, Veselý, & Dvořák, 2002)

Tab. 4 Formy opotřebení

KOMBINACE OPOTŘEBENÍ:	TYP SOUČÁSTI:
Valením a vymačkáním	Pojezdové kolo, opěrné kolo, oběžné kolo, řetězové kolo, vlečný řetěz, řetězový článek.
Otěrem, tlakem, rázy	Drtící válec, drtící kužel, článek pásu, drtící desky podbíjecí kladiva, sekací lišta.
Silným tlakem a silnými rázy	Vlečný řetěz, drtící kužel, mlecí kladiva, drtící desky, výhybky a srdcovky.
Silným minerálním otěrem	Tažná část řetězu, mísící brány, doplňovací hubice, mlecí běhoun, otěru vzdorné desky, transportní šneky, drtič šterku.
Extrémním minerálním otěrem a otěrem za vysokých teplot	Výtlačné šneky a trysky, ochlazovací desky rotační pece, ventilátorové kolo, ventilátorový odlučovač, rošt na slínek
Převážně rázy	lžíce a korečky - návar zubu
Převážně otěrem	lžíce a korečky - krycí vrstva zubu, návar dásně

Zdroj: (Böhler Welding Group)

2.6 Navařovací metody

Veškeré navařovacích procesy mají za cíl kompaktně spojit dva materiály pevným spojem, při působení z vnějšku dodávané energie, která překoná daný termodynamický stav látky. Dodávanou energií může být teplo (elektrický oblouk, plamen, plasma), plastická deformace (tření, výbuch, kovářská činnost) nebo radiace (elektronové nebo iontové záření). (Bajda, 2006)

2.7 Rozdělení metod svařování

Rozdělení metod svařování zahrnuje i metody navařování. Veškeré běžné metody svařování je možné v první řadě rozdělit na dvě základní skupiny:

- a) **metody tavného svařování** – vytvoření spoje je dosaženo přívodem tepelné energie do oblasti svaru a dendritickou krystalizací roztaveného svarového kovu. Některé tyto metody lze použít i pro navařování.
- b) **metody tlakového svařování** – vytvoření spoje je dosaženo působením mechanické energie, která formou makro nebo mikrodeformace přiblíží spojované povrchy na vzdálenost působení meziatomových sil. Nepoužívají se při navařování.

Rozdělení metod svařování je uvedeno v normě ČSN EN 34063, která odpovídá rozdělení dle normy ČSN ISO 857. Tato norma definuje pro každou známou metodu svařování a pájení číselný kód sestávající z max. 3 číslic. První číslice definuje vždy základní skupinu svařovacích metod, zbylé číslice definují tzv. podskupiny. (Koutný, 2006). Z těchto metod svařování lze použít pro účely navařování následující:

Metody tavného svařování (0)

1. Svařování elektrickým obloukem (1)
 - a) Obloukové svařování tavící se elektrodou (101)
 - b) Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (111)
 - c) Gravitační obloukové svařování obalenou elektrodou (112)
 - d) Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu (114)
 - e) Vibrační svařování a navařování (115)
 - f) Svařování pod tavidlem (12)
 - g) Obloukové svařování v ochranné atmosféře (13)
 - h) Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu-MIG (131)
 - i) Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu-MAG (135)
 - j) Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu (136)
 - k) Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu (137)
 - l) Obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu-WIG (141)
2. Elektrostruskové svařování (72)
3. Svařování plazmové (15)
4. Svařování plazmové MIG svařování (151)
5. Svařování magneticky ovládaným obloukem (185)
6. Elektronové svařování (76)
7. Svařování plamenem (3)
 - a) kyslíko-acetylenové svařování (311)
 - b) kyslíko-vodíkové svařování (313)
8. Laserové svařování (751)
9. Aluminotermické svařování (71)
10. Elektroplynové svařování (73)

Pro účely této diplomové práce je vhodné blíže popsat zejména metodu navařování elektrickým obloukem, a to kontinuálně podávanou elektrodou, která byla při experimentu použita. Blíže popisovat ostatní metody uváděné v normě by bylo nad rámec této diplomové práce, proto budou zmíněny jen pro úplnost přehledu.

2.7.1 Navařování elektrickým obloukem

Metoda navařování elektrickým obloukem, je známa již od konce 19. Století a od té doby zůstává v praxi tou nejpoužívanější technologií.

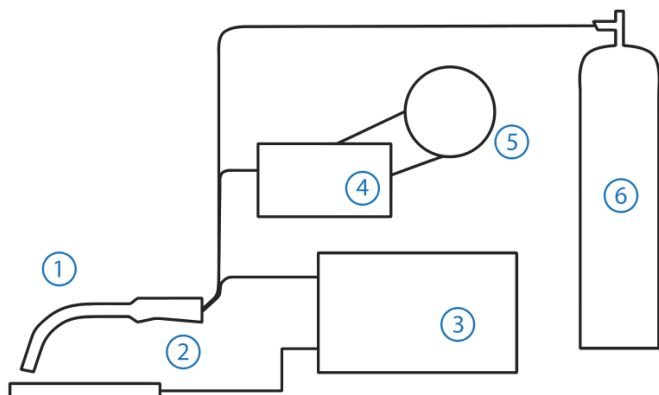
Obr. 2 Navařování elektrickým obloukem (GMAW)



Zdroj: (Armao, F.; et al., 2006)

Zdrojem tepla je elektrický oblouk vytvořený zpravidla mezi navařovaným dílem a elektrodou či svařovacím drátem. Elektrická energie přeměněná na teplo vytváří oblouk o teplotě až 7 000°C, při které kovy změni své fyzikální skupenství, zkapalní a spojí se. Používaná svářečská zařízení se mohou lišit co do velikosti a komplexnosti, nicméně hlavní rozdíl mezi nimi spočívá v použití typu svařovacího, takzvaného přídavného materiálu.

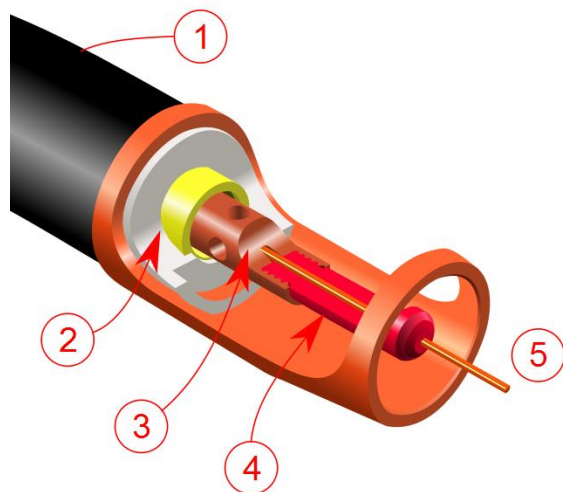
Obr. 3 Schéma zapojení svařovacího zařízení



(1) hořák, (2) základní materiál, (3) zdroj, (4) podavač drátu, (5) cívka svařovacího drátu, (6) tlaková láhev ochranného plynu

Zdroj: (www.wikipedia.org, 2011)

Obr. 4 Schéma svařovacího hořáku

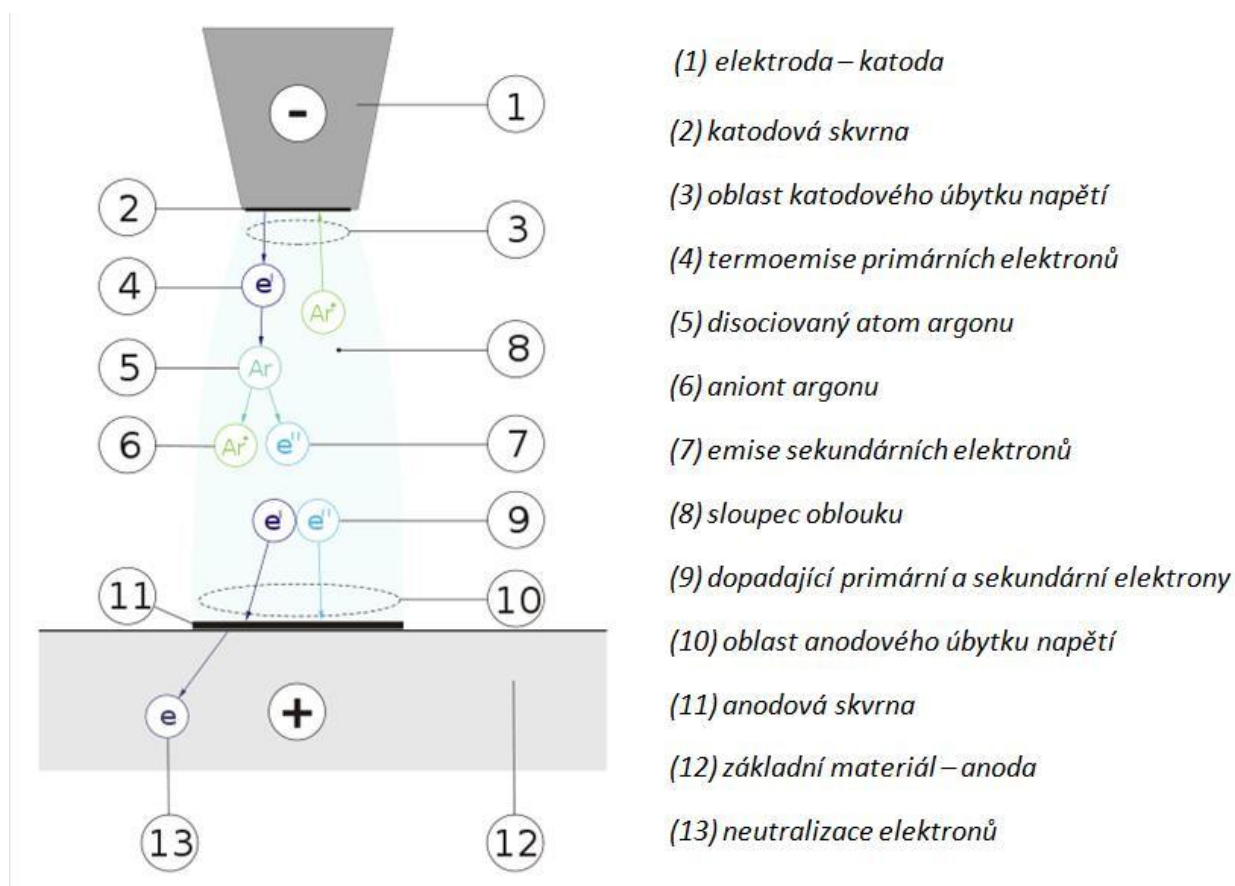


(1) držák, (2) Izolační hmota (zobrazena bíle) a závitový nástavec (žlutě), (3) tryska ochranného plynu, (4) kontaktní průvlek, (5) výstup plynové hubice s výletem svařovacího drátu

Zdroj: (www.wikipedia.org, 2008)

Známá nevýhoda navařování elektrickým obloukem je bodové tepelné zatížení, protože rychlost navařování je mnohem vyšší než u plamene. Díky bodovému tepelnému zatížení existuje nebezpečí vzniku trhlin (nad 0,3% C v základním materiálu) - jeden z důvodů přehřevu, při navařování obloukem, první vrstva vykazuje zředění cca 50%, což vede k poklesu tvrdosti, vysoká rychlost ochlazení materiálu pak může způsobit jeho zakalení. (Kubíček, 2006)

Obr. 5 Schéma elektrického oblouku při svařování



Zdroj: (www.wikipedia.org, 2010)

Rozlišují se dvě základní metody obloukového navařování:

- A. Navařování odtavující se elektrodou,
- B. navařování neodtavující se elektrodou.

2.7.2 Navařování odtavující se elektrodou

Navařování odtavující se elektrodou lze rozdělit: a) navařování obalenou, nebo plněnou elektrodou, b) navařování kontinuálně podávanou elektrodou c) navařování pod tavidlem.

a) Obalená elektroda

Tato elektroda je známa od roku 1907 z patentu Švéda Oscara Kjellboga. Navařování obalenými elektrodami (angl. SMAW) je známé též jako ruční obloukové svařování (angl. MMA), pokrývá nejširší rozsah svarových kovů, je laciné, je to všestranný proces, použitelný pod širým nebem a v různých polohách.

Pro navařování obalenou elektrodou všeobecně platí, že se návary většinou nanášejí prostřednictvím elektrody s bazickým obalem, kde v obalové hmotě jsou zpravidla vedle ochranných složek, také složky legující návarový kov.

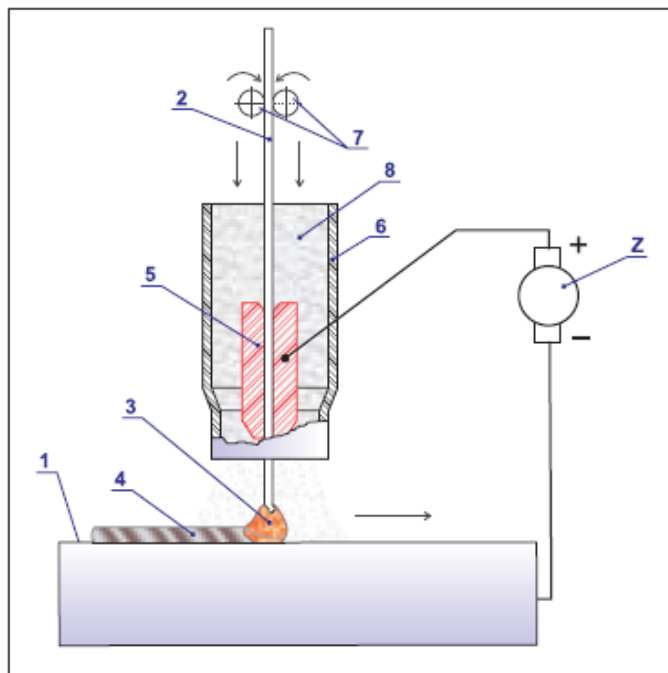
Plněná elektroda (angl. FCAW)

Tato technologie se vyznačuje vysokým výkonem odtavení. Díky tomu je možné technologii použít i mimo dílny. Sortiment dostupných návarových kovů je široký, skoro jako u obalených elektrod a při typech s vlastní ochranou není potřebný ochranný plyn.

b) Kontinuálně podávaná elektroda

Druhá metoda navařování elektrickým obloukem je prostřednictvím kontinuálně podávané elektrody. Tato metoda umožňuje částečnou i plnou automatizaci provozu.

Obr. 6 Navařování s kontinuálně podávanou elektrodou



1 – Základní materiál, 2 – Elektroda, 3 – Hořící oblouk, 4 – Housenka (návar),
5 – Kontaktní špička, 6 – Plynová hubice, 7 – Podávací mechanismus, 8 – Proudící plyn, Z – Zdroj proudu

Zdroj: (Bajda, 2006)

Tato metoda byla použita v experimentální části diplomové práce. Navařovací proces s kontinuálně podávanou elektrodou může probíhat pod ochrannou atmosférou inertního, nebo aktivního plynu, nebo bez vnějšího dodávání plynu, kdy se ochranná atmosféra vytváří pomocí samotné elektrody – přesněji látek za tímto účelem připravených uvnitř elektrody.

Funkce ochrany tavné lázně je důležitá, protože jedním z hlavních problémů při navařování je to, že při vysoké teplotě probíhají chemické reakce rychleji, takže i kovy chemicky reagují s okolní atmosférou rychleji.

Při tomto způsobu navařování je svarová lázeň chráněna před nepříznivými účinky okolní atmosféry (hlavně kyslíku – okuje, dusíku – roztok alfa a vodíku – studené trhliny) ochrannou atmosférou, která může být inertní nebo aktivní.

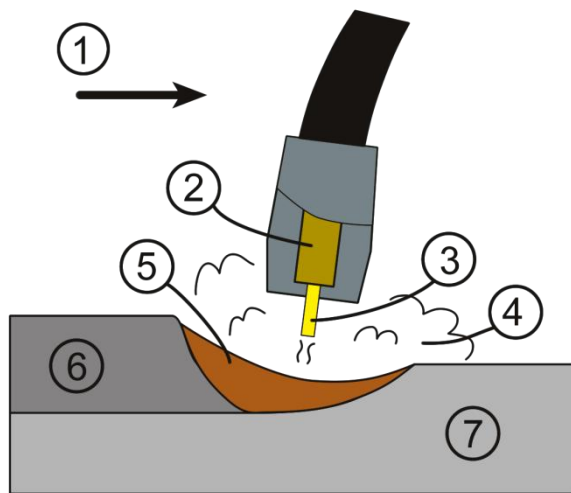
Metoda, jak chránit horký kov před chemickým vlivem okolní atmosféry, je tedy významným rozlišujícím faktorem při procesu navařování. Konkrétní forma ochranné atmosféry se volí dle druhu navařovaného materiálu, ovlivňuje totiž jeho přenos a rozstřík, tak jako teplotní poměry v oblouku. Ochranné plyny při navařování chrání svarovou lázeň i natavené části navařovaného materiálu před nepříznivým vlivem plynů vnější atmosféry, zejména oxidace u kyslíku (O_2) a nitrace u dusíku (N_2). Ochranné plyny navíc plní i další praktické funkce, například stabilizují elektrický oblouk, upravují podmínky pro přenos kovu obloukem, příznivě ovlivňují hloubku závaru, rychlost navařování a velikost rozstříku, popřípadě zlepšují formování sváru a morfologii návarové housenky. Pro tyto metody bez rozlišení jednotlivých ochranných plynů se používá označení **MIG/MAG**.

Podle způsobů ochrany lze rozlišovat:

- a) navařování v ochranné atmosféře inertního plynu, jako je argon (Ar), helium (He), nebo jejich směsi, tzv. **MIG** (*Metallschweißen mit inerten Gasen*). V případě práce s mědí (Cu) lze také k ochraně oblouku použít dusík (N_2).
- b) navařování v ochranné atmosféře aktivního plynu, jako je oxid uhličitý (CO_2) nebo směs oxidu uhličitého (CO_2) s argonem (Ar), kyslíkem (O_2) atd., tzv. **MAG** (*Metallschweißen mit aktiven Gasen*). Tato svařovací metoda se stala díky podstatně nižší ceně použitého plynu efektivní i pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí.
- c) Svařování trubičkovým drátem plněným speciálním tavidlem, které vytváří vlastní ochrannou atmosféru, se označuje jako **MOG** (*Metallschweißen ohne Gasen*). Nenařuje se však plnými dráty. Dráty jsou tvořeny kovovým pláštěm vyplněným tavidlem a legurami.

U metody MOG se navařují plněné trubičkové dráty, kde náplň při tavně vytvoří vlastní ochrannou atmosférou. Ochranná atmosféra zde vzniká rozkladem přísad z náplně uvnitř trubičky. Kromě vlastního ochranného plynu vytváří trubičkový drát při tavně také strusku, která slouží jako dodatečná ochrana při chladnutí svarového kovu. Struska se poté odstraňuje mechanicky. Jako u navařování MIG/MAG závisí i tato metoda na ochranném plynu, který chrání svarovou oblast roztaveného kovu. Při experimentu byl použit plněný trubičkový drát SK A 43 - O.

Obr. 7 Schéma svařování MIG/MAG



(1) směr svařování, (2) svařovací hořák, (3) svařovací drát, (4) ochranná atmosféra, (5) svarová lázeň, (6) ztuhlý svarový kov, (7) základní materiál

Zdroj: (www.wikipedia.org, 2005)

d) navařování pod tavidlem, (*submerged arc welding*) **SAW**, kdy se kontinuálně podáváný přídatný materiál (plněná elektroda, páska, nebo drát) v elektrickém oblouku odtavuje na základní materiál pod vrstvou tavidla, které chrání a zároveň i leguje a formuje návar. Při této metodě se používají jak tavidla tavená, tak i keramická a sintrovaná.

2.7.3 Navařování neodtavující se elektrodou – GTAW

Navařování elektrodou uhlíkovou

Navařování uhlíkovou elektrodou se již prakticky téměř neuvžívá. Avšak touto metodou je možné za jistých podmínek (tavidla, vhodný přídatný materiál a dalších pomůcek a doplňků) získat poměrně kvalitní návar.

Navařování atomické

Oblouk hoří mezi 2 wolframovými elektrodami nezávisle na základním materiálu, který není součástí proudového okruhu.

V žáru oblouku, – při použití střídavého zdroje proudu – se štěpí molekuly dvouatomového vodíku v jednotlivé atomy, což způsobuje odnímání tepla. Na okraji oblouku podkovovitého tvaru se atomy vlivem nižší teploty opět slučují v molekuly. Tím se znovu uvolňuje odňaté teplo a teplota okraje plamene dosahuje teploty 4 000 až 6 000 °C. Atmosféra vodíku chrání wolframové elektrody i natavený základní materiál. I když atomické svařování a tedy i navařování se již prakticky nepoužívá, je svým způsobem zajímavé, zejména pro navařování pro levný provoz (vodík, střídavý zdroj proudu) a možnost snadné regulace hloubky závaru. Snad se tento způsob dočká nového pojetí a dalšího vývoje. (Bajda, 2006)

Navařování elektrodou wolframovou v ochraně inertního plynu

V ČR a ve většině zemí EU se používá název WIG (*Wolfram Inert Gas Welding*), v anglosasky hovořících zemích TIG (*Tungsten Inert Gas Welding*) a v USA se používá zkratka GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*).

Je charakteristické tím, že elektrický oblouk se zapaluje mezi wolframovou (resp. Wolfram-thoriovou) elektrodou a základním materiálem elektrický oblouk, při čemž přídatný materiál (drát, tyčinka, prášek), je do oblouku dodáván nezávisle.

Tato metoda byla vyvinuta ve 40. letech obdobně jako svařování pod tavidlem, ovšem s jiným cílem. Byla určena především pro svařování hliníku (Al) a jiných silně reaktivních kovů, později se její použití rozšířilo i na slitiny železa (Fe) a další konstrukční materiály – korozivzdorné a jiné vysokolegované oceli a litiny mědi.

WIG je univerzální způsob používaný při ručním i automatickém svařování i navařování. Je to metoda, při které elektrický oblouk hoří mezi netavicí se wolframovou (W) elektrodou a základním materiálem, který je chráněn před účinky okolní atmosféry inertním (netečným) plynem – převážně Argonem (Ar), výjimečně Heliem (He), Dusíkem (N), nebo směsnými plyny (Ar-He, Ar-H₂) a přídavný materiál je do oblouku podáván samostatně (ručně nebo pomocí podávacího mechanismu). Délka oblouku je řízena regulátorem napětí.

Wolframová elektroda obsahuje zpravidla přísadu oxidu thoričitého (ThO₂ - max 2%), který výrazně zvyšuje termoemisi elektronů. Elektroda se tím lépe ochlazuje a snáší vyšší proudové zatížení. Thorium snižuje emisní energii, snese vyšší proudové zatížení a má vyšší (až o 1 000° C) pracovní teplotu. Je ale radioaktivní a proto bývá nahrazováno lanthanem. Konce elektrody je možno zbrousit do ostrého hrotu, oblouk je pak lépe soustředěn, klidněji hoří a hloubka závaru je větší.

I když pro tento proces je možno použít proudu střídavého i stejnosměrného, je pro navařování vhodnější proud stejnosměrný, kde je wolframová elektroda zapojena na (+) pólu a základní materiál na (-) pólu. Přestože úbytek elektrody je o něco větší, neboť (+) pól je teplejší. Výhodou je však mělký a širší závar a tím tedy menší podíl základního materiálu v návaru. Napětí na oblouku je přitom asi o 6V vyšší než u elektrody záporné. Při přímé polaritě je pak závar v základním materiálu hlubší a užší, což je vhodné pro spojovací svary. Ionty plynu zde putují opačně. To platí pro všechny kovy, s výjimkou hliníku (Al) a hořčíku (Mg). Povrch hliníku a hořčíku je pokryt více nebo méně kompaktní vrstvou nevodivých oxidů (např. Al₂O₃) o vysoké tavicí teplotě.

Pro hliník a hořčík je nutné použít buď stejnosměrného proudu s obrácenou polaritou, nebo stejnosměrný proud. V prvním případě se na základním materiálu vytvoří katodová skvrna, která se pohybuje a vyhledává místa pokrytá oxidy. Tato místa mají

nižší emisní energii pro emisi elektronů a po zasažení katodovou skvrnou se oxidy vypaří. Dalším efektem, který spolupůsobí, je proud kladných iontů plynu urychlovaný směrem ke svarové lázni. Dynamickým účinkem tohoto proudu dochází ke stažení vrstvy oxidů k okraji svarové lázně. Proud kladných iontů argonu, dopadající na povrch materiálu a žhavý katodový bod rychle se pohybující po povrchu plechu rozrušuje náhodně vrstvu a umožňuje svařovat bez tavidla – tzv. čistící účinek oblouku. Nedostatkem obrácené polarity je nedostatečná hloubka závaru.

Proto se v praxi spíše používá střídavý proud. V průběhu kladné polarity elektrody se povrch zbaví oxidů a v průběhu záporné polarity elektrody se materiál nataví do větší hloubky a elektroda se ochladí. Při svařování střídavým proudem vzniká zvláště při nižších proudech nestabilita oblouku, která způsobuje defekty ve svarech, případně zcela znemožňuje svařování. Proto je nutné oblouk stabilizovat vysokofrekvenčním vysokonapěťovým generátorem (napětí 2 500 – 5 000 V a o frekvenci 2 – 5 MHz) nebo pulzním generátorem s nízkou frekvencí.

Vlastnosti metody WIG:

Metoda WIG je málo produktivní, pro nízkou účinnost přenosu tepla (60%) a omezené proudové zatížení elektrody. Velmi dobrá je oproti tomu kvalita svaru. Protože nevzniká žádná struska, je sníženo na minimum riziko vměstků ve svarovém kovu a hotové svary nevyžadují žádné čištění. Na druhou stranu musí ale používaný ochranný plyn vykazovat předepsanou čistotu a musí proudit kolem elektrody vhodnou rychlostí. Při nedostatečném množství plynu může dojít k porušení ochranné atmosféry a ke styku vzduchu s tekutým kovem (optimální množství plynu bývá 10 – 20 l·min⁻¹). Při nedostatečné rychlosti proudění vzniká podtlak a ochranný plyn nabírá okolní vzduch, čímž se kvalita svaru snižuje. Plyn zároveň slouží k chlazení hořáků svařovacího zařízení do 150 A (zařízení pro vyšší výkon bývají chlazeny vodou).

Použití metody WIG:

Metodu WIG lze použít téměř pro všechny kovy a hodí se jak pro ruční, tak pro automatizované svařování. Nejvíce se užívá na svařování hliníku a nerezavějících ocelí. Největší uplatnění má v jaderné technice, kosmonautice a letecké technice, přístrojové

technice, chemickém a potravinářském průmyslu, všude tam, kde se vyžaduje zvláště vysoká čistota svaru. Metodou WIG lze dobře svařovat vysokolegované oceli, hliník, měď, nikl, hořčík, titan, aj.

Automatizace zařízení WIG nevede k zásadnímu zvýšení výkonu navařování, jen ke zvýšení kvality a rovnoměrnosti návarů. Automatizovaná zařízení jsou vybavena samočinným podáváním přídavného materiálu a programovatelným průběhem elektrického proudu. (Juříčka, I.)

Navařování WIG není obecně běžné a většinou se používá pro navařování antikoročních materiálů, kde základem je buď uhlíková, nebo ušlechtilá ocel, v některých případech také při navařování přídavnými materiály odolnými abrazivnímu, adheznímu i kavitačnímu opotřebení, též pak materiály odolávající zadírání při suvném tření. (Bajda, 2006)

2.7.4 Navařování plazmou

I když fyzikální (resp. Fyzikálně chemický) stav zvaný plazma, je znám velmi dlouho, jak názorně popisuje americký fyzik Langmuir, který v roce 1928 nazval plazmou stav plynu, který vedle neutrálních atomů a molekul obsahuje rovněž pozitivně a negativně nabitě částice – ionty a elektrony. Běžné plyny se při jejich ohřátí řídí klasickými fyzikálními a termodynamickými zákony. Plazma se však těmito zákony neřídí, takže mnozí vědci považovali tento stav za čtvrtý stav hmoty, odlišující se od tuhých, kapalných a plyných skupenství. Vytvoříme-li tedy v kontrahovaném prostoru mezi wolframovou (při použití vodního víru též uhlíkovou) elektrodou (katodou) a chlazenou tryskou (anodou) elektrický oblouk, okolo kterého vedeme zvolený plyn (argon, dusík, ale i vzduch nebo také například rotující vodní vír), vytvoří se plazmový oblouk, vyznačující se vysokou energetickou hustotou a teplotou (až 25 000 °C). Jestliže hoří tento plazmový oblouk jen mezi wolframovou katodou a chlazenou anodou, jde o hořák s nepřeneseným obloukem. V případě, že se kladný pól z trysky přenesení na vodivý materiál, jde o plazmou přenášený oblouk (angl. Plasma Transferred Arc, nebo-li PTA). Zatím co plazma s nepřeneseným obloukem se používá převážně pro žárové nástřiky, plazma s přeneseným obloukem PTA pak pro navařování, svařování a tepelné dělení kovů a slitin. Navařování PTA se uplatňuje zejména při návarech těsnicích ploch

průmyslových armatur, funkčních částí sklářských forem, dopravních šneků a dalších výrobků. Řezání kovů plazmou je dnes již zcela běžné i u menších firem, kde se používají plazmová řezací zařízení, většinou se vzduchovým médiem – tzv. vzduchová plazma.

2.7.5 Navařování laserem

Jde o speciální technologii, která vyžaduje vysoce kvalifikovaný personál. Je proto používána výrobními organizacemi, jejichž program vyžaduje využití této technologie při příznivých technických a ekonomických aspektech. Laser je zařízení, převádějící dodávanou energii na energii elektromagnetického záření. Termín laser je zkratkou z anglického – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesilování světla stimulovaným vyzařováním paprsků. V současné době pracují lasery v mnoha oblastech vědy a techniky, přičemž se používá řada typů laserů, lišících se konstrukčním uspořádáním a druhem aktivního prostředí. (Bajda, 2006)

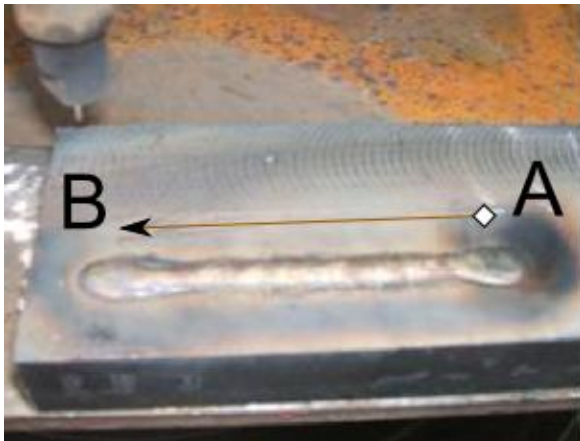
2.8 Vliv navařovacích parametrů na geometrii návarové housenky

2.8.1 Co je návarová housenka

Návarová housenka je zažitý výraz pro podlouhlý kovový návar, tedy plastické reziduum naneseného kovu elektrody, navařeného na základním materiálu, které vzniká metalurgickým tavným procesem. Podlouhlý tvar housenky je dán pojezdem tavící elektrody lineárním směrem od bodu A k bodu B.

Významným přínosem pro výzkum vlivů navařovacího procesu na geometrii, strukturu a kvalitu návarové housenky, byla práce Ishizakiho, viz „On the formation of the weld bead“ (Ishizaki, 1962) a „Interfacial tension theory of the phenomenon of arc welding-mechanism of penetration“ (Ishizaki, 1962)

Obr. 8 Návarová housenka na základním materiálu S235JR s vektorem nanášení



Obr. 10 Nanášení housenky elektrickým obloukem



Obr. 9 Vzorky 4 vyleštěných příčných řezů návarů, zalité do akrylátové pryskyřice

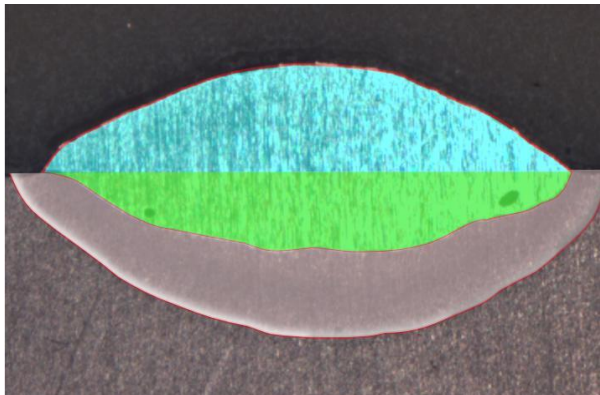


Obr. 11 Makrostruktura návarových housenek (vzorek 15.2 při zvětšení $\times 3,5$)



2.8.2 Co je geometrie návarové housenky a její promísení

Obr. 12 Znárodnění kvantifikovatelných oblastí návarové housenky

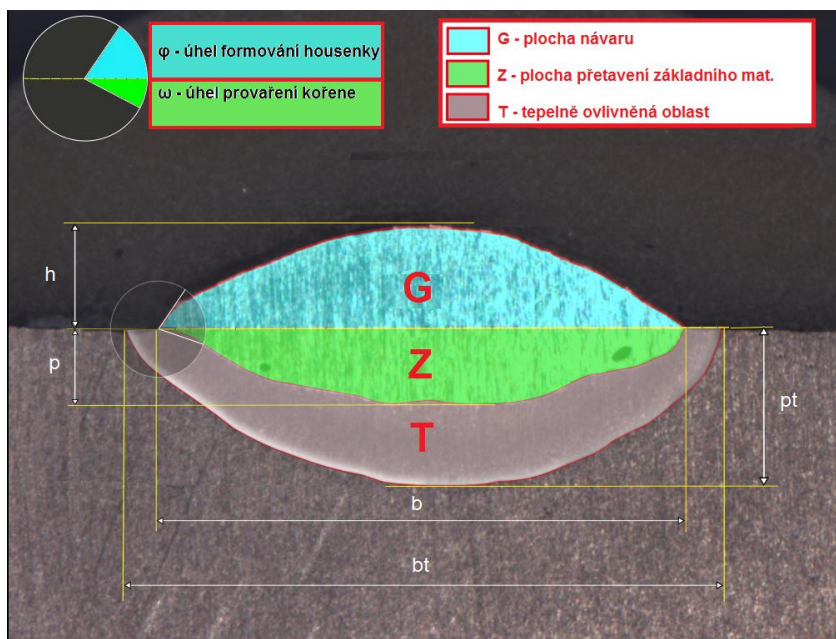


Obr. 13 Makrofotografie housenky bez popisu parametrů



Významné veličiny pro kvantifikaci údajů z geometrie návarové housenky jsou tyto: šířka návaru (b), šířka tepelně ovlivněné oblasti (b_t), převýšení návaru (h), průvar (p), výška návaru (h), hloubka tepelně ovlivněné oblasti (p_t), plocha přetaveného základního materiálu (Z) a plocha návaru (G), plocha tepelně ovlivněné oblasti (T), úhel formování housenky (φ) a úhel provaření kořene (ω).

Obr. 14 Schéma geometrických veličin návarové housenky



Důležitým kvantifikovatelným faktorem, který lze z geometrických veličin řezu návarovou housenkou odvodit analýzou vytvořených vzorků, je promísení základního a přídavného materiálu (D), kdy promísení je vyjádřeno jako podíl velikosti plochy přetaveného základního materiálu na celkové ploše příčného řezu navařené housenky.

—, v % pak: —

Obecně platí, že čím menší promísení a čím větší plocha návaru, tím lepší výsledek navařovacího procesu. Při navařování je cílem získat nejnižší hodnoty promísení a zároveň mít dostatečně pevný metalurgický spoj se základním materiálem, který nedopustí odloupení navařené vrstvy. Kombinací navařovacích parametrů lze docílit různých hodnot promísení. (Chotěborský & Navrátilová, 2011)

2.8.3 Vyhodnocování geometrie návarové housenky pomocí DoE

Geometrii návarové housenky je věnována v metalurgickém výzkumu patřičná pozornost, neboť její analýzou je možné posoudit kvalitu a efektivitu navařovacího procesu. Protože geometrie housenky může být ovlivněna několika jednotlivými samostatnými i interagujícími faktory, hledají se nejvhodnější matematické modely sloužící k předpovědi optimálního tvaru a kvality housenky, tak, aby bylo možné je jednoduše uplatňovat v praxi, zejména při automatizované (robotizované výrobě). Geometrie housenky se vyhodnocuje nejprve metalograficky, příčným řezem návaru se získá pohled do „vnitřního života“ housenky, viz . Se získanými daty lze následně provést analýzu statistickou, prostřednictvím systému analýzy variací (ANOVA) s metodou plánovaného experimentem – *Design of Experiment* (DoE).

Statistické plánování experimentů (DoE) je metoda využívaná především v předvýrobních fázích projektů, zejména při prototypových zkouškách, analytických simulacích a testování. Její využití lze nalézt i v jednotlivých výrobních etapách, třeba pro zvyšování účelnosti procesů a pro jejich efektivnější regulaci.

System plánovaných experimentů umožňuje posuzovat výrobní pochody z hlediska efektu faktorů na příslušnou odezvu. Je však jej možné také použít pro řešení a vytvoření modelu při technologickém zpracování či svařování (Chotěborský & Navrátilová, 2011).

Koncept DOE je založen na použití detailních plánů zkoušek, jejichž jednotlivé faktory jsou systematicky zkoumány. Cílem je dosáhnout požadovaných, nebo zadaných jakostních parametrů správným nastavením těchto faktorů. DoE využívá cílené změny vstupních faktorů a efektivně tak umožňuje odhad odezvy pomocí vhodných statistických metod. **Faktor neboli parametr**, je konkrétní nezávislou kontrolovatelnou vstupní návrhovou proměnnou ovlivňující zkoumaný systém, specifická charakteristická jakosti, tedy kvalita výstupu procesu. Její úrovně mohou být v průběhu experimentu libovolně upravovány. V tomto případě hovoříme o říditelných, nebo regulovatelných faktorech. Vedle toho mohou existovat i parazitní faktory, které jsou neříditelné (tzv. šumový faktor - je to faktor, který negativně ovlivňuje odezvu).

Faktory bývají značeny velkými tiskacími písmeny, (A, B, C atd.) a jejich úrovně pro experiment pak A1 (faktor A na první úrovni), A2 (faktor A na druhé úrovni), atd. Kvantitativní výsledky experimentu jsou reprezentovány tzv. odezvou. **Odezva** je veličina, která je proměnnou, závislou na vstupních proměnných (na parametrech) a může obsahovat jednu nebo více jakostních vlastností, které při experimentu zkoumány.

Působením více faktorů společně vzniká tzv. **Interakce**, která je kombinovaným účinkem dvou parametrů. V takovém případě je účinek jednoho parametru závislý na hodnotě nastavení druhého parametru. Interakce dvou faktorů je značena jako $A \times B$.

Návrhy experimentů se provádí pomocí tzv. ortogonální soustavy, matice, rozdělené vodorovně do řádků a svisle do sloupců. Každý řádek představuje podmínky pokusů s úrovněmi faktorů, které jsou označeny v jednotlivých řádcích. Čísla v jednotlivých sloupcích vyjadřují úrovně faktoru pro příslušné experimenty. (Jarošová, 2007)

Základním materiálem pro matematickou statistiku jsou data; která nesou informaci, kterou lze právě pomocí metod matematické statistiky vhodně zpracovat a

využít. Získávání dat v praxi je neméně důležitá část, neboť ze špatných dat nelze učinit věrohodné závěry ani s pomocí těch nejlepších statistických postupů. Jakým způsobem data získávat a jak připravovat jejich sběr, se věnuje jedna z oblastí matematické statistiky, a to navrhování statistických experimentů. Jedná se o oblast, jejímž obsahem je metodologie efektivního navrhování experimentů, z nichž lze získat skutečně objektivní závěry o sledovaných veličinách. Pokud získávání informací o sledovaných veličinách je zatíženo náhodnými chybami, tak zpracování dat metodami matematické statistiky je de facto jediný objektivní přístup k vyhodnocení informace v datech obsažené.

Navrhování statistických experimentů se skládá ze dvou hlavních částí, a to z vlastního plánu experimentu a pak ze statistického vyhodnocení plánu, které bezprostředně závisí na návrhu plánu. Základem navrhování experimentů jsou dva principy, a to replikace a randomizace. Pod replikací se míní opakování experimentu.

Toto opakování experimentu přináší experimentátorovi velice důležitou informaci o chybě experimentu a za druhé aritmetické průměry díky menším rozptylům dávají lepší odhady efektů jednotlivých faktorů, které jsou součástí experimentu.

Randomizace je základní kámen, na kterém je založeno použití statistických metod pro vyhodnocování naměřených dat. Randomizace zaručuje, že rozložení experimentálního materiálu a pořadí, v jakém bude prováděno měření, jsou náhodná.

Při aplikaci statistických metod se totiž vychází z předpokladu vzájemné nezávislosti jednotlivých měření, což lze právě zaručit s pomocí randomizace. Pomocí randomizace se též potlačuje dopad možných systematických vlivů, které se mohou projevit během experimentu.

Vyhodnocování navrženého experimentu končí rozhodnutím o existenci či neexistenci vlivu zkoumaných faktorů na sledované veličiny. Experimentem nazýváme ucelený souhrn pokusů či měření uspořádaných dle určitého schématu, kde právě uspořádání tohoto schématu je určujícím rysem. Pokusem se míní jedna zkouška či měření provedené při určité kombinaci úrovní jednotlivých faktorů, jejichž vliv se sleduje. Výsledek pokusu je konkrétní hodnota sledované náhodné veličiny též zvané závislá

proměnná či odezva, která je obvykle charakteristikou jakosti. Na jakost výrobku působí celá řada různých veličin, které lze z hlediska navrhování experimentů rozdělit na náhodné a vymezitelné. Vymezitelnými veličinami (těmi explicitními) míníme hlavně vstupy do výrobního procesu. Těmto se v navrhování experimentů říká faktory. Náhodné vlivy (implicitní veličiny) způsobují variabilitu výsledků a jsou všudypřítomné. Faktorem je např. teplota, koncentrace, druh materiálu, dodavatel apod. Faktory mohou být kvantitativní či kvalitativní. Varianta faktoru vyjádřená buď číselně u kvantitativního faktoru či slovně u kvalitativního faktoru se nazývá verze faktoru. Když se sleduje vliv několika faktorů najednou, měření se provádějí pro různé kombinace jednotlivých verzí faktorů. Replikace tedy znamená opakování pokusu při zachování kombinace verzí faktorů. V některých případech jsou jednotlivé pokusy či měření uspořádány do bloků; což jsou podčásti celého experimentu, které mají nějaké, většinou přirozené či logické, opodstatnění.

Většinou se předpokládá, že variabilita měření uvnitř bloků je nižší nežli variabilita mezi bloky. Vliv faktoru se číselně vyjadřuje jako efekt faktoru, tj. rozdíl hodnoty odezvy odpovídající různým verzím faktoru. Faktory mohou být buď pevné či náhodné, když verze faktoru jsou náhodně vybrány z množiny všech možných verzí faktoru. My se budeme především zabývat návrhy experimentů s pevnými faktory, protože tento přístup je v praxi nejčastější.

Experiment se provádí postupně, v několika cyklech; v první řadě je nejdůležitější vyhledat nejpodstatnější faktory, které ovlivňují úroveň jakosti výrobků (screening).

Po získání určitých informací se experiment opakuje již s vyloučením faktorů, které minimálně ovlivňují úroveň jakosti s novými verzemi klíčových faktorů; popřípadě i s novými faktory.

Dobrý návrh experimentu umožní rozdělit celkovou variabilitu odezvy na jednotlivé složky vyvolané působením jednotlivých faktorů, interakcí a rušivých složek a posoudit tak významnost jednotlivých příčin.

Každý experiment lze rozdělit na následujících fází:

1. analýza procesu,
2. návrh experimentu,
3. provedení zkoušek ve stanoveném pořadí,
4. analýza výsledků,
5. závěry.

První věcí, kterou je v první fázi experimentu nutno provést, je volba odezvy, která je buď přímo charakteristikou jakosti procesu či s ní úzce souvisí. Odezva je buď spojitá náhodná veličina či diskrétní, udávající počet neshod či neshodných jednotek. Dále je nutno rozhodnout, které faktory budou zahrnuty do experimentu a jaké úrovně faktorů zvolíme.

V první cyklu experimentu zařadíme do něj všechny faktory, jestliže se omezíme pouze na faktory statisticky významné. Jednotlivé úrovně faktorů volíme tak, aby skutečně bylo měřitelné rozlišení vlivů úrovní na odezvu. Není-li možno udržet faktor konstantní s pouze nepatrnými změnami během experimentu, je nutné jej považovat za blokový faktor, resp. za náhodný.

Pak přichází vlastní návrh experimentu. Existuje celá řada návrhů experimentů a nutno se řídit jednak časovou náročností a finanční náročností tak, aby navrhovaný experiment byl vhodným kompromisem všech omezujících veličin.

Pokud jsou jednotlivé pokusy rozděleny do bloků, je předpokládáno, že uvnitř bloků pokusy vykazují větší homogenitu a nižší úroveň variability, nežli panuje mezi bloky. Cílem randomizace čili znáhodnění je zabránit směšování nějakého rušivého vlivu s působením zkoumaných faktorů či bloků. Příkladem znáhodnění je náhodný výběr, pořadí pokusů, náhodný výběr materiálu pro pokusy z jedné dávky. Když experiment probíhá v blocích, provádí se znáhodnění v rámci každého bloku.

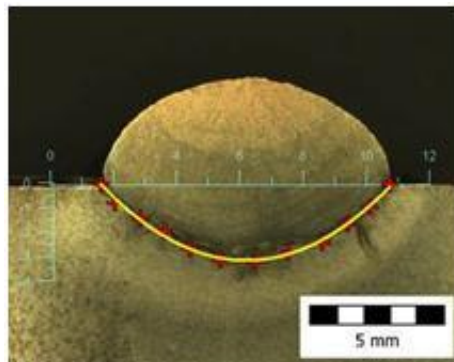
Zkoušky či měření se provedou ve stanoveném pořadí a výsledky se zaznamenávají dle předem připravených formulářů či s pomocí softwaru.

Analýza výsledku úzce souvisí s formou navrženého experimentu. Provádí se vyhodnocování vlivu jednotlivých faktorů a jejich společného působení (interakcí). Cílem analýzy je vybrat ty faktory, které mají statisticky významný vliv na úroveň kvality. K tomu se používají metody testování hypotéz (t -test; F -test), metody analýzy rozptylu či kovariance, regresní analýzy, optimalizační metody apod.

Ze závěru experimentu by mělo vyplynout, které faktory či interakce mezi faktory mají rozhodující vliv na úroveň kvality, které úrovně rozhodujících kvantitativních znaků vedou k optimální hodnotě odezvy a naopak, které faktory, jsou irelevantní, takže u nich lze zmírnit např. tolerance, a tak snížit náklady. (Michálek, 2007)

Centrální kompozitní systémy pro získávání informací o vlivu navařovacích parametrů na geometrii návarů a mechanických vlastností umožní vytvořit velmi přesné modely, neboť všechny prediktory jsou spojité fyzikální veličiny, které mohou být úspěšně využity při návrhu vrstev a optimalizaci výroby návarových vrstev z hlediska produktivity práce s cílem získat nejvyšších užitečných vlastností návarů. Vypracované modely lze samozřejmě využívat nejen v aplikačních výstupech, ale také jako podklad pro další modelování a experimentální zkoušky. (Chotěborský & Navrátilová, 2010)

Obr. 15 Metalografický řez návarovou housenkou



Zdroj: (Chotěborský & Navrátilová, 2010)

Z makrofotografií experimentálně získaných vzorků jsou pak získávána klíčová data o morfologii housenky. Takto získaná data lze poté vyhodnocovat statisticky a z takto kvantifikovaných veličin lze vyvozovat pomocí statistických funkcí modely, umožňující predikci vlivu navařovacích parametrů na výsledek svařovacího procesu.

Kombinací navařovacích parametrů lze dosáhnout různých hodnot promísení. Při vhodně nastavených navařovacích parametrech s nízkou hodnotou promísení, je totiž možné získat stejnou strukturu návarové vrstvy s použitím levnější elektrody s nižším množstvím legur, jako s použitím vysoko-legované, zpravidla mnohem dražší elektrody, pod méně vyhovujícími navařovacími parametry, které způsobí vysokou hodnotu promísení.

Poznání těchto souvislostí může vést ke zvýšení kvality a efektivity výroby a snížení výrobních nákladů. To má reálný dopad na širokou škálu významných průmyslových odvětví, ve kterých je uplatňována povrchová úprava kovů navařováním. (Chotěborský, Abdul Hamidová, Navrátilová, & Hrabě, 2010)

2.8.4 Vědecký výzkum

Vyhodnocováním vlivu navařovacích parametrů na geometrii návarové housenky a na promísení materiálu se proto dnes věnuje, velká pozornost vědecké komunity celého světa. Výzkum se především zaměřuje na pochopení souvislostí mezi navařovacími parametry a konečnou kvalitou návaru. Mnoho dostupných studií se zaměřuje také na modely predikce a tím automatizace a robotizace navařovacích procesů. Akademické výstupy mají často dopad na konkrétní optimalizaci a racionalizaci výroby, které lze posléze nalézt i v patentových registrech. Součástí zde předložené diplomové práce, je proto i výzkum současného stavu poznání o interakcích vstupních a výstupních faktorů navařování a pokusů o předpověď těchto souvislostí pomocí matematických modelů s patřičnými odkazy na konkrétní vědecké publikace k tomuto tématu. V závěru předložené diplomové práce budou data získána prostřednictvím literární rešerše porovnána s výsledky dosaženými experimentálně v rámci vlastního výzkumu.

Begeman et al. (Begeman, Amstead, & Mashruwala, 1950) publikovali studii o efektech navařovacích parametrů na geometrii housenky při sníženém atmosférickém tlaku. Bylo pozorováno, že šířka a výška návaru byla vyšší při obrácené polaritě, než při polaritě přímé a že šířka housenky se zvyšuje úměrně k množství dodávané energie.

Apps et al. (Apps, Gourd, & Lelson, 1963) publikovali výsledky svých studií na téma navařování pod tavidlem o tom, že různé parametry navařování, jako proud, napětí, rychlost navařování a polarita ovlivňují tvar a velikost návarové housenky.

Gurev and Stout (Gurev & Stout, 1963) pozorovali, že při navařování metodou MIG je šířka housenky tím větší, čím větší je dodáváno teplo, tj. čím nižší je rychlost navařování, nebo čím vyšší je elektrický proud. Studie taktéž poukazuje na souvislost mezi záparem housenky⁶ vysokou rychlostí svařování. Autoři také studovali efekt vlastností přenosu materiálu na geometrii housenky. Při sprchovém přenosu vedlo vyšší napětí k větší šířce housenky, ale zároveň k významnému snížení výšky, průvaru a převýšení návaru. Bylo taktéž zjištěno, že hloubka průvaru se zvyšuje se zvýšením proudu, ale snižuje se při snížení napětí a že se také zvyšuje se snížením rychlosti navařování na minimální hodnotu, která závisí na síle oblouku.

Christensen et al. (Christensen, de Davies, & Gjermurdsen, 1965) dospěli ve své studii k závěru, že plocha příčného řezu návarové housenky má vztah k teplu dodanému základnímu materiálu, které je tvořeno napětím oblouku, proudu a rychlostí navařování.

El Rayes, et al.: (El Rayes, Walz, & G., 2004) použili kombinaci dvou metod navařování na jeden základní materiál, (GMAW) a Laserové (LBW), aby zjistili vliv obou technologií na geometrii návarové housenky. Touto hybridní technologií lze docílit hlubšího průvaru, větší šířky housenky a vyšší navařovací rychlost, než jednotlivými technologiemi. Studií byl prokázán mj. vztah mezi výkonem oblouku na jedné straně a šířkou housenky, hloubkou průvaru a převýšením návaru na straně druhé. Zvýšením výkonu oblouku se zvyšuje šířka housenky, ale snižuje jak průvar, tak i převýšení návaru.

Thao, et al.: (Thao, Jeong, Kim, & Kim, 2008) zkoumali vliv navařovacích parametrů na geometrii housenky za účelem určení vhodného matematického modelu předvídatelnosti pomocí analýzy variance (ANOVA). Parametry navařování byly tyto: svařovací napětí (U), obloukový proud (I) a vzdálenost elektrody

⁶ „Rýha, natavená do základního materiálu, přiléhajícího ke svarovému kovu a nevyplněná svarovým kovem.“ (Cunat, 2007)

Manonmani, et al.: (Manonmani, G., & Buvanasekaran, 2007) ve své studii navařování pomocí LASERU (LBW), zkoumali hloubku průvaru, šířku housenky a plochu přetavení základního materiálu (průvaru) a zjistili, že se jejich hodnoty snižují se zvýšením navařovací rychlosti. S vyšší navařovací rychlostí se mírně zvětšila hloubka průvaru a plocha přetavení základního materiálu, v důsledku svařování průchozím svazkem (*keyholing*).

Dále bylo konstatováno, že změna v šířce housenky byla minimální a není nijak zásadně ovlivněna výkonem oblouku, rychlostí navařování a úhlem sklonu elektrody. Efekty interakcí různých vstupních parametrů na geometrii housenky byly demonstrovány pomocí prostorových grafů.

Nouri et al.: (Nouri, Abdollah-Zadehy, & Malek, 2007) pozorovali efekt navařovacích parametrů při pulzním navařování MIG na promísení a geometrii návarové housenky při navařování. Šířka, a výška housenky, hloubka průvaru a míra promísení se zvyšuje se zvýšením rychlosti podávání drátu, přičemž se úhel formování housenky nejprve snižuje a po dosažení minimální hodnoty se zvyšuje. Šířka a výška housenky, hloubka průvaru a úhel formování se zmenšuje se zvýšením rychlosti navařování, ale míra promísení narůstá. Rychlost podávání drátu a rychlost navařování mají interaktivní efekty na úhel formování housenky. Míra promísení se zvyšuje o cca 6% a úhel formování se zmenšuje o cca. 7° při zmenšení výletu drátové elektrody. Jeví se, že navařování doleva nemá významný efekt na promísení, ale snižuje úhel formování housenky průměrně o 6°.

Kim, I, S., et al.: (Kim I. S., 2003) provedli experiment na základě 2- úrovněového faktoriálního návrhu s pěti parametry procesu pro geometrii návarové housenky za použití navařovacího procesu MAG. Použita byla analýza rozptylu (ANOVA) pomocí které byly identifikována síla vlivů hlavních parametrů procesu a jejich interakcí. Lineární modela a regresní analýza v SPSS sloužila k dosažení lineárních, kvadratických a interakčních modelů, jejichž spolehlivost byla prověřena pomocí experimentálních dat. Grafické výstupy statistického zpracování ukázaly efekty parametrů procesu a jejich interakce na geometrii návarové housenky. Vyvozeny byly následující poznatky: je možné získat empirické modely predikce geometrie návarů touto cestou v rámci

použitelných mezí. Interakce napětí a proudu, vzdálenosti průvlaku od navařovaného povrchu a úhlu navařování také představuje významný efekt na geometrii návaru. Interaktivní modely měly větší hodnotu spolehlivosti a lepší schopnost předpovědi, než modely lineární a kvadratické. SPSS pro Windows může být vhodně použito pro DoE za účelem optimalizace procesu navařování.

D.S. Nagesh a G.L. Datta (Nagesh & Datta, 2002) zkoumali použitelnost matematického modelu známého z jako „*artificial neural network*“ (ANN) pro predikci optimální geometrie a promísení návarové housenky.

Tuto metodu použili taktéž **Abdullah Al-Faruk, Md. Abdul Hasib, Naseem Ahmed, a Utpal Kumar Das** (Al-Faruk, Hasib, Ahmed, & Das, 2010).

J.P. Ganjigatti, Dilip Kumar Pratihar, A. Roy Choudhury (Ganjigatti, Pratihar, & Choudhury, 2007) použili „Regression analysis“; Global approach; Cluster-wise regression

Farhad K., a Heidari M. (Kolahan & Heidari, 2009) navrhují modelování a optimalizaci geometrie návarové housenky tvořené procesem MIG. Vzhledem ke složitému vztahu mezi vlastnostmi geometrie návaru a navařovacími parametry, byla pro modelování procesu použita metoda založená na regresi. Experimentální data připravená pomocí metody ANOVA+DoE a regresní analýzy, byla ověřena různými matematickými modely, které popisovaly vztahy mezi vstupními a výstupními faktory. Výsledky analýzy rozptylu ukázaly, že kvadratické modely reprezentovaly použitý navařovací proces MIG nejlépe. Pro nejlepší matematický odhad výsledků v porovnání s experimentálními daty se osvědčila metoda simulovaného žíhání (SA).

Chotěborský R., Navrátilová M. (Chotěborský & Navrátilová, 2011) dospěli k závěru, že je možné provádět postup plánovaných experimentů při popisu vlivu navařovacích parametrů na promísení návarové housenky se základním materiálem. Odezvu – promísení je možné vyhodnotit podle postupů regrese odezvové plochy, čímž se získá model pro predikci promísení návarové housenky v závislosti na navařovacích parametrech. Z toho vyplývá, že navařovací proud i rychlost navařování v experimentálně posuzovaných mezích nastavených hodnot zvyšují promísení

návarové housenky se základním materiálem. Použitý model má dostatečnou přesnost pro optimalizaci navařovacího procesu. Proto lze centrálně kompozitních návrhy experimentů využít pro stanovení vlivu navařovacích podmínek na mechanické vlastnosti návaru a jejich optimalizaci.

Další autoři, kteří nemalým dílem přispěli k lepšímu poznání problematiky a kterých studie byly v rámci této diplomové práce zkoumány, jsou tito:

Correia, D. S., et al.: (Correia & al., 2005) Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 160, 2005: 70-76.

Ganjigatti, J. P., et al.: (Ganjigatti, Pratihar, & Choudhury, 2007) Global versus cluster-wire regression analyses for prediction of bead geometry in MIG welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 189, 2007: 352-366.

Kacar, R., Kokemli, K.: (Kacar & Kokemli, 2005) Effect of controlled atmosphere on the MIG-MAG arc weldment properties, *Materials and Design*, 26, 2005: 508-516.

Kanti, K. M., Rao, P. S.: (Kanti & Rao, 2008) Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network. *Journal of Materials Processing Technology*, 200, 2008: 300-305.

Karaoglu, S., Secgin, A.: (Karaoglu & Secgin, 2008) Sensitivity analysis of submerged arc welding process parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 202, 2008: 500-507.

DuPont, J. N., Marder, A. R.: (DuPont & Marder, 1996) Dilution in single pass arc welds, *Metallurgical and materials transaction B*, 27B, 1996: 481-489.

Jejich přínosné poznatky zde nebudou dále rozváděny detailně. Další vědecké studie nicméně poslouží k porovnání výsledků této diplomové práce s výsledky dosaženými a zveřejněnými v odborných publikacích, v oddílu “Shrnutí výsledků pozorování” v následující kapitole.

3. Metodika experimentální části práce

3.1 Úvod experimentální části

Charakteristika návarů, jako je průvar, geometrie návarové housenky, hloubka tepelně ovlivněné oblasti, jsou velmi důležitými ukazateli strukturální integrity výrobku. Proces navařování elektrickým obloukem je běžně používanou a oblíbenou technologií pro svoji jednoduchost a flexibilitu. Průměr elektrody, síla elektrického napětí, velikost proudu, rychlost elektrického oblouku, rychlost podávání drátu, délka oblouku, forma přenosu přídavného materiálu, polarita elektrody, to všecko jsou důležité faktory, které ovlivňují výslednou podobu návaru. V případě experimentu, prováděného v rámci předložené diplomové práce, byl zkoumán vliv některých těchto parametrů svařovacího procesu, takzvaných navařovacích parametrů, konkrétně navařovacího napětí (U) a proudu (I), rychlosti posuvu drátu (v) a vzdálenosti průvlaku od základního materiálu (M) na geometrii návarové housenky. Experiment byl proveden vytvořením 30 vzorků návarových housenek na ocelových polotovarech, za působení různých parametrů. Housenky byly příčně rozřezány, průřezy byly vyleštěny a vyhodnoceny. Následně byla mapována geometrie jednotlivých vzorků. Charakteristika geometrie návaru byla pro účely tohoto experimentu vymezena šířkou návaru, tepelně ovlivněné oblasti, promísení, úhly formování housenky a provaření kořene, plochou a výškou návaru, průvarem, hloubkou tepelně ovlivněné oblasti a plochou přetaveného základního materiálu.

3.2 Použitý materiál a postup

Nastavení a vyhodnocení experimentu bylo provedeno s využitím programu STATISTICA 9 s doplňkem DoE s navařovacími parametry:

2^4 centrálně kompozitní, $nk=16$ $nh=8$ $n0=2$ pokusů=26 (nk -základní body, dvouúrovňové, nh -hvězdicové body, $n0$ -centra).

Tab. 5 Navařovací parametry

Parametry	Veličina	Jednotka
Pracovní napětí	U	[V]
Svařovací proud	I	[A]
Svařovací rychlost	v	[cm/min]
Vzdálenost průvlaku	N	[mm]
Svařovací úhel	A	[°]

Pro přípravu 30 (24 + 6 centrálních) vzorků návarové housenky byl použit jako přídatný materiál trubičkový drát SK A 43 – O (MF10-GF-65-G) s vlastní ochranou, vykazující karbidy ve svaru o tvrdosti 64 HRC, od výrobce Soudokay (Böhler Welding Group) s průměrem 1,6 mm.

Tab. 6 Elektroda použitá v experimentální části diplomové práce

TRUBIČKOVÉ DRÁTY PROTI VELMI SILNÉMU OTĚRU A OTĚRU ZA VYŠŠÍCH TEPLOT				
Typ elektrody:	Kategorie:	Chemické složení:	Popis:	Použití:
SK A 43 – O MF10-GF-65-G	karbidy ve svaru tvrdosti 64 HRC	C 5,60% Mn 0,20% Si 1,30% Cr 20,2% Nb 6,70% Fe základ	Trubičkový drát s vlastní ochranou pro navařování dílů značně opotřebovaných otěrem při středních rázech až do teplot 450°C.	mlecí desky sintrovacích zařízení, vyhrnovače popela, drtiče strusky, drtící válce, mlátící lišty, zařízení pro odstranění okují, pískové tryskače, díly sacích bagrů, nože srovnávacích pásů, míchače, šnekové dopravníky, šnekové lisy, míchací vrtule.

Zdroj: (Böhler Welding Group)

Tab. 7 Značení použité elektrody Soudokay SK A 43 – O podle normy ČSN EN 14700

T Z Fe 15

Leg.	použití	C	Cr	Ni	Mn	Mo	W	V	Nb	ostatní	Zbytek
Fe 15	G	4,5-5,5	20-40	<4	0,5-3	<2	---	---	< 10	B	Fe

Vysvětlivky: **T** – Trubičkový drát nebo elektroda, **Z** – žáruvzdorný (do 500°C),
G – odolný abrazi, **B** – bor (atomové číslo Z = 5), **Fe** – železo (Z = 26)

Zdroj: (Herman, 2006)

Tab. 8 Charakteristika materiálu použité elektrody podle normy ČSN EN 14700

Leg.	Prostředí							Tvrдость	
	Mechanické		Tepelné		Koroze	Odolnost vůči trhlinám	Obrobitelnost	HB	HRC
	Abraze	Rázy	Vysoká teplota	Tepelné šoky					
Fe 15	1	4	2	4	3	4	4	---	55-65

Vysvětlivky:

Použitelnost a obrobitelnost: **1** – velice dobrá, **2** – dobrá, **3** – vyhovující, **4** – nevhodná

Zdroj: (Herman, 2006)

Z tohoto drátu byly navařeny housenky o délce 90 mm technologií navařování elektrickým obloukem s obrácenou polaritou, bez přehřevu na základní materiál, kterým byla vyraženým číslem označená (acetone a perchlorethylenem) očištěná a odmaštěná deska z konstrukční oceli S235JR o rozměru 20 mm x 50 mm x 300 mm.

Tab. 9 Chemické složení použitého základního materiálu – ocel S235JR (v %)

C	Ni	Mn	Cu	S	P
0,08	0,03	0,33	0,03	0,008	0,002

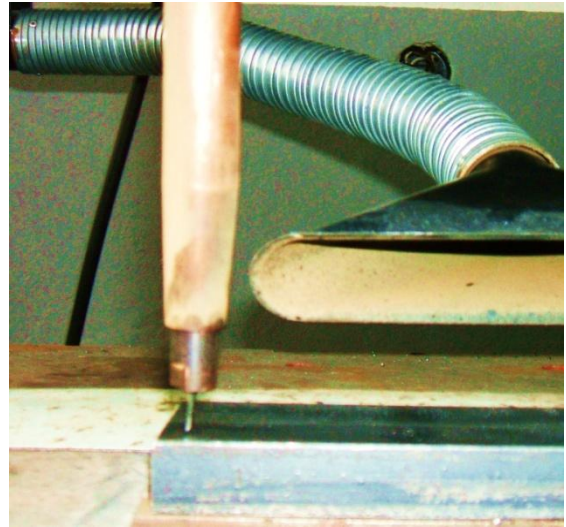
Metoda určování GD-OES

K navařování housenek byl použit svařovací automat “ESAB A2 S Mini Master” a polohovadlo pro navařování a svařování. Zařízení je součástí vybavení technických laboratoří ČZU

Obr. 16 Svařovací automat “ESAB A2 S Mini Master” s polohovadlem



Obr. 17 Detail svařovacího hořáku, základního materiálu a odsávací trubice



Jednotlivé housenky byly navařovány za použití rozličných randomizovaných (znáhodněných) kombinací navařovacích parametrů, v předem stanoveném pořadí, podle předem určené tabulky, viz příloha A.

Po navaření housenek na ocelové desky byly tyto příčně rozřezány rozbíječnými kotouči na jednotlivé zkušební vzorky. Po nařezání a rozměrové úpravě byly jednotlivé vzorky zality do akrylátové pryskyřice. Pro metalografický výbrus byly použity disky MD: diamantovým disk *MD 220*, *MD allegro*, *MD plus* a *MD chem* s příslušnou velikostí diamantové brusné frakce a lubrikantu. Závěrečné leštění probíhalo na disku *MD chem* s lešticí suspenzí *OP-S*.

Obr. 18 Akrylátová pryskyřice v nádobkách na vzorky

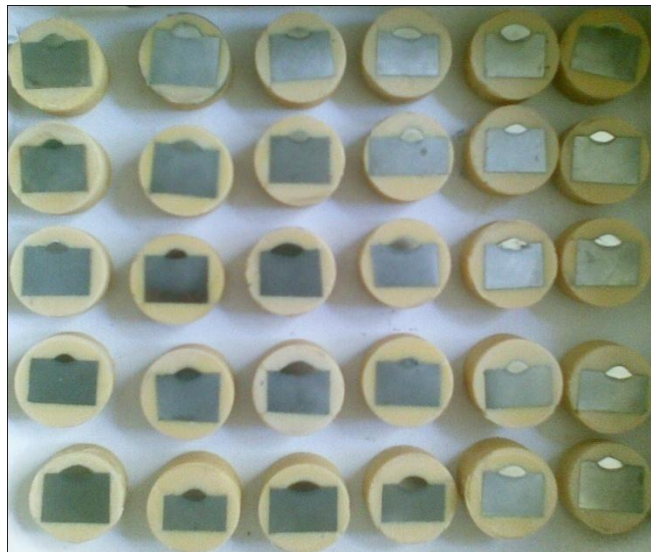


Obr. 19 Leštění vzorků na kotouči



Další fází přípravy vzorků pro metalografickou analýzu bylo jejich leptání roztokem 2% HNO_3 (Nital). Jednotlivé strukturální fáze reliéfu vzorků jsou touto technikou patřičně zvýrazněny.⁷

Obr. 20 Vyleštěné a naprahované vzorky (30 ks)



⁷ Maximálního kontrastu, je možné dosáhnout v takovém případě, kdy má povrchový film při vysoké transparentci i vysoký index lomu, který zvětšuje rozdíly v intenzitě a i ve fázovém posuvu světelných vln, které jsou odražené jednotlivými strukturálními složkami., což se projeví v jejich rozdílném zbarvení (Skočovský & Šiman, 1989).

K vyhodnocení vzorků byl použit Stereo mikroskop, osazený kalibrovanou snímací digitální kamerou *Artcam – 300 MI*, zvětšení $\times 3,5$. Mapování a měření geometrie návarové housenky bylo uskutečněno pomocí obrazové analýzy artefaktu, programem *QuickPhoto Industrial* (Olympus), prostřednictvím kterého lze přímo ovládat digitální kameru a provádět živé zpracování obrazu. Tento program byl speciálně vyvinut pro účely analýzy fotografií a umožňuje snadné zpracování a kalibraci obrazu, měření ploch, obvodů, délek, úhlů a fází v něm obsažených. Snímky všech 30 vzorků byly digitálně uloženy (viz příloha D) a výsledky měření geometrie návarové housenky byly zaznamenány do připravené tabulky, (viz příloha B) a do datových souborů pro účely statistického vyhodnocení. Touto cestou byla získána série dat, která vyjadřovala různé odchylky v geometrii příčného řezu návarovou housenkou mezi jednotlivými vzorky v závislosti na nastavených navařovacích parametrech. Vliv navařovacích parametrů (U), (I), (v) a (M) na jednotlivé veličiny geometrie housenky a na míru promísení přídavného materiálu se základním materiálem má být zjištěn a vyhodnocen tak, aby bylo možné, dané souvislosti posoudit pomocí vybraného matematického modelu, centrálně kompozitního systému, pro spolehlivou predikci a optimalizaci.

Za tímto účelem je nezbytné naplánovat vhodný model plánovaného experimentu. Standardní experiment počítá minimálně se 3 úrovněmi každého experimentálního faktoru, které ovlivňují variabilní odezvu. V případě navařování, pokud by měli být zohledněny veškeré parametry s předpokládaným vlivem, by těchto faktorů bylo více než 11. Bylo by v tomto případě nutné provést 177 147 experimentů, což je nereálné. Některé faktory lze považovat za konstantní, zvláště v případě, kdy je k dispozici pouze jeden druh elektrody a základního materiálu, poté je možné posuzovat vliv pouze navařovacích parametrů. I přes toto omezení je nutné provést experiment pro 5 faktorů, tedy 243 experimentů bez opakování. S použitím systému plánovaného experimentu (Design of Experiment), a využitím centrálně kompozitního systému je možné počet experimentů významně snížit (Chotěborský & Navrátilová, 2011).

Pro grafické vyhodnocení je možné použít Paretův graf standardizovaného odhadu efektu, v němž je již vyznačena referenční hodnota pro posuzování důležitosti efektů a hladině významnosti $p = 0,05$.

4. Výsledky experimentu a jejich diskuze

Za pomoci programu STATISTICA byly zjištěny hodnoty hledaných parametrů a vypracovány odhady efektů na zkoumané veličiny. Níže je uveden příklad kompletních vlivů efektu, viz Tab. 10, zbylé tabulky jsou uvedeny v příloze C.

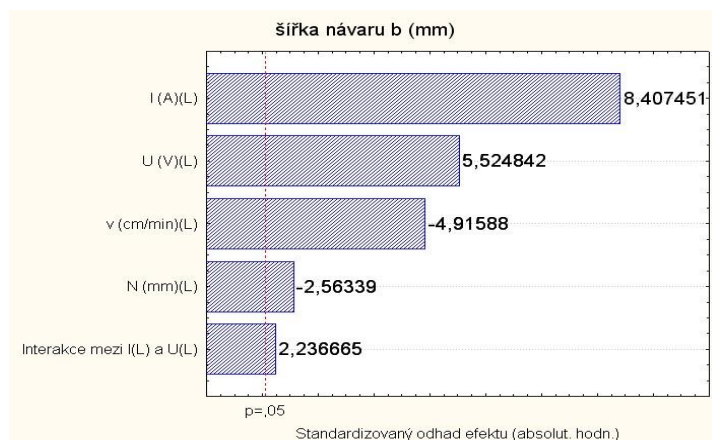
Hodnota spolehlivosti R^2 je index determinace, který posuzuje kvalitu regresního modelu. Tento koeficient determinace R^2 udává procento, jakým je rozptyl hodnot závislé proměnné veličiny (výstupní parametry) ovlivněn změnami hodnot nezávislé proměnné veličiny (vstupních parametrů). Koeficient nabývá hodnot od 0 do 1. Čím je koeficient determinace R^2 vyšší, tím je model kvalitnější.

Tab. 10 Odhady efektů pro šířku návaru b

Odhady efektů; R-kv.=0,85088; Upr:0,81982 (tabulka hodnot) 4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =0,4056233 Šířka návaru b (mm)				
Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(24)	p
Průměr/ab.č.	9,07450	0,116279	78,04084	0,000000
(1)U (V)(L)	1,43650	0,260007	5,52484	0,000011
(2)I (A)(L)	2,18600	0,260007	8,40745	0,000000
(3)v (cm.min-1)(L)	-1,27817	0,260007	-4,91588	0,000051
(4)N (mm)(L)	-0,66650	0,260007	-2,56339	0,017056
1L * 2L	0,71225	0,318443	2,23667	0,034863

4.1 Šířka návaru b

Graf 1 Paretův standardizovaný odhad efektu na šířku návaru b (mm), ($R^2 = 0,85088$)



Výsledky: Z uvedeného grafu (Graf 1) vyplývá, že na šířku návaru b (mm) má největší přímý vliv navařovací proud I (A), tento efekt je kladný, což znamená, že se zvyšujícím se navařovacím proudem I (A), se zvětšuje šířka housenky. (Přímá úměrnost)

Navařovací napětí U (V) má lineární přímý efekt, který je kladný. Vliv napětí U , je nižší než vykazuje navařovací proud I (A). Z toho vyplývá, že se zvyšujícím se napětím, se zvětšuje šířka housenky. (Přímá úměrnost)

Rychlost navařování v ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) má lineární efekt, který je záporný. Rychlost navařování je třetím nejvýznamnějším faktorem. To znamená, že se zvyšující se rychlostí navařování se housenka zmenšuje.

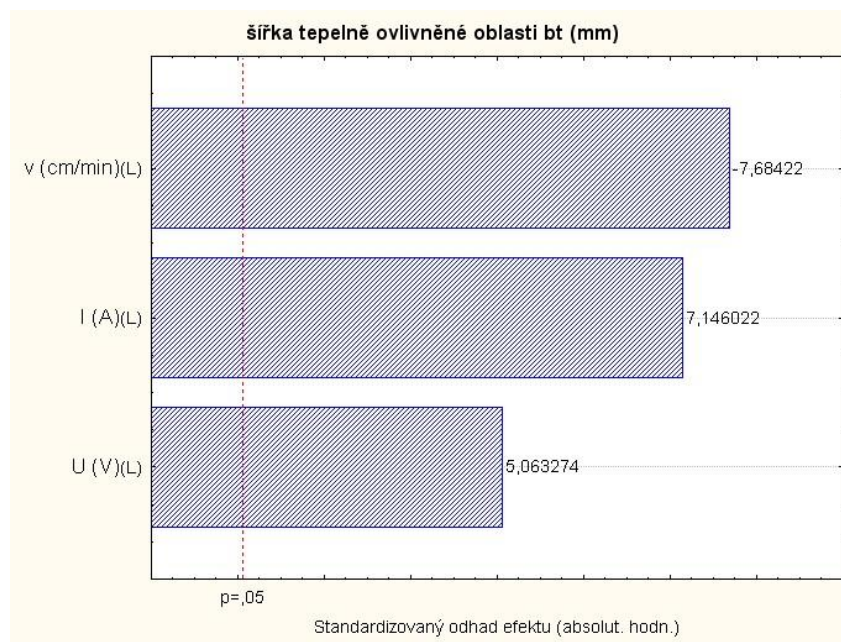
Vzdálenost průvlastku má lineární efekt a je záporný, což znamená, že se zvyšující se vzdáleností průvlastku, se zmenšuje šířka housenky.

Pak byla zjištěna interakce mezi navařovacím proudem I (A) a napětím U (V). Tato interakce má lineární efekt a je kladná. Tato interakce vykazuje, že se zvyšujícím se proudem I a zároveň napětím U , dochází ke zvětšení šířky housenky, což by se dalo označit jako synergický efekt napětí a proudu.

Hodnota spolehlivosti $R^2=0,85088$ je poměrně vysoká, model velmi dobře popisuje vliv navařovacích parametrů na šířku návaru b .

4.2 Šířka tepelně ovlivněné oblasti b_t

Graf 2 Paretův odhad efektu na šířku tepelně ovlivněné oblasti b_t (mm), ($R^2 = 0,83926$)



Výsledky: Z uvedeného grafu (Graf 2) vyplývá, že na šířku tepelně ovlivněné oblasti b_t (mm), má největší přímý vliv navařovací rychlost v ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), která má lineární efekt záporný. To znamená, že se zvyšující se rychlostí navařování se oblast b_t zmenšuje.

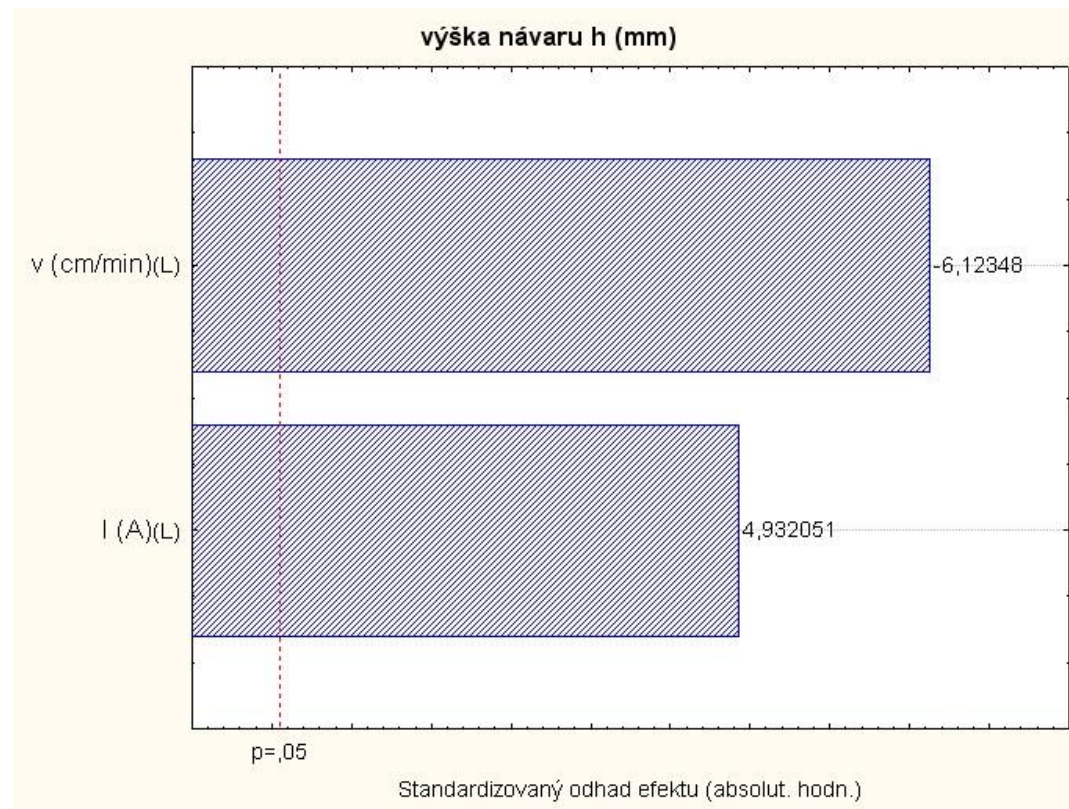
Navařovací proud I (A) má lineární přímý efekt, který je kladný. Vliv proudu je srovnatelný s navařovací rychlostí, ale navařovací proud vykazuje, že s jeho zvyšující se hodnotou, se oblast b_t zvyšuje.

Navařovací napětí U (V) má lineární přímý efekt, který je kladný. Navařovací napětí je v tomto grafu třetím nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím šířku tepelně ovlivněné oblasti b_t . Se zvyšujícím se napětím, se zvyšuje oblast b_t .

Hodnota spolehlivosti $R^2=0,83926$ je poměrně vysoká, model velmi dobře popisuje vliv navařovacích parametrů na šířku tepelně ovlivněné oblasti b_t .

4.3 Výška návaru h

Graf 3 Paretův standardizovaný odhad efektu na výšku návaru h (mm), ($R^2 = 0,69602$)



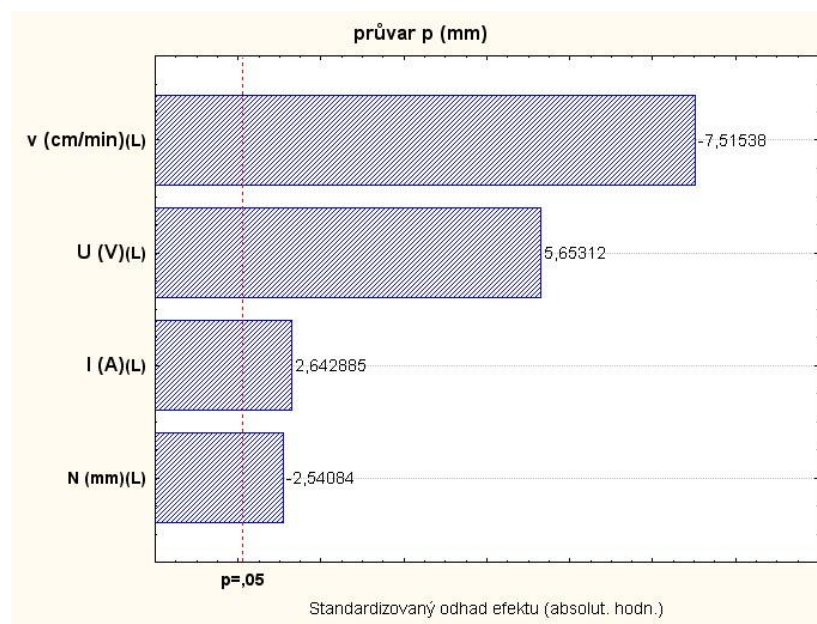
Výsledky: Z uvedeného grafu (Graf 3) vyplývá, že na výšku návaru h (mm), má největší přímý vliv navařovací rychlost v ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), která má lineární efekt záporný. Navařovací rychlost vykazuje, že se zvyšující se rychlostí navařování se výška návaru h zmenšuje.

Dále z tohoto grafu vyplývá, že druhým významným faktorem ovlivňujícím výšku návaru, je navařovací proud I (A), který má lineární přímý kladný efekt. To znamená, že se zvyšujícím se navařovacím proudem, se zvětšuje výška návaru h .

Hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,69602$ je poměrně vysoká, model lze považovat za adekvátní.

4.4 Průvar p

Graf 4 Paretův standardizovaný odhad efektu na průvar p (mm), ($R^2 = 0,80296$)



Výsledky: Z uvedeného grafu (Graf 3) vyplývá, že na průvar p (mm), má největší přímý vliv navařovací rychlost v ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$), která vykazuje lineární efekt záporný. To znamená, že čím větší rychlost navařování tím menší je průvar p .

Dále z tohoto grafu vyplývá, že druhým významným faktorem ovlivňujícím průvar, je navařovací napětí U (V), které má lineární přímý efekt kladný. To znamená, že se zvyšujícím se navařovacím proudem, se zvětšuje průvar p .

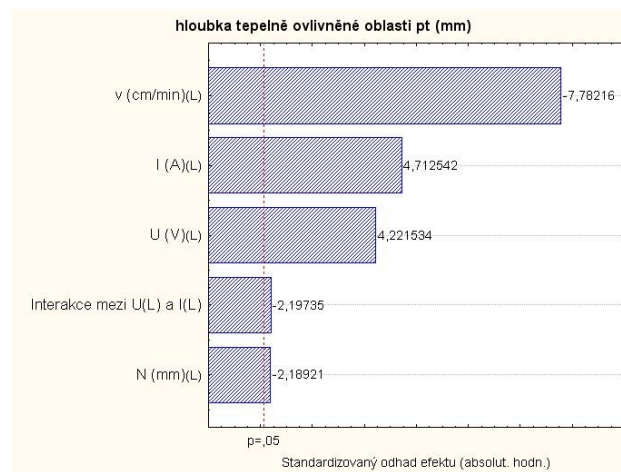
Navařovací proud I (A) má na velikost průvaru p lineární efekt kladný. Vliv navařovacího proudu je nižší než u navařovací rychlosti v ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) a navařovacího napětí U (V). Z toho vyplývá, že při zvyšujícím se proudu, dochází ke zvětšení průvaru p .

Vzdálenost průvlaku N (mm) má lineární efekt záporný. Vliv vzdálenosti průvlaku je menší než u ostatních parametrů, ale zvýšením hodnot vzdálenosti průvlaku dochází ke zmenšení průvaru p .

Hodnota spolehlivosti $R^2=0,80296$ je poměrně vysoká, model lze považovat za adekvátní.

4.5 Hloubka tepelně ovlivněné oblasti p_t

Graf 5 Paretův odhad efektu na hloubku tepelně ovlivněné oblasti p_t (mm), ($R^2=0,82118$)



Výsledky: Z uvedeného grafu (Graf 5) vyplývá, že na hloubku tepelně ovlivněné oblasti p_t (mm) má největší přímý vliv záporný navařovací rychlost v ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$). Z toho vyplývá, že se zvyšující se navařovací rychlostí, se snižuje hloubka oblasti p_t .

Navařovací proud I (A) má lineární přímý efekt kladný. Vliv proudu, je nižší než vykazuje navařovací rychlost. Z tohoto grafu vyplývá, že se zvyšujícím se proudem, se hloubka oblasti p_t zvětšuje.

Navařovací napětí U (V) má lineární efekt kladný. Navařovací napětí je třetím nejvýznamnějším faktorem. To znamená, že se zvyšujícím se napětím, dochází ke zvětšení hloubky oblasti p_t .

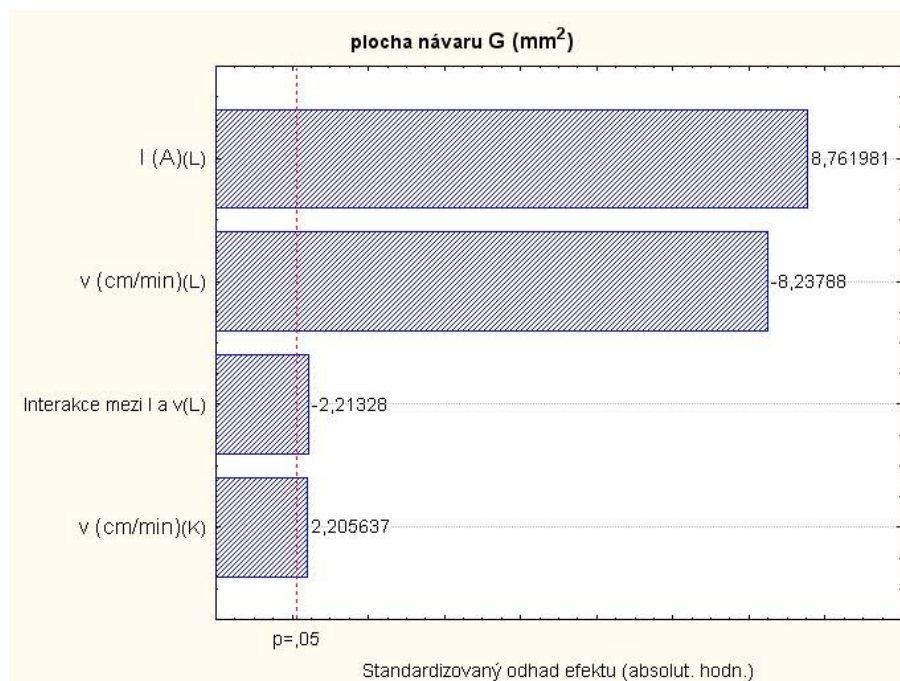
Dále byla zjištěna interakce mezi navařovacím napětím U (V) a proudem I (A). Tato interakce má lineární efekt záporný, který naznačuje, že se zvyšujícím se napětím a zároveň proudem, dochází ke zmenšení hloubky oblasti p_t .

Vzdálenost průvlaku N [mm] má podobnou hodnotu jako interakce mezi napětím a proudem, tzn., že má lineární efekt záporný. Z toho vyplývá, že se zvyšující se vzdáleností průvlaku, se hloubka oblasti p_t zmenšuje.

Hodnota spolehlivosti $R^2=0,82118$ je poměrně vysoká, model lze považovat za adekvátní.

4.6 Plocha návaru G

Graf 6 Paretův odhad efektu na plochu návaru G (mm²), ($R^2=0,86065$)



Výsledky: Z uvedeného grafu (Graf 6) vyplývá, že na plochu návaru G (mm²) má největší přímý vliv navařovací proud I (A), který je kladný, což znamená, že se zvyšujícím se navařovacím proudem I , se plocha návaru G zvětšuje.

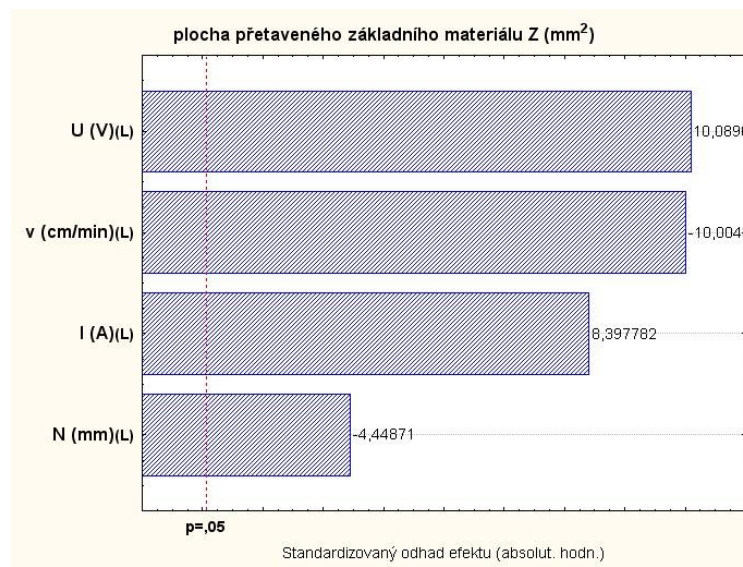
Rychlost navařování v (cm·min⁻¹) má lineárně kvadratický efekt. Z grafu vyplývá, že přímý efekt rychlosti v (pokud vyjádřen lineárně) je silně záporný a když vyjádřen kvadraticky, tak je kladný. Se zvyšující se rychlostí navařování velikost plochy návaru G, nejdříve klesá a po dosažení minimální hodnoty roste. Efekt může být zaznamenán mimo dosažený rozsah.

Dále byla zjištěna interakce mezi navařovacím proudem I (A) a navařovací rychlostí v (cm·min⁻¹). Tato interakce má minimální lineární efekt záporný. Tato interakce vykazuje, že se zvyšujícím se proudem I a zároveň navařovací rychlostí v , dochází ke zmenšení plochy návaru G.

Hodnota spolehlivosti $R^2=0,86065$ je poměrně vysoká, model velmi dobře popisuje vliv navařovacích parametrů na plochu návaru G.

4.7 Plocha přetaveného základního materiálu Z

Graf 7 Paretův odhad efektu na plochu přetaveného základního materiálu Z (mm²),
($R^2 = 0,92118$)



Výsledky: Z uvedeného grafu (Graf 6) vyplývá, že na plochu přetaveného základního materiálu Z (mm²) má největší přímý vliv navařovací napětí U (V), která má lineární efekt kladný. Z toho vyplývá, že se zvyšujícím se napětím, se plocha přetaveného základního materiálu Z zvětšuje.

Rychlost navařování v (cm·min⁻¹) je druhým nejvýznamnějším faktorem ovlivňující plochu přetaveného základního materiálu Z. Rychlost navařování má lineární efekt záporný. Z grafu vyplývá, že se zvyšující se rychlostí, dochází ke zmenšení plochy Z.

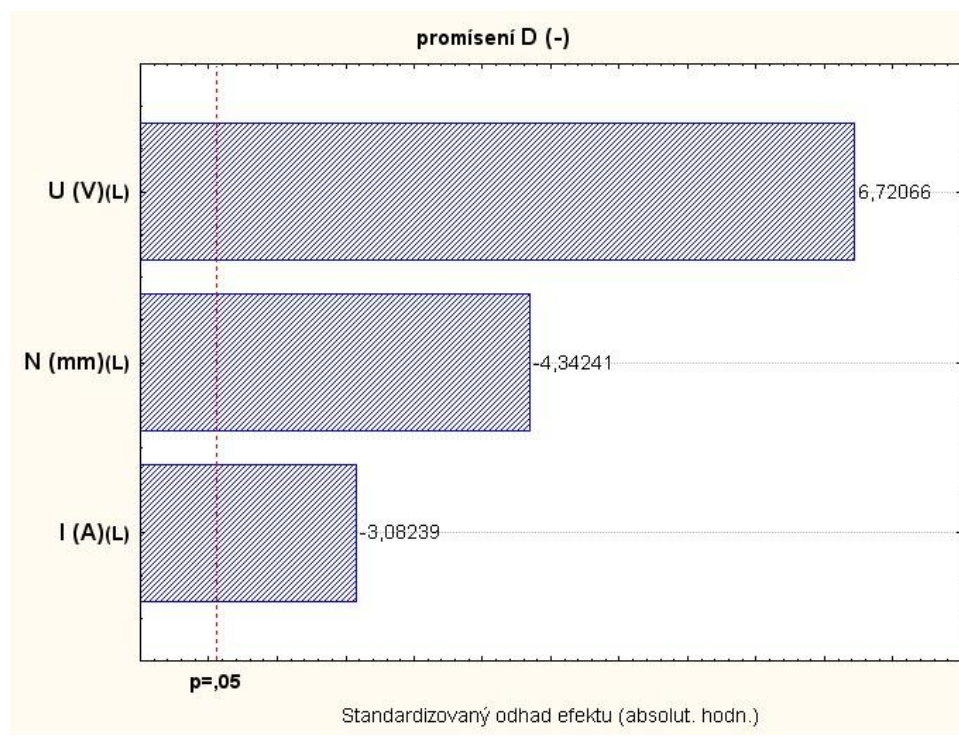
Navařovací proud I (A) má lineární přímý efekt, který je kladný. Proud je třetím nejvýznamnějším faktorem. Z tohoto grafu vyplývá, že se zvyšujícím se proudem, se plocha Z zvětšuje.

Vzdálenost průvlastu N (mm) má lineární efekt záporný. Vliv vzdálenosti průvlastu je menší než u ostatních parametrů, ale zvýšením hodnot vzdálenosti průvlastu dochází ke zmenšení velikosti plochy Z.

Hodnota spolehlivosti $R^2=0,92118$ je poměrně vysoká, model velmi dobře popisuje vliv navařovacích parametrů na plochu přetaveného základního materiálu Z.

4.8 Promísení

Graf 8 Paretův standardizovaný odhad efektu na promísení D (-), ($R^2=0,73876$)



Výsledky: Z uvedeného grafu (Graf 8) vyplývá, že na promísení D , má největší přímý vliv navařovací napětí U (V), které má lineární přímý efekt kladný. To znamená, že se zvyšujícím se navařovacím napětím, se zvětšuje velikost promísení D .

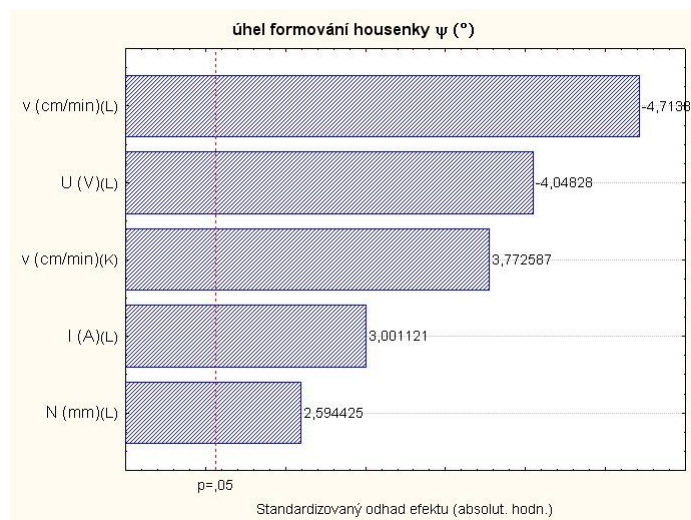
Vzdálenost průvlaku N (mm) má na promísení lineární efekt záporný. Vliv vzdálenosti průvlaku je menší než u navařovacího napětí, nicméně, se zvyšující se vzdálenosti průvlaku dochází ke snížení promísení D .

Dále z tohoto grafu vyplývá, že méně významným faktorem ovlivňujícím promísení, je navařovací proud I (A), který má lineární efekt kladný. Vliv navařovacího proudu je nižší než u navařovací rychlosti v ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) a navařovacího napětí U (V). Nicméně, při zvyšujícím se proudu, dochází ke zvýšení promísení D .

Hodnota spolehlivosti $R^2=0,73876$ je poměrně vysoká, model lze považovat za adekvátní.

4.9 Úhel formování housenky φ

Graf 9 Paretův odhad efektu na úhel formování housenky φ ($^{\circ}$), ($R^2=0,74076$)



Výsledky: Z uvedeného grafu (Graf 9) vyplývá, že na úhel formování housenky φ ($^{\circ}$), má největší vliv rychlost navařování v ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$). Z grafu vyplývá, že přímý efekt rychlosti v (pokud vyjádřen lineárně) je záporný a když vyjádřen kvadraticky, tak je kladný. Z toho vyplývá, že se zvyšující se rychlostí navařování v , velikost úhlu formování housenky φ , nejprve klesá a po dosažení minimální hodnoty roste. Efekt může být zaznamenán mimo dosažený rozsah.

Druhým významným faktorem ovlivňující úhel formování housenky φ , je navařovací napětí U (V), které má lineární efekt záporný. Se zvyšujícím se navařovacím napětím U dochází ke zmenšení úhlu formování φ .

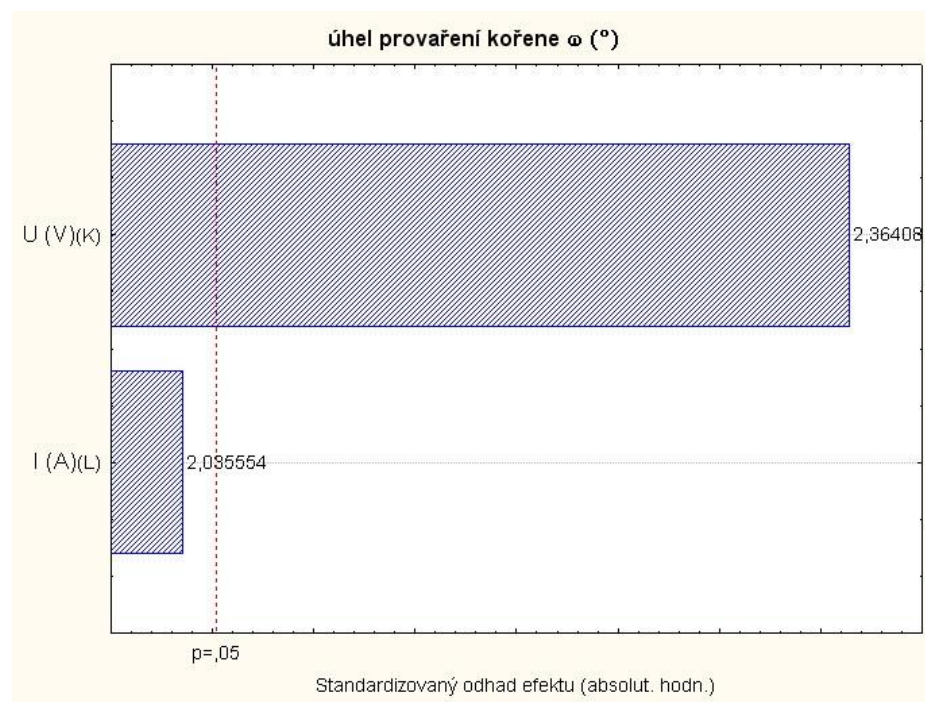
Navařovací proud I (A) je třetím významným faktorem. Proud má kladný lineární efekt, to znamená, že se zvyšujícím se navařovacím proudem I , se zvětšuje velikost úhlu φ .

Dále z tohoto grafu vyplývá, že méně významným faktorem, který ovlivňuje úhel formování housenky φ , je vzdálenost průvlaku N (mm). Vzdálenost průvlaku vykazuje lineární efekt kladný, což znamená, že se zvyšující se vzdáleností průvlaku, se zvětšuje velikost úhlu φ .

Hodnota spolehlivosti $R^2=0,74076$ je poměrně vysoká, model lze považovat za adekvátní.

4.10 Úhel provaření kořene ω

Graf 10 Paretův odhad efektu na úhel provaření kořene ω ($^{\circ}$), ($R^2=0,26495$)



Výsledky: Z uvedeného grafu (Graf 10) vyplývá, že na úhel provaření kořene ω ($^{\circ}$), má největší vliv navařovací napětí U (V), které má kvadratický efekt kladný. Z grafu vyplývá, že se zvyšujícím se navařovacím napětím, se zvětšuje úhel provaření kořene ω .

Druhým faktorem je navařovací proud I (A), který má kladný, avšak nevýznamný lineární efekt. Jeho hodnota neovlivňuje významně úhel provaření kořene ω ($^{\circ}$). Na základě vlivu efektu na odezvu je nutné nevýznamné koeficienty efektů z modelu odstranit a analyzovat pouze významné efekty a jejich interakci na odezvu.

Hodnota spolehlivosti $R^2=0,26495$ je nízká, model nelze považovat za adekvátní.

4.11 Shrnutí výsledku pozorování

Na základě shora uvedených výsledků, lze jednotlivé souvislosti mezi vstupními a výstupními faktory a vliv interakcí vstupních faktorů na výstupní faktory shrnout do přehledného schématu. Viz .

V řadách jsou uvedeny výstupní parametry geometrie návarové housenky a promísení. Ve sloupcích jsou uvedeny vstupní parametry navařovacího procesu. Znamínkem (+) jsou označeny kladné hodnoty, znamínkem (-) jsou označeny hodnoty záporné. Tyto hodnoty vycházejí z lineární, respektive kvadratické rovnice matematického modelu predikce. Lineární efekty jsou označeny písmenem (*L*) a kvadratické efekty jsou označeny písmenem (*K*).

Tímto způsobem mohou být prezentované výsledky v této diplomové práci, jednoduše porovnány s výsledky podobných studií jiných autorů, viz . Porovnávány jsou pouze ty parametry, které byly použity pro účely této diplomové práce. V mnoha studiích jiných autorů, jsou uváděny i jiné vstupní parametry, jako např. rychlost podávání drátu (*F*), nebo se objevují jiné významné interakce a efekty faktorů – tyto zde nejsou porovnány. Ve všech tabulkách byly vypuštěny nevýznamné (nevlivné) faktory. Shody mezi předloženými výsledky s výsledky jiných autorů, jsou v tabulce zvýrazněny žlutě a neshody červeně. Až na 5 neshod ve 4 efektech, se předložené výsledky shodují s výsledky uvedených autorů ve 32 případech, konkrétně ve 12-ti různých efektech. Z toho lze vyvodit, že použitá metoda je replikovatelná a její výstupy lze použít pro další výzkum. Zkoumat příčiny neshod je nad rámec této diplomové práce, nicméně to představuje zajímavý námět pro další studium.

Tab. 11 Srovnání poznatků o vstupních a výstupních faktorech

Vstupní parametry \ Výstupní parametry	Výstupní parametry									
	b	b _t	h	p	p _t	G	Z	D	φ	ω
U(L)	A+ E- F+ G+	A+	C- E- F- G-	A+ D+ G+	A+		A+	A+ B+ G+	A-	
U(K)	F+		F-	G-				B+		A+
I(L)	A+ F+ H+	A+	A+ C+ F+ H+	A+ D+ H+	A+	A+	A+	A- H+	A+	
I(K)	F+		C+ F+	H-				B+		
v(L)	A- E- F- G- H-	A-	A- C- E- F- G- H-	A- D- E- G- H-	A-	A-	A-	H+	A-	
v(K)	E- F-		C+ E+ F- H+	H+		A+		B+ H-	A+	
N(L)	A- F+ G- H+		G+ H+	A- E- G- H-	A-		A-	A- E- G- H+	A+	
N(K)	H+			H-				H-		
Interakce I(L) x U(L)	A+		F+		A-					
Interakce I(L)x v(L)			C+	H-		A-		H-		

Vysvětlivky: (L) – lineární efekt, (K) – kvadratický efekt

A = Autor, **B** = (Chotěborský & Navrátilová, 2011), **C** = (Chotěborský & Navrátilová, 2010), **D** = (Kim I. S., 2003), **E** = (Murugan, Parmar, & Sud, 1993), **F** = (Thao, Jeong, Kim, & Kim, 2008), **G** = (Murugan & Parmar, 1994), **H** = (Palani & Murugan, 2006)

5. Závěr

Systém plánovaných experimentů (*Design of Experiment*) umožňuje posuzovat výrobní pochody z hlediska efektu faktorů na příslušnou odezvu. Avšak lze jej také použít pro řešení a vypracování modelů při technologickém zpracování či svařování.

Byl zkoumán samostatný i společný vliv navařovacích parametrů – napětí (U), proudu (I), rychlosti navařování (v), a vzdálenosti průvlastku (M) od základu na veličiny geometrie návarové housenky – šířku návaru (b), šířku tepelně ovlivněné oblasti (b_t), výška návaru (h), průvar (p), hloubka tepelně ovlivněné oblasti (p_t), plocha přetaveného základního materiálu (Z) a plocha návaru (G), úhel formování housenky (φ), úhel provaření kořene (ω) a promísení (D). Výsledky diplomové práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Experimentální program výzkumu navařovacích parametrů na geometrii návarové housenky, lze minimalizovat pomocí techniky plánovaného experimentu (DoE) s využitím centrálně kompozitních systému s pomocí metody analýzy rozptylu (ANOVA).
2. Bylo zjištěno, že největší efekt má velikost navařovacího napětí (U) na plochu přetaveného základního materiálu (Z).
3. Dále bylo zjištěno, že čím větší je rychlost navařování (v), tím menší je plocha přetaveného materiálu.
4. Vliv navařovacích parametrů na geometrii návarové housenky, lze simulovat modelem pro predikci s vysokou hodnotou spolehlivosti. Touto cestou lze optimalizovat a racionalizovat navařovací proces (např. úspora prostředků použitím levnějších materiálů, automatizace, robotizace).
5. Kvalita návaru je určena jeho šířkou (b) a výškou (h), při minimálním promísení (D). Pro dosažení optimální geometrie návarové housenky, a co nejmenšího promísení, by proto měly být vstupní parametry takové, aby navařovací proud (I) byl vysoký při navařovacím napětím (U) co nejnižším a to v optimálním poměru, který lze pomocí použitého modelu vypočítat.

Použitá literatura

Al-Faruk, A., Hasib, M., Ahmed, N., & Das, U. (2010). Prediction of Weld Bead Geometry and Penetration in Electric Arc Welding using Artificial Neural Networks. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol: 10 No: 04.* , stránky 23-28.

Apps, R., Gourd, L., & Lelson, K. (31. 11 1963). Effect of welding variables upon bead shape and size in submerged-arc welding. *Weld. Met. Fabr.* , stránky 453–457.

Bajda, M. (1 2006). Navařování kovů, 2.část. *Svět svaru* , stránky 1-12.

Begeman, M., Amstead, B., & Mashruwala, U. (1950). Effects of reduced atmospheric pressure on arc-welding characteristics,. *Welding Journal 29* , stránky 433–440.

Böhler Welding Group. (nedatováno). *Ochrana proti opotřebení a opravy svařováním, navařováním a pájením*. Získáno 2. 19 2011, z www.bohler-uddeholm.cz:
http://www.bohler-uddeholm.cz/czech/files/Opravy_a_navary.pdf

Chotěborský, R., & Navrátilová, M. (únor 2011). Experimentální posouzení vlivu navařovacích parametru na promísení návarové housenky. *Strojírenská technologie* , stránky 44 – 49.

Chotěborský, R., & Navrátilová, M. (2010). Model vlivu navařovacích parametrů na geometrii návarové housenky s využitím centrálně kompozitního návrhu experimentu. *Technologické fórum*, (stránky 1-6). Praha.

Chotěborský, R., Abdul Hamidová, R., Navrátilová, M., & Hrabě, P. (2010). Effect of welding process parameters on the geometry and dilution of the bead in the automatic surfacing. "4th International Conference TAE 2010. Weld bead, JR-Ostatní strojírenství, Příspěvek ve sborníku.

Chotěborský, R., Hrabě, P., Jirka, M., Müller, M., & Savková, J. (1 2009). Abrázivní opotřebení návarových materiálů na bázi Fe-Cr-C. *Konstrukce* , roč. 8 (č. 1), stránky 39 - 45.

Christensen, N., de Davies, V., & Gjermurdsen, K. (2 1965). Distribution of temperatures in arc-welding. *British Welding Journal* 12 , stránky 54–75.

Correia, D. S., & al. (2005). Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 160, , stránky 70-76.

Cunat, P.-J. (2007). *Svařování korozivzdorných ocelí*. Získáno 20. 2 2011, z http://www.euro-inox.org/pdf/map/BrochureWeldability_CZ.pdf

DuPont, J. N., & Marder, A. R. (1996). Dilution in single pass arc welds. *Metallurgical and materials transaction B*, 27B, , stránky 481-489.

El Rayes, M., Walz, C., & G., S. (May 2004). The Influence of Various Hybrid Welding Parameters on Bead Geometry. *The Welding Journal* , stránky 147-153.

ESAB. (2008). *Příručka pro výběr a použití přídavných materiálů pro opravy a údržbu* (5. aktualizované vydání). Vamberk: ESAB.

Ganjigatti, J., Pratihari, D., & Choudhury, A. R. (2007). Global versus cluster-wise regression analyses for prediction of bead geometry in MIG welding process. *Journal of Materials Processing Technology* 189 , stránky 352–366.

GMAW Welding Guide. (nedatováno). www.lincolnelectric.com. Získáno 3. 17 2011, z Lincoln Electric Welding : www.lincolnelectric.com

Gurev, H., & Stout, R. (7 1963). Solidification phenomena in inert-gas metal welds. *Welding Journal* 42 , stránky 298–310.

Herman, P. (14. 1 2006). www.svarak.cz. Získáno 17. 2 2011, z Nová norma EN 14 700 pro klasifikaci návarových materiálů: <http://www.svarak.cz/cz/nova-norma-en-14-700-pro-klasifikaci-navarovych-materialu.htm>

Hlavatý, I. (2003). *Zvyšování užitečných vlastností vysokouhlíkových materiálů navařováním*, Habilitační práce, VŠB - TU Ostrava. Ostrava.

http://www.tpub.com/content/construction/14250/css/14250_179.htm. (nedatováno).

Načteno z www.tpub.com:

http://www.tpub.com/content/construction/14250/css/14250_179.htm

Ishizaki, K. (1962). Interfacial tension theory of the phenomenon of arc welding-mechanism of penetration,. *The Institute of Welding* , stránky 195–209.

Ishizaki, K. (1962). On the formation of the weld bead, Proceedings of Symposium on Physics of Arc Welding. *The Institute of Welding* , stránky 155–157.

Jarošová, E. (2007). *Navrhování experimentů a jejich analýz* (Sv. 1. vyd.). Praha : ČSJJQ.

Juříčka, I. (nedatováno). Získáno 20. 3 2011, z Ústav strojírenské technologie, ČVUT, u12133.fsid.cvut.cz,: u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/klas_svar_v_och_atm.pdf

Kacar, R., & Kokemli, K. (2005). Effect of controlled atmosphere on the MIG-MAG arc weldment propertie. *Materials and Design*, 26, , stránky 508-516.

Kanti, K. M., & Rao, P. S. (2008). Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network. *Journal of Materials Processing Technology*, 200, , stránky 300-305.

Karaoglu, S., & Secgin, A. (2008). Sensitivity analysis of submerged arc welding process parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 202 , stránky 500-507.

Kim, I. S. (2003). A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO2 arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 136, , stránky 139-145.

Kim, I., Son, K., Yang, Y., & Yaragada, P. (2003). Sensitivity analysis for process parameters in GMA welding processes using a factorial design method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 , stránky 763-769.

Kolahan, K., & Heidari, M. (2009). A New Approach for Predicting and Optimizing Weld Bead Geometry in GMAW. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 59 , stránky 138 - 141.

Koukal, J., & Zmydlený. (2005). *T. Svařování I, skripta VŠB*. Ostrava: TU.

Koutný, J. E. (11. 07 2006).

<http://svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006071101>. Získáno 25. 03 2011, z Svarbazar: <http://svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006071101>

Kubíček, J. (11. 12 2006). *Renovace a povrchové úpravy*,. Brno: VUTB.

Manonmani, K., G., M., & Buvanasekaran, G. (2007). Effects of process parameters on the bead geometry of laser beam butt welded stainless steel sheets. *Int J Adv Manuf Technol* 32 , stránky 1125–1133.

Michálek, J. (2007). Navrhování a vyhodnocování experimentů. V H. V. Fabian F., *Statistické metody řízení jakosti* (stránky H1-H32). Praha: Česká společnost pro jakost.

Murugan, N., & Parmar, R. S. (1994). Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 41, , stránky 381-398.

Murugan, N., Parmar, R., & Sud, S. (1993). Effect of submerged arc process variables on dilution and bead geometry in single wire surfacing. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 3 , stránky 767-780.

Nagesh, D., & Datta, G. (2002). Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks,. *J Mater Process Technology* 123 , stránky 303- 312.

Nouri, M., Abdollah-Zadehy, A., & Malek, F. (2007). Effect of Welding Parameters on Dilution and Weld Bead Geometry in Cladding“. *J. Mater. Sci. Technol* Vol. 23 No. 6 , stránky 817-822.

Palani, P., & Murugan, N. (2006). Development of Mathematical Models for Prediction of Weld Bead Geometry in Cladding by Flux Cored Arc Welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.30 , stránky 669-676.

Pošta, J., Veselý, P., & Dvořák, M. (2002). *Degradace strojních součástí*. Praha: ČZU.

Skočovský, P., & Šiman, I. (1989). *Štruktúrna analýza liatin*. Bratislava: Alfa.

Thao, D., Jeong, J., Kim, I., & Kim, J. (August 2008). Predicting Lap-Joint bead geometry in GMA welding process. *Archives of Materials Science and Engineering Volume 32* (Issue 2), stránky 121-124.

www.tpub.com. (nedatováno). Načteno z

http://www.tpub.com/content/construction/14250/css/14250_179.htm:

http://www.tpub.com/content/construction/14250/css/14250_179.htm

www.wikipedia.org. (12. 10 2010). Získáno 27. 2 2011, z

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Welding-electric-arc.svg>

www.wikipedia.org. (4. 9 2005). Získáno 15. 2 2011, z

http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:GMAW_weld_area.png

www.wikipedia.org. (9. 2 2008). Získáno 27. 2 2011, z

http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:MIG_cut-away.svg

www.wikipedia.org. (19. 2 2011). Získáno 27. 2 2011, z

http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:GMAW_Circuit.svg

Seznam zkratek

AC	střídavý proud (<i>alternating current</i>)
ACHF	vysokofrekvenční střídavý proud (<i>alternative current high-frequency</i>)
ANOVA	analýza rozptylu (<i>analysis of variance</i>)
CTWD	vzdálenost průvlaku od navařovaného povrchu (<i>contact tip-to-work distance</i>)
DC –	(také DCSP) stejnosměrný proud, přímá polarita (<i>direct-current straight polarity</i>)
DC +	(také DCRP) stejnosměrný proud, obrácená polarita (<i>direct-current reverse polarity</i>)
DoE	plánovaný experiment (<i>design of experiments</i>)
FCAW	svařování plněnou elektrodou (<i>flux-cored arc welding</i>)
GMAW	svařování v ochranné atmosféře tavnou elektrodou (<i>gas metal arc welding</i>)
GTAW	svařování v ochranné atmosféře netavnou elektrodou (<i>gas tungsten arc welding</i>)
LBW	navařování laserovým paprskem (<i>laser beam welding</i>)
MAG	svařování v ochranné atm. s aktivním plynem (<i>Metallschweißen mit aktiven Gasen</i>)
MIG	svařování v ochranné atm. s inertními plyny (<i>Metallschweißen mit inertem Gasen</i>)
MOG	svařování drátem plněným tavidlem (<i>Metallschweißen Ohne Gasen</i>)
OCV	napětí naprázdno (<i>open circuit voltage</i>)
PTAW	navařování plazmou (<i>plasma transferred arc welding</i>)
SA	metoda simulovaného žíhání (<i>simulated annealing</i>)
SAW	svařování pod tavidlem (<i>submerged arc welding</i>)
SMAW	ruční obloukové svařování (<i>shielded metal arc welding</i>)

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Vliv polarity stejnosměrného proudu na navařování.</i>	<i>6</i>
<i>Obr. 2 Navařování elektrickým obloukem (GMAW)</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3 Schéma zapojení svařovacího zařízení</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4 Schéma svařovacího hořáku</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5 Schéma elektrického oblouku při svařování.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 6 Navařování s kontinuálně podávanou elektrodou</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 7 Schéma svařování MIG/MAG</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 8 Návarová housenka na základním materiálu S235JR s vektorem nanášení</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 9 Nanášení housenky elektrickým obloukem</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 10 Vzorky 4 vyleštěných příčných řezů návarů, zalité do akrylátové pryskyřice</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 11 Makrostruktura návarových housenek (vzorek 15.2 při zvětšení ×3,5)</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 12 Znázornění kvantifikovatelných oblastí návarové housenky</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 13 Makrofotografie housenky bez popisu parametrů</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 14 Schéma geometrických veličin návarové housenky.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 15 Metalografický řez návarovou housenkou.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 16 Svařovací automat “ESAB A2 S Mini Master” s polohovadlem.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 17 Detail svařovacího hořáku, základního materiálu a odsávací trubice.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 18 Akrylátová pryskyřice v nádobkách na vzorky.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 19 Leštění vzorků na kotouči</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 20 Vyleštěné a naprahované vzorky (30 ks)</i>	<i>48</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Příklady použití návarů v praxi</i>	<i>5</i>
<i>Tab. 2 Renovace a povrchové úpravy</i>	<i>8</i>
<i>Tab. 3 Faktory ovlivňující promísení</i>	<i>9</i>
<i>Tab. 4 Formy opotřebení</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 5 Navařovací parametry</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 6 Elektroda použitá v experimentální části diplomové práce</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7 Značení použité elektrody Soudokay SK A 43-O podle normy ČSN EN 14700 ..</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 8 Charakteristika materiálu použité elektrody podle normy ČSN EN 14700</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 9 Chemické složení použitého základního materiálu – ocel S235JR (v %)</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 10 Odhady efektů pro šířku návaru b</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 11 Srovnání poznatků o vstupních a výstupních faktorech</i>	<i>62</i>

Seznam grafů

<i>Graf 1 Paretův standardizovaný odhad efektu šířky návaru b</i>	<i>51</i>
<i>Graf 2 Paretův standardizovaný odhad efektu šířky tepelně ovlivněné oblasti b_t.....</i>	<i>52</i>
<i>Graf 3 Paretův standardizovaný odhad efektu pro výšku návaru h.....</i>	<i>53</i>
<i>Graf 4 Paretův standardizovaný odhad efektu pro průvar p.....</i>	<i>54</i>
<i>Graf 5 Paretův odhad efektu pro hloubku tepelně ovlivněné oblasti p_t</i>	<i>55</i>
<i>Graf 6 Paretův odhad efektu pro plochu návaru G</i>	<i>56</i>
<i>Graf 7 Paretův odhad efektu pro plochu přetaveného základního materiálu Z</i>	<i>57</i>
<i>Graf 8 Paretův standardizovaný odhad efektu pro promísení D</i>	<i>58</i>
<i>Graf 9 Paretův odhad efektu pro úhel formování housenky φ</i>	<i>59</i>
<i>Graf 10 Paretův odhad efektu pro úhel provaření kořene ω</i>	<i>60</i>

Příloha A: Plán experimentu – randomizované pořadí pokusů s vstupními faktory

Směrod. Pokus	2 ⁴ centr. kompozitní, nk=16 nh=8 n0=2 Pok. =26 (Tabulka3) + 4 center			
	U(V)	I(A)	v (cm/min)	Vzdálenost průvlaku od základního materiálu (mm)
1	26	180	30	16
2	26	180	30	24
3	26	180	50	16
4	26	180	50	24
5	26	260	30	16
6	26	260	30	24
7	26	260	50	16
8	26	260	50	24
9	30	180	30	16
10	30	180	30	24
11	30	180	50	16
12	30	180	50	24
13	30	260	30	16
14	30	260	30	24
15	30	260	50	16
16	30	260	50	24
17	24	220	40	20
18	32	220	40	20
19	28	140	40	20
20	28	300	40	20
21	28	220	20	20
22	28	220	60	20
23	28	220	40	12
24	28	220	40	28
25 (C)	28	220	40	20
26 (C)	28	220	40	20
27 (C)	28	220	40	20
28 (C)	28	220	40	20
29 (C)	28	220	40	20
30 (C)	28	220	40	20

Příloha B: Vstupní a výstupní hodnoty proměnných pro statistickou analýzu

č.v.	U	I	v	N	b	b _t	h	P	P _t	φ ₁
	[V]	[A]	[cm/min]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]
1	26	180	30	16	8,37	10,45	2,44	1,63	3,40	40,50
2	26	180	30	24	7,23	10,86	2,21	1,35	2,53	47,30
3	26	180	50	16	7,39	8,54	1,93	1,19	2,26	41,18
4	26	180	50	24	7,26	8,93	1,91	1,12	2,44	44,00
5	26	260	30	16	10,91	12,54	2,68	1,63	3,72	53,80
6	26	260	30	24	9,47	13,47	3,35	1,75	3,86	65,00
7	26	260	50	16	9,00	10,28	2,32	1,40	2,65	44,50
8	26	260	50	24	7,91	9,63	2,30	1,16	2,74	42,70
9	30	180	30	16	9,02	11,82	2,37	2,26	3,61	43,80
10	30	180	30	24	8,63	11,59	2,35	1,95	3,96	39,10
11	30	180	50	16	8,24	9,98	1,44	1,56	3,07	27,40
12	30	180	50	24	7,42	9,33	1,81	1,49	2,60	34,30
13	30	260	30	16	11,40	13,40	2,61	2,33	4,02	47,00
14	30	260	30	24	13,74	15,96	3,47	1,77	3,33	45,40
15	30	260	50	16	10,89	12,03	2,25	1,58	3,02	43,00
16	30	260	50	24	10,02	11,42	2,18	1,56	3,00	42,70
17	24	220	40	20	7,67	9,42	3,10	1,35	2,63	57,70
18	32	220	40	20	10,38	12,68	2,33	1,93	3,72	36,60
19	28	140	40	20	7,25	8,68	1,65	1,09	2,11	29,90
20	28	300	40	20	10,47	12,31	2,74	1,81	3,77	39,40
21	28	220	20	20	10,00	12,65	3,32	2,30	3,88	71,40
22	28	220	60	20	7,65	9,46	1,72	1,16	2,42	33,10
23	28	220	40	12	9,77	12,21	1,96	1,96	3,51	26,70
24	28	220	40	28	7,54	9,79	2,46	1,68	2,81	49,70
25	28	220	40	20	9,37	10,95	2,32	1,33	3,23	36,20
26	28	220	40	20	9,35	10,93	2,63	1,60	3,11	36,90
27	28	220	40	20	8,40	10,19	1,91	1,74	3,05	32,80
28	28	220	40	20	9,02	11,51	2,49	1,54	2,98	41,50
29	28	220	40	20	9,30	10,77	2,75	1,63	2,88	39,80
30	28	220	40	20	9,17	10,95	2,10	1,70	3,10	35,80

č.v.	φ ₂	∅φ	ω ₁	ω ₂	∅ω	G	Z	D	D v %
	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[mm ²]	[mm ²]	[J]	[%]
1	50,50	45,50	46,50	43,00	44,75	12,8	9,0	0,411116215	41,1116215
2	52,40	49,85	31,10	39,50	35,30	11,0	6,5	0,370561283	37,05612829
3	35,29	38,24	45,33	45,00	45,17	8,3	6,1	0,422437673	42,24376731
4	37,50	40,75	56,50	22,60	39,55	8,9	5,1	0,366690493	36,66904932
5	42,20	48,00	32,20	24,30	28,25	19,6	10,9	0,357377049	35,73770492
6	75,70	70,35	76,80	65,80	71,30	22,9	12,6	0,354947843	35,49478432
7	48,50	46,50	48,20	60,20	54,20	14,2	8,6	0,377034756	37,70347558
8	58,80	50,75	49,40	38,30	43,85	12,3	6,1	0,332213856	33,22138562
9	39,30	41,55	44,50	68,60	56,55	12,8	14,6	0,531775018	53,17750183
10	49,90	44,50	41,50	51,00	46,25	13,3	11,2	0,455882353	45,58823529
11	35,00	31,20	33,30	50,70	42,00	7,7	9,6	0,554466859	55,44668588
12	44,70	39,50	30,40	51,80	41,10	8,7	7,8	0,472727273	47,27272727
13	48,40	47,70	51,20	57,30	54,25	20,4	18,1	0,470924195	47,09241952
14	33,20	39,30	56,30	39,20	47,75	29,0	16,6	0,36377607	36,37760703
15	37,80	40,40	31,10	66,00	48,55	15,5	12,6	0,446778213	44,67782129
16	39,80	41,25	54,50	53,60	54,05	14,9	11,1	0,426481909	42,64819092
17	67,20	62,45	69,30	69,20	69,25	16,7	7,3	0,303080766	30,3080766
18	30,40	33,50	42,40	51,00	46,70	15,1	14,0	0,481034483	48,10344828
19	33,10	31,50	25,00	26,20	25,60	7,5	5,2	0,407612129	40,76121289
20	61,20	50,30	39,30	48,00	43,65	20,0	12,6	0,386552042	38,65520418
21	88,10	79,75	40,40	37,00	38,70	25,3	15,1	0,374011858	37,40118577
22	42,00	37,55	49,00	38,30	43,65	8,6	6,5	0,432539683	43,25396825
23	31,10	28,90	52,80	54,90	53,85	11,5	12,7	0,525093322	52,50933223
24	49,40	49,55	39,50	28,00	33,75	12,4	7,9	0,388450148	38,84501481
25	53,00	44,60	55,30	48,00	51,65	14,1	8,9	0,386018237	38,60182371
26	36,10	36,50	32,50	46,30	39,40	14,0	10,7	0,432969618	43,29696183
27	36,60	34,70	41,70	46,10	43,90	10,1	10,2	0,502603399	50,26033992
28	44,80	43,15	39,70	41,90	40,80	14,2	10,5	0,424419075	42,44190754
29	40,50	40,15	50,10	49,20	49,65	15,2	10,2	0,401655499	40,16554986
30	37,20	36,50	38,30	57,80	48,05	11,9	10,7	0,471681416	47,16814159

Příloha C: Odhady efektů všech použitých parametrů

Odhady efektů; R-kv.=0,85088; Upr:0,81982 (tabulka hodnot)
4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =0,4056233
Šířka návaru b (mm)

Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(24)	p
Průměr/ab.č.	9,07450	0,116279	78,04084	0,000000
(1)U (V)(L)	1,43650	0,260007	5,52484	0,000011
(2)I (A)(L)	2,18600	0,260007	8,40745	0,000000
(3)v (cm.min-1)(L)	-1,27817	0,260007	-4,91588	0,000051
(4)N (mm)(L)	-0,66650	0,260007	-2,56339	0,017056
1L * 2L	0,71225	0,318443	2,23667	0,034863

Odhady efektů; R-kv.=0,83926; Upr:0,82071 (tabulka hodnot)
4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =0,4891306
Šířka tepelně ovlivněné oblasti bt (mm)

Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(26)	p
Průměr/ab.č.	11,09117	0,127688	86,86113	0,000000
(1)U (V)(L)	1,44567	0,285520	5,06327	0,000028
(2)I (A)(L)	2,04033	0,285520	7,14602	0,000000
(3)v (cm.min-1)(L)	-2,19400	0,285520	-7,68422	0,000000

Odhady efektů; R-kv.=0,69602; Upr:0,67351 (tabulka hodnot)
4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =0,0810794
Výška návaru h (mm)

Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(27)	p
Průměr/ab.č.	2,370033	0,051987	45,58897	0,000000
(2)I (A)(L)	0,573333	0,116246	4,93205	0,000037
(3)v (cm.min-1)(L)	-0,711833	0,116246	-6,12348	0,000002

Odhady efektů; R-kv.=0,80296; Upr:0,77144 (tabulka hodnot)
 4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =0,0256101
Průvar p (mm)

Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(25)	p
Průměr/ab.č.	1,618100	0,029218	55,38091	0,000000
(1)U (V)(L)	0,369333	0,065333	5,65312	0,000007
(2)I (A)(L)	0,172667	0,065333	2,64288	0,013983
(3)v (cm.min-1)(L)	-0,491000	0,065333	-7,51538	0,000000
(4)N (mm)(L)	-0,166000	0,065333	-2,54084	0,017643

Odhady efektů; R-kv.=0,82118; Upr:0,78392 (tabulka hodnot)
 4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =0,06305
Hloubka tepelně ovlivněné oblasti pt (mm)

Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(24)	p
Průměr/ab.č.	3,113367	0,045844	67,91231	0,000000
(1)U (V)(L)	0,432750	0,102510	4,22153	0,000301
(2)I (A)(L)	0,483083	0,102510	4,71254	0,000086
(3)v (cm.min-1)(L)	-0,797750	0,102510	-7,78216	0,000000
(4)N (mm)(L)	-0,224417	0,102510	-2,18921	0,038543
1L * 2L	-0,275875	0,125549	-2,19735	0,037888

Odhady efektů; R-kv.=0,74076; Upr:0,68676 (tab.hodnot)
 4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =38,11173
Úhel formování housenky φ (°)

Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(24)	p
Průměr/ab.č.	40,6760	1,455101	27,95406	0,000000
(1)U (V)(L)	-10,2029	2,520308	-4,04828	0,000466
(2)I (A)(L)	7,5638	2,520308	3,00112	0,006189
(3)v (cm.min-1)(L)	-11,8804	2,520308	-4,71387	0,000086
v (cm.min-1)(K)	8,6797	2,300716	3,77259	0,000934
(4)N (mm)(L)	6,5388	2,520308	2,59442	0,015904

Odhady efektů; R-kv.=0,26495; Upr:0,21051 (tabulka hodnot) 4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =77,22867 Úhel provaření kořene ω (°)				
Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(27)	p
Průměr/ab.č.	42,95181	2,071348	20,73616	0,000000
U (V)(K)	7,74257	3,275088	2,36408	0,025525

Odhady efektů; R-kv.=0,86065; Upr:0,83835 (tabulka hodnot) 4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =4,410195 Plocha návaru G (mm²)				
Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(25)	p
Průměr/ab.č.	13,60828	0,494986	27,49226	0,000000
(2)I (A)(L)	7,51200	0,857340	8,76198	0,000000
(3)v (cm.min-1)(L)	-7,06267	0,857340	-8,23788	0,000000
v (cm.min-1)(K)	1,72622	0,782641	2,20564	0,036825
2L * 3L	-2,32400	1,050023	-2,21328	0,036231

Odhady efektů; R-kv.=0,92118; Upr:0,90857 (tabulka hodnot) 4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =1,022411 Plocha přetaveného základního materiálu Z (mm²)				
Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(25)	p
Průměr/ab.č.	10,28817	0,184609	55,7296	0,000000
(1)U (V)(L)	4,16475	0,412797	10,0891	0,000000
(2)I (A)(L)	3,46658	0,412797	8,3978	0,000000
(3)v (cm.min-1)(L)	-4,12975	0,412797	10,0043	0,000000
(4)N (mm)(L)	-1,83642	0,412797	-4,4487	0,000156

Odhady efektů; R-kv.=0,73876; Upr:0,70862 (tabulka hodnot)
 4 fakt. , 1 bloky , 30 poku; MS reziduí =0,0010887
Promísení D (-)

Faktor	Efekt	Sm.Ch.	t(26)	p
Průměr/ab.č.	0,421097	0,006024	69,90280	0,000000
(1)U (V)(L)	0,090528	0,013470	6,72066	0,000000
(2)I (A)(L)	-0,041520	0,013470	-3,08239	0,004814
(4)N (mm)(L)	-0,058493	0,013470	-4,34241	0,000191

Příloha D: Makrofotografie vzorků příčného řezu návarovou housenkou (vz.1 – 30)

