

**Univerzita Pardubice
Dopravní fakulty**

**Parametry jakosti svařování
vysokopevnostních materiálů při stavbě
automobilu**

Bc. Konečný Michal

Diplomová práce

2009

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal KONEČNÝ**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**

Název tématu: **Parametry jakosti svařování vysokopevnostních materiálů při stavbě autokaroserií.**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1.Představení ocelí o vysoké pevnosti v dané aplikaci. 2.Rozbor svařitelnosti daného typu materiálů, jednotlivých typů vad spojů. 3.Návrh experimentálního hodnocení vlivu jednotlivých technologických parametrů na jakost svarového spoje. 4.Experimentální svařování vybrané sady vzorků, ověření navržené metodiky. 5.Analýzy vlivu vybraných technologických, resp. materiálových parametrů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Asnis, A. Je.: Svařování ve směsi aktivních plynů. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1988 , 1. vyd.
2. Beneš, A.: Mechanická technologie kovů. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1967
3. ČSN EN ISO 14555, Svařování: obloukové přivařování svorníků z kovových materiálů. Český normalizační institut, Praha, 2001
4. Hrivňák, I.: Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin, Veda, 1988, ISBN 80-224-0016-5
5. Kocman, K., Němeček, P.: Aktuální příručka pro technický úsek. Dashöfet, Praha, 1996, ISBN 80-90 2247-2-5, 3. sv.
6. Kraus, V.: Povrchy a jejich úpravy, ZČU Plzeň, 2000, ISBN 80-7082-668-1
7. Kuncipál, J.: Teorie svařování. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1986
8. Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I.-II. CERM, s.r.o. Brno, 1999, ISBN 80-7204-193-2

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.

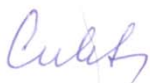
Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce:

20. února 2009

Termín odevzdání diplomové práce:

25. května 2009



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Bc. Konečný Michal

Děkuji všem, kteří mi ochotně pomáhali jak při tvorbě textu této práce, tak i při realizaci experimentu. Zvláštní poděkování patří doc. Ing. Evě Schmidové, Ph.D. a Ing. Pavlovi Švandovi, Ph.D.

ANOTACE

Práce se zabývá aplikací vysokopevných ocelí používaných pro bezpečnostní prvky karoserií osobních vozů.

V textu práce je popsán rozsáhlý experiment vedoucí ke zjištění optimálních svařovacích parametrů homogenního spoje dvou druhů základního materiálu. Následně jsou prezentovány výsledky studia svařitelnosti těchto materiálů, kdy parametrem hodnocení je statická pevnost, velikost mechanické práce a velikost hloubky vniknutí elektrod do základního materiálu.

Výsledkem práce je vytvoření výpočetního programu, který je schopen automaticky, dle zadaných vlastností základního materiálu, vypočítat hodnoty optimálních svařovacích parametrů s uvedením procentuální hodnoty vlivů jednotlivých faktorů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysocepevnostní oceli, bodové odporové svary, DOE, svařovací parametry.

ANNOTATION

The work concerns with an application of the high stress steel that is used for safety components of a vehicle body.

In the text there is described wide experiment that leads to findings of optimal welding parameters of a homogenous joint made by of two sorts of the basic materials. Sequentially there are presented results of weldability studies of these materials. Evaluation parameters are static breaking strength, a size of mechanical work and size of penetration depth of electrodes into basic material.

The result of the work is the creation of a computer program that is able to determine value of optimal welding parameters when there is mentioned percentage value of single factors and their influence. The program is able to determine value automatically in compliance with described natures of basic material.

KEYWORDS

High stress steels,dotted resisted weld, DOE, welding parameters.

Obsah

Úvod	8
1. Vlastnosti a aplikační potenciál vysokopevnostních ocelí u B-sloupků	9
2. Technologie zpracování vysokopevnostního plechu	14
2.1 Fáze lisování zatepla	15
3. Teorie svařování	18
3.1 Svařování B-sloupků	19
3.2 Děje při bodovém svařování	20
4. Vlastnosti základního materiálu ovlivňující jakost spoje	21
4.1 Vliv kyslíku na vlastnosti svarů	22
4.2 Vliv dusíku na vlastnosti svarů	23
4.3 Vliv vodíku na vlastnosti svarů	24
4.4 Vliv povrchové vrstvy na vlastnosti svarů	24
5. DOE – Taguchiho přístup	25
5.1 Taguchiho filozofie a přístup k jakosti	25
5.2 Základní pojmy	25
5.3 Výhody Taguchiho ortogonální soustavy	26
5.4 Experimentální procedura DOE	28
5.5 Návrh experimentu s interakcemi	29
5.6 Návrh experimentu s více charakteristikami jakosti	29
5.7 Robustnost návrhu	30
6. Příprava experimentu	32
6.1 Plánování experimentu	32
6.1.1 Pevnost svarového spoje ve střihu	32
6.1.2 Velikost energie, kterou pohltí svarový spoj při destrukci	33
6.1.3 Hloubka průvaru svarové čocky	34
6.1.4 Faktory ovlivňující charakteristiky jakosti	35
6.2 Navrhování experimentu	36
7. Provedení experimentu	39
7.1 Metody zkoumání, příprava vzorků	39
7.1.1 Příprava metalurgických vzorků	39
7.2 Svaření vzorků	42
8. Analýza experimentu	44
8.1 Vyhodnocení dle maximální užitečné energie	48
8.2 Vyhodnocení dle pevnosti ve střihu	52
8.3 Hodnocení výsledků pro dosažení optimální hloubky vniknutí	52
8.4 Hodnocení výsledků jednotlivých sad experimentů	53
8.5 Hodnocení obou sad experimentů	56
8.6 Tvorba výpočetního programu	58
8.7 Určení svařovacích parametrů pro provedení ověřovacího experimentu	59
9. Provedení ověřovacího experimentu	60
9.1 Vyhodnocení ověřovacího experimentu	60
9.2 Materiálové analýzy	64
9.2.1 Materiál BTR	65
9.2.2 Materiál USI	68
Závěr	72
Použité značení	74
Seznam obrázků	75
Seznam tabulek	77

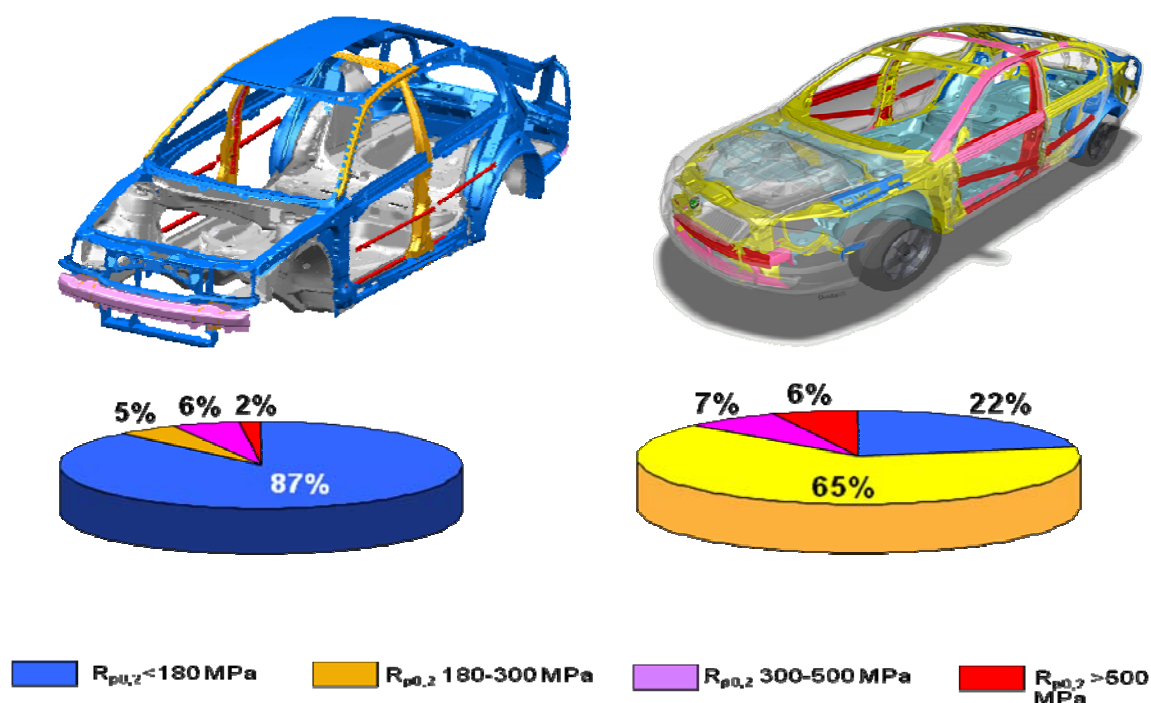
Úvod

Současně s rozvíjející se energetickou krizí a problémy životního prostředí se stává úspora energie a snižování zatížení životního prostředí při zachování nebo zvýšení bezpečnosti osádky stále většími problémy při výrobě v automobilovém průmyslu.

Mezi mnoha opatřeními při snižování spotřeby pohonných hmot, ale i emisí, je efektivnější snižování váhy. 10-ti procentní snížení hmotnosti vozidla vede ke 30-ti procentnímu snížení spotřeby pohonných hmot.

Pro redukci hmotnosti vozidla a tím i spotřeby pohonných hmot se postupně stále více využívají vysokopevné oceli. Použití těchto ocelí při výrobě automobilu umožňuje navrhovat součásti vozidla s menším průřezem při současném zvýšení bezpečnosti.

Obr. 1 ilustruje situaci konstrukce vozidla Škoda Octavia první a druhé generace.



Obr. 1: Materiály pro Škoda Octavia první a druhé generace [1]

Vývoj užívání materiálů při konstrukci automobilů směřuje k vytlačování nízkopevnostních materiálů (z 87 % snížení na 22 %) a ke zvyšování procenta vysocepevnostních materiálů (ze 2 % na 6 %) [1].

Záměrem této práce je nastínění problematiky svařování vysokopevnostních materiálů, aplikování Taguchiho přístupu při navrhování parametrů svařování s cílem určení optimálních svařovacích parametrů pro materiály USI a BTR o tloušťkách plechů 1,8 a 2,0 mm, jež jsou v praxi využívány pro B-sloupky osobních automobilů.

1. Vlastnosti a aplikační potenciál vysokopevnostních ocelí u B-sloupků

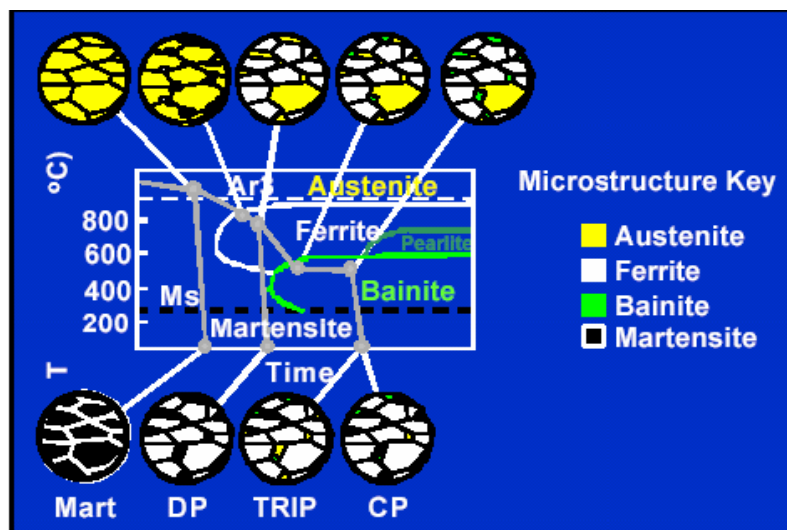
Vzhledem k nedostatku českých ekvivalentů označování materiálů bude v dalším textu použito originálního anglického pojmenování, viz str. 74 - Použité značení.

Charakteristické pro vývoj vysokopevnostních ocelí je zvyšování pevnosti pomocí různých zpevňovacích mechanismů s cílem vyhovět požadavkům jak co do pevnosti, tak i co se tvárnosti a svařitelnosti týká. V sedmdesátých letech na trh vstoupily mikrolegované oceli, jež byly zpevněny díky karbidům mikrolegur jako jsou titan, niob, vanad a díky intenzivnímu zjemňování zrn. K tomu přistoupily ocele legované fosforem, kde vlivem přídavku fosforu došlo ke zvýšení pevnosti matrice. Pevnost dvoufázových ocelí (Dual Phase - DP) se zakládá na pronikání tvrdých martenzitických podílů do feritické matrice a u Bake Hardening (BH) ocelí ovlivňuje pevnost difúze intersticiálního dusíku a uhlíku směrem ke zvýšení pevnosti materiálu. U IF (Interstitials Free) ocelí je naproti tomu zvýšeného zpevnění dosaženo legováním titanem, resp. niobem, při zachování velmi malého obsahu volného dusíku a uhlíku. Další vývoj v oblasti mikrolegovaných ocelí v devadesátých letech vedl k tzv. izotropním ocelím, jež cíleným zjemňováním zrna ve výrobním procesu vykazují takovou strukturu, jejíž chování se při tváření vyznačuje rovnoměrným posunem krystalů nezávislým na směru válcování. U vícefázových ocelí (CP steels) dochází ke zpevňování kombinací různých strukturních fází ferit, bainit, martenzit a zbytkový austenit, kde objemový podíl martenzitu je hlavní veličinou ovlivňující pevnost materiálu.

Konvenční HSS (Hardened by solid solution) oceli jsou tvrzené tuhým roztokem, precipitací nebo čistotou zrna, zatímco vyspělé vysokopevné oceli AHSS (advanced high strength steels) jsou tvrzeny transformací fáze, jež ve finálním stavu obsahuje mikrostrukturu martenzitu, bainitu ale i austenitu [2]

AHSS zahrnují dvoufázové oceli, TRIP oceli (oceli s transformačně indukovanou plasticitou) a martenzitické oceli. Tyto oceli mají vyšší mez pevnosti i tažnosti ve srovnání s konvenčními HSS a díky těmto vlastnostem napomáhají pohlcení energie při nárazu i při snižování hmotnosti konstrukce vozidla.

Aplikační potenciál pokročilých vysokopevných ocelí AHSS je jasný, přesto současná aplikace je stále ještě omezená díky vyšší ceně materiálu a náročnější technologii zpracování.



Obr. 2: Vývoj mikrostruktury při ochlazování při výrobě AHSS

Typy AHSS

AHSS, u nichž je mikrostruktura změněna během fázové transformace, zahrnuje následující varianty:

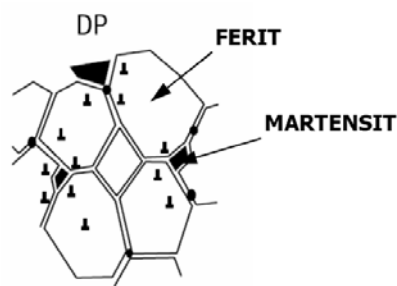
1) Dvofázové oceli (DP – Dual phase)

DP oceli jsou složeny z feritu s 5-ti až 20-ti procenty martenzitu. Mez pevnosti je v rozmezí 500 – 1 200 MPa.

DP oceli jsou charakteristické nízkým koeficientem odpevnění, vysokým koeficientem deformačního zpevnění, BH efektem (zvýšení $R_{p0,2}$ při teplotě vypalování laku) a tím, že u nich nedochází k teplotnímu stárnutí. DP oceli jsou široce použitelné pro automobilové díly, u kterých se vyžaduje vysoká pevnost, dobrá odolnost proti nárazu a dobrá svařitelnost.

Základní složení DP ocelí je C a Mn a někdy jsou přidány Cr a Mo za účelem zvýšení prokalitelnosti.

Překročí-li však objem martenzitické frakce 20 %, pak jsou DP oceli také někdy nazývány neúplnými martenzitickými ocelemi.

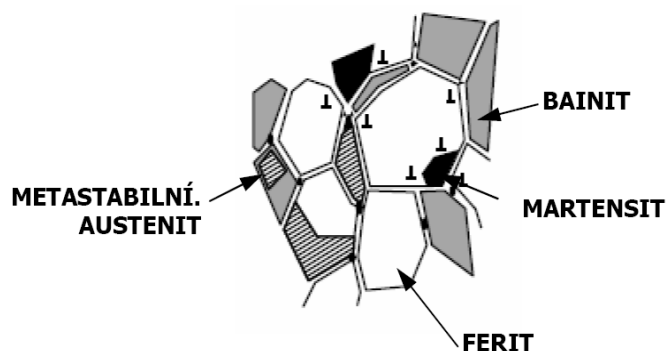


Obr. 3: Mikrostruktura DP oceli

2) TRIP oceli (oceli s transformačně indukovanou plasticitou)

TRIP oceli s mikrostrukturou feritu, bainitu a 5-ti až 15-ti procenty zbytkového austenitu dosahují po válcování zatepla meze pevnosti 600 - 800 MPa.

Tyto oceli jsou významné pro svou vysokou tažnost a vynikající koeficient deformačního zpevnění. Jsou vhodné pro tváření tažením. Si (křemík) je klíčovým prvkem pro tvorbu zbytkového austenitu, ale současně je nežádoucím při požadované vysoké jakosti povrchu plechu.

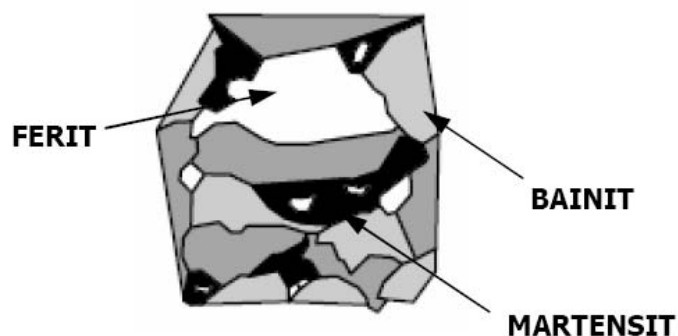


Obr. 4: Mikrostruktura TRIP oceli

3) Vícefázové oceli (CP - Complex Phase)

CP ocel má podobnou mikrostrukturu jako TRIP ocel kromě toho, že CP nemá žádný zbytkový austenit.

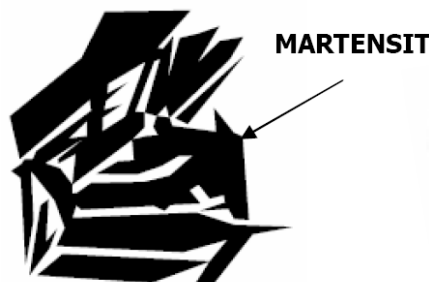
CP oceli dosahují meze pevnosti od 800 do 1 000 MPa, vyznačují se vysokým deformačním zpevněním a výbornou absorpcí energie. To dělá CP ocel vynikající pro součásti, jenž jsou namáhané dynamickým zatížením.



Obr. 5: Mikrostruktura CP oceli

4) Martenzitické oceli

Martenzitická ocel je produktem prudkého zakalení z austenitické teploty. U martenzitických plechů, bez ohledu na to, zda byly válcovány zatepla či zastudena, dosahujeme nejvyšší hodnoty meze pevnosti a to nad 1 000 MPa. Pro tuto vlastnost jsou v automobilovém průmyslu používány pro výrobu bezpečnostních prvků.



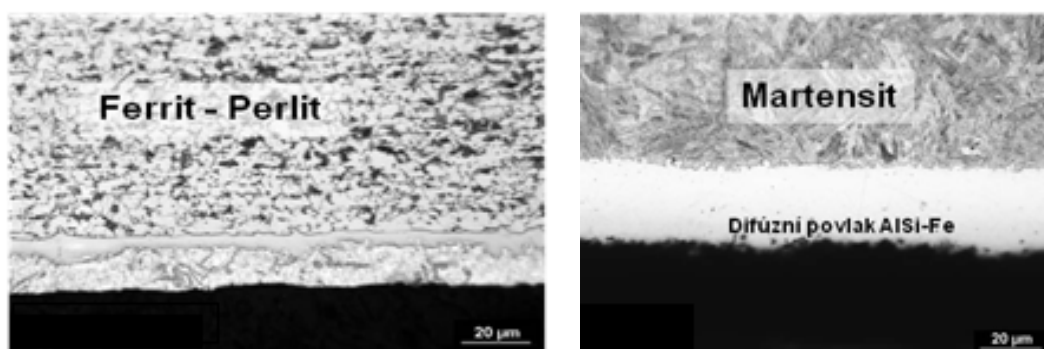
Obr. 6: Mikrostruktura martenzitické oceli

5) MnB oceli

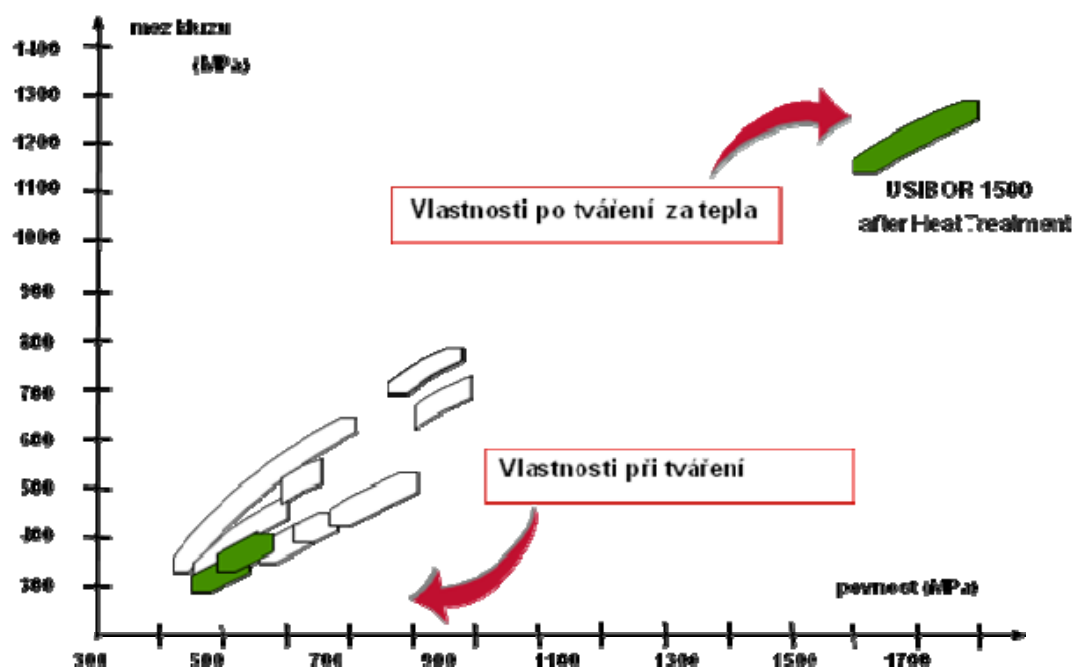
MnB oceli se používají pro plechy lisované zatepla či zastudena. Hlavními legurami jsou mangan a bór, jenž zaručují vynikající kalitelnost.

MnB oceli dosahují meze pevnosti 1 000 – 1 400 MPa.

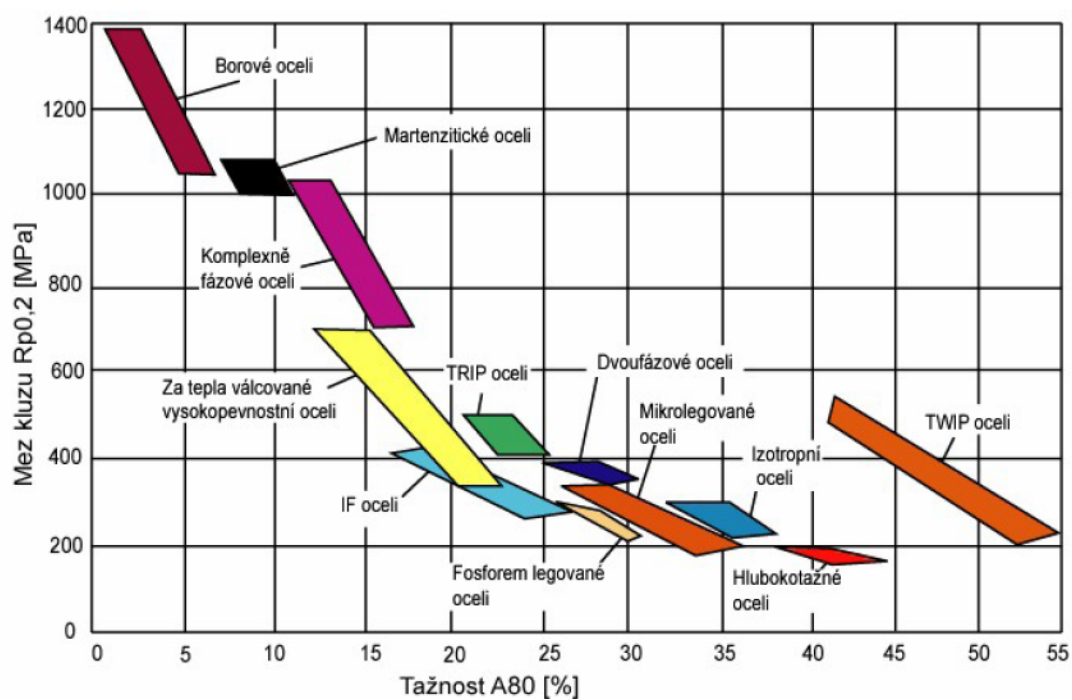
U MnB oceli válcované zastudena bývá výsledná struktura feriticko-perlitická, je-li válcována zatepla s dodatečným tepelným zpracováním, pak je výsledkem martenzitická struktura.



Obr. 7: Mikrostruktura MnB oceli válcované zastudena a zatepla [3]



Obr. 8: Vlastnosti oceli MnB válcované zastudena a zatepla [1]

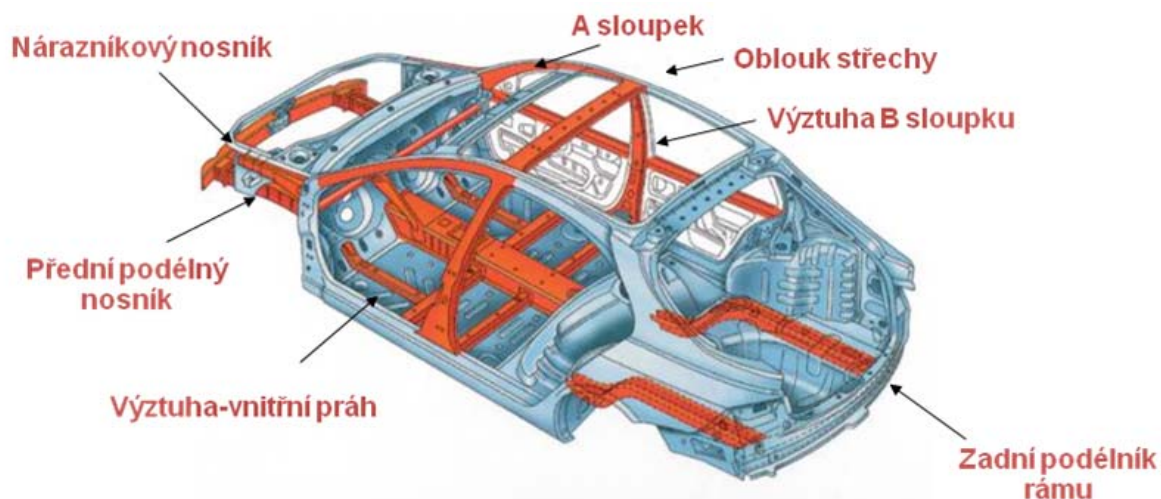


Obr. 9: Porovnání meze kluzu a tažnosti u AHSS [1]

2. Technologie zpracování vysokopevnostního plechu

Kalení lisováním je nově vyvinutá technika, pomocí které se dají vyrábět komplexní díly pro automobilový průmysl, jež v sobě spojují vysokou pevnost a nízkou hmotnost.

Touto inovativní technologií se dnes vyrábějí především vysokopevnostní části karoserie jako A a B sloupky, boční výztuhy dveří a prahů, díly rámu, uchycení nárazníku, příčné i podélné nosníky apod. [4].

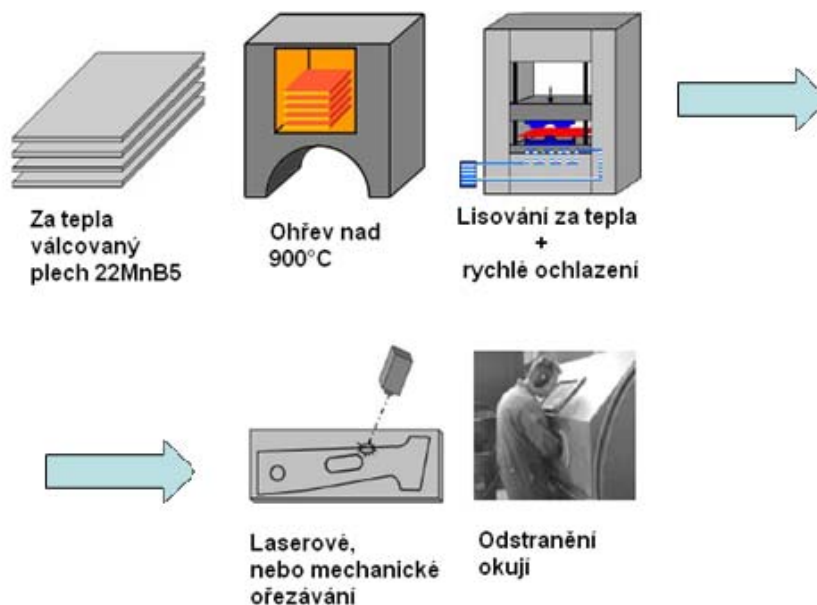


Obr. 10: Přehled vysokopevnostních částí karoserie [5]

Pro tento účel byl vyvinutý karosářský plech z martenzitické zakalitelné oceli 22MnB5, jenž má znaky hlubokotažné geometrie a pevností až 1 700 MPa. Technologie kalení lisováním spojuje výhodu tvarování za tepla, která umožňuje vyrábět komplexní hlubokotažné díly bez většího zpětného odpružení materiálu již známou metodou zvýšení pevnosti ocelových materiálů pomocí martenzitických přeměn.

Při tomto způsobu kalení se za pomoci teploty těsně nad A_{c3} změní stávající feritická struktura, která dostatečně pevnostně nevyhovuje, na kompletní austenitickou strukturu. Následně se při kalení pomocí prudkého snížení teploty pod teplotu M_s přemění austenit na martenzit. Ferit má kubickou prostorově orientovanou, zatímco austenit kubickou plošně orientovanou, mřížkovou strukturu. Proto má austenit znatelně vyšší plasticitu než ferit. Ve feritu je maximální rozpustnost uhlíku do 0,02 %. Při martenzitické přeměně austenitu se změní kubická plošně orientovaná mřížka na tetragonální prostorově orientovanou mřížku. Tvorba martenzitu je ukončena při dosažení teploty M_f . U metody kalení lisováním se před kalením tvaruje austenitická struktura a teprve s následným ochlazením se zakalí. K tomuto vytvrzení dochází v uzavřeném nástroji při kontaktu studeného povrchu nástroje s horkým povrchem tvarovaného dílu. Proto se nejprve v peci ohřívá plechový přístřih až do úplné austenitizace. Poté se zcela zaustenitizovaný polotovár vloží do nástroje v hlubokotažném lisu. Zavřením nástroje dojde nejprve ke tvarování součásti a poté při uzavřeném nástroji k jeho zušlechtní. Podmínkou celkové přeměny austenitu na martenzit je rychlá změna teploty ochlazované součásti. Tato rychlost by měla být vyšší, než je vrchní

ochlazovací rychlost v_{ok} . Zde je velikost hodnoty $M_{Sf\ ok}$ zásadně odvislá od obsahu uhlíku v materiálu. Toto platí především pro ocele s obsahem uhlíku od 0,2 do 0,4 %. V tomto rozsahu se snižují hodnoty $M_{Sf\ ok}$ s rostoucím obsahem uhlíku. Nutné zadání pro optimální tvorbu martenzitu, především A_{c3} a M_s a kritická rychlost ochlazení v_{ok} poskytuje pro každý typ materiálu diagram ARA. Pro každou ocel se musí vytvořit platný diagram ARA, z nějž je možné vyčíst chování přeměny austenitu a složení struktury dle změny rychlosti ochlazení.



Obr. 11: Schéma postupu při kalení lisováním

2.1 Fáze lisování zatepla

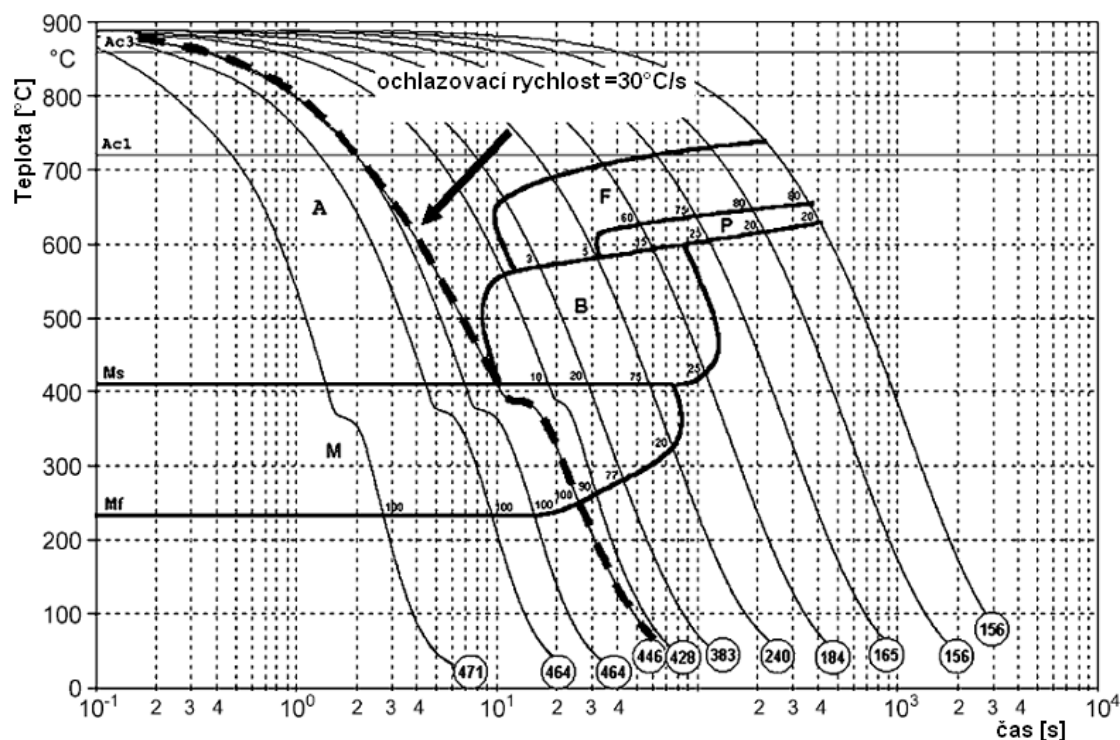
Jednou z nejvýznamnějších částí celého procesu kalení lisováním je fáze lisování. Proto se jí věnujeme podrobněji.

Lisování zatepla je technologie, jenž je závislá na dvou hlavních faktorech: času a teplotě. Probíhá v několika na sobě bezprostředně navazujících krocích. Cílem prvního kroku je přeměna existující feritické struktury na strukturu austenitickou. K této přeměně je polotovar ohřát v peci nad teplotu A_{c3} a po určitou dobu ponechán na této teplotě z důvodů přeměny na austenitickou strukturu kompletně v celém objemu polotovaru. V průměru je tato doba od 4 do 7 minut [4].

V druhém kroku se ohřátý polotovar vyjme z pece a vloží se do nástroje v lisu. Pro přepravu mezi pecí a lisem je nutný časový interval. V jeho průběhu se polotovar vlivem okolního vzduchu ochlazuje, proto se snažíme dobu přesunu minimalizovat. Výše tepelné ztráty je odvislá od tloušťky materiálu. Ztráty se běžně pohybují u materiálu o tloušťce 1,5 mm asi 20 °C/s a u materiálu o tloušťce 2,5 mm asi 10 °C/s [4]. Při použití optimálního dopravního prostředku je možno dosáhnout přepravního času od 2,5 do 3,5 vteřiny, u běžných dopravních prostředků pak přepravní čas obvykle nepřekročí hodnotu 10 vteřin [5]. To znamená, že se u polotovaru s tloušťkou 1,5 mm sníží teplota o 140 °C, pokud na přepravu z pece

do lisu bylo zapotřebí 7 vteřin. Teplotní ztrátu vzniklou z důvodu přepravy je nutné kompenzovat,

aby bylo zajištěno, že teplota polotovaru při zahájení lisování bude zajišťovat austenitickou strukturu v celém objemu polotovaru. Proto se v praxi nastavuje pec pro ohřev nad teplotu A_{c3} tj. zhruba na 1 030 °C. Tímto je teplota o cca 150 °C vyšší než teplota A_{c3} , která má 880 °C [6,7].



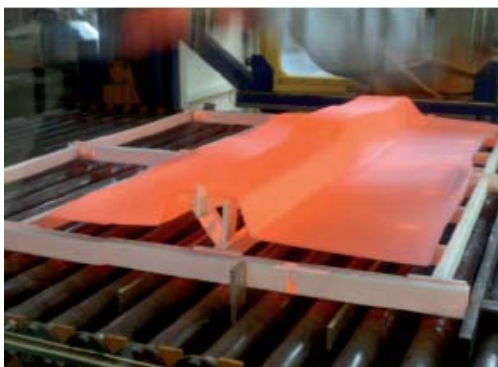
Obr. 12: ARA diagram oceli 22MnB5 [6]

Pokud se používají materiály bez povrchové úpravy, dochází při dopravě z pece do lisu ke tvorbě okují. Tomu nelze zabránit ani při ohřevu v peci s ochrannou atmosférou. Tvorbu okují lze omezit použitím povrchové úpravy Al-Si. Tato povrchová úprava není ochranou proti korozi, je pouze dobrým předpokladem pro následující lakování lisováním zušlechtěných dílů. Tavicí teplota povrchové vrstvy Al-Si je již pod 620 °C. Se stoupající teplotou však vznikají difuzní procesy, které vedou k nasycování železem. Toto vzrůstající nasycení vede k tomu, že se tavící teplota povrchové vrstvy zvedne až nad 1 100 °C. Při ohřívání polotovaru z povrchově upravených plechů je tedy nutné dbát na to, aby teplota polotovaru byla stále pod teplotou tavení povrchové úpravy, která se nastavuje podle nasycení [7, 8].

V dalším kroku výroby dojde k tváření s bezprostředně na to navazujícím zakalením ve studeném tvářecím nástroji. K dosažení maximální plastické tvarovatelnosti by měly být tepelné ztráty tvarovaného dílu co nejmenší. Rychlost uzavíracího beranu by proto měla být co největší, aby čas nutný k uzavření nástroje trval pouze několik vteřin. Moderními hydraulickými lisami lze dosáhnout uzavíracích časů od 1 do 2 vteřin [9].

Zatímco jsou při tváření požadovány minimální přechody tepla z dílu na nástroj, pro kalení je tomu naopak. Po uzavření nástroje požadujeme pro zakalení co nejvyšší tepelnou výměnu mezi nástrojem a výliskem, aby se struktura tvářeného dílu ochladila tak rychle, aby došlo k překročení kritické ochlazovací rychlosti, jenž je nutná pro vytvoření martenzitické struktury, kterou požadujeme v celém objemu výlisku.

Tvářecí nástroj zůstane tak dlouho uzavřený, dokud se nevyrovnají teploty lisu s povrchem výlisku a teplota povrchu výlisku s celým jeho objemem, což je předpoklad pro dosažení kompletní martenzitické struktury. Toto nastane v okamžiku, když teplota výlisku klesne pod teplotu M_f , který je přibližně $190\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro zajištění přeměny veškerého austenitu na martenzit by měl být nástroj otevřen až při poklesu teploty dílu na $150\text{ až }170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teprve v tomto okamžiku je možno díl z nástroje vyjmout [8, 9].

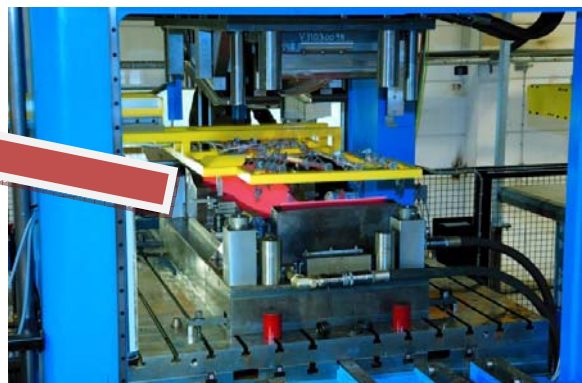


Obr. 13: Vylisovaný díl

Čas nutný pro zakalení v uzavřeném nástroji rozhodujícím způsobem ovlivňuje celkový čas potřebný pro výrobu jednoho dílu. Čím je tato takzvaná doba uzavěru kratší, tím lze očekávat vyšší produktivitu a hospodárnost technologie lisování za tepla. Kratší uzavírací doby lze dosáhnout pouze vyšší mírou chlazení a té lze dosáhnout optimalizovanou konstrukcí nástroje. Tento musí mít jednak s ohledem na míru chlazení vysokou tepelnou výměnu a na druhou stranu s ohledem na životnost a tvarovou přesnost vysokou odolnost proti opotřebení. Dnes jsou na trhu chlazené nástroje s dosažitelným chladícím účinkem až $100\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ a více. To znamená, že lze dosáhnout pomocí moderní konstrukce nástrojů časů v hodnotě do 15-ti vteřin.



Obr. 14: Lisovací
manipulátor SpeedFeeder



3. Teorie svařování

Svařování je technologický postup určený pro spojování kovových dílů, jehož výsledkem je nerozebíratelný celek. Spojované součásti většinou volíme z hutních polotovarů, např. tyče, plechy, pásy a různé profily, někdy také z výkovků a odlitků. Vlastnosti tohoto spojení je nutno posuzovat komplexně.

U svarového spoje nejsou důležité jen vlastnosti základního materiálu, tj. materiálu, z něhož je vyroben polotovar, ale také vlastnosti materiálu přídavného (je-li použit), kterým spojujeme jednotlivé díly, neboť mimo vliv metalurgického děje při svařování přistupuje ještě vliv tepelně deformačního účinku. Vhodnost materiálu na sváření vyjadřujeme pojmem svařitelnost. Svařitelnost je velmi dobrá, jestliže můžeme jednoduše, bez omezujících podmínek, získat svarové spojení požadovaných vlastností. Naopak, jestliže při sváření musíme respektovat omezující podmínky, jako jsou přehřev, dohřev apod., mluvíme o materiálu s omezenou svařitelností [10, 11].

Značné výhody svařování, jako jsou odlehčení, velká pevnost a těsnost konstrukce, dávají tomuto způsobu spojování nezpochybnitelný potenciál.

Podle stavu, v němž se materiál v době vzniku spoje nachází a podle druhu energie na vytvoření svaru, rozlišujeme svařování na tyto základní druhy:

→ **Svařování tavné** - při kterém se jak základní, tak přídavný materiál zahřeje na teplotu vyšší než je teplota tavení pomocí vhodného zdroje a poté se oba vzájemně spojí místním natavením svarových ploch, aniž by došlo k použití tlaku. Jako zdroj tepla se u této skupiny nejčastěji využívá kyslíkoacetylenový plamen, elektrický oblouk, plazma či jiné.

Protože ohřev je cílen většinou pouze do místa spoje, vznikají při pozdějším chladnutí materiálu na teplotu okolí krystalizační rozdíly. Krystalizace probíhá pouze ve velmi omezeném objemu taveniny v těsném okolí spoje s pevným základním kovem.

Do této skupiny patří např. svařování plamenem, ruční svařování elektrickým obloukem, elektrostruskové svařování, svařování laserem aj. [10].

→ **Svařování za působení tepla a tlaku** - princip tohoto svařování spočívá v natavení stykových ploch a přiblížení spojovaných součástí vyvozením potřebného tlaku, čímž dojde k samotnému trvalému spojení. Při některých technologiích se materiál ohřívá na teplotu, kdy se začne tavit, jindy se materiál ohřívá jen na teplotu, ve které je v plastickém stavu. Z metalurgického hlediska je u tohoto typu vhodné, jakého zdroje tepla použijeme.

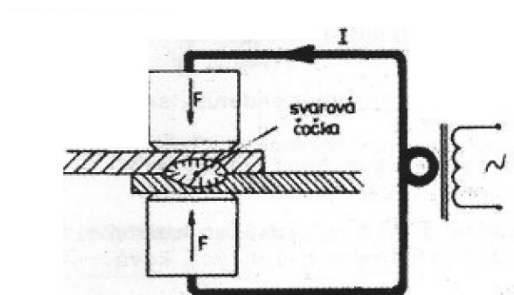
→ **Svařování za působení tlaku** - spočívá v přiblížení spojovaných součástí na vzdálenost odpovídající řádově parametru jejich krystalové mřížky. Tj. vzdálenost, umožňující vytvoření difuzních vazeb mezi hraničními mřížkami spojovaných součástí (cca 1 nm).

Při tomto způsobu spojování není tedy zapotřebí vyvinout žádné teplo.

Působící tlak je možno vyvinout výbuchem, ultrazvukem, apod. [10].

3.1 Svařování B-sloupků

Při svařování těchto konstrukčních dílů je použito technologie bodového svařování, při níž mají elektrody tvar válce s kuželovým hrotem a kruhovou dosedací plochou [12]. Velikost svaru při bodovém svařování (tj. průměr, tloušťka bodu) je dána kvazistacionárním teplotním polem, které se vytvoří v průběhu svařovacího procesu a které závisí na geometrii elektrod, termofyzikálních vlastnostech svařovaného materiálu a parametrech svařovacího režimu.

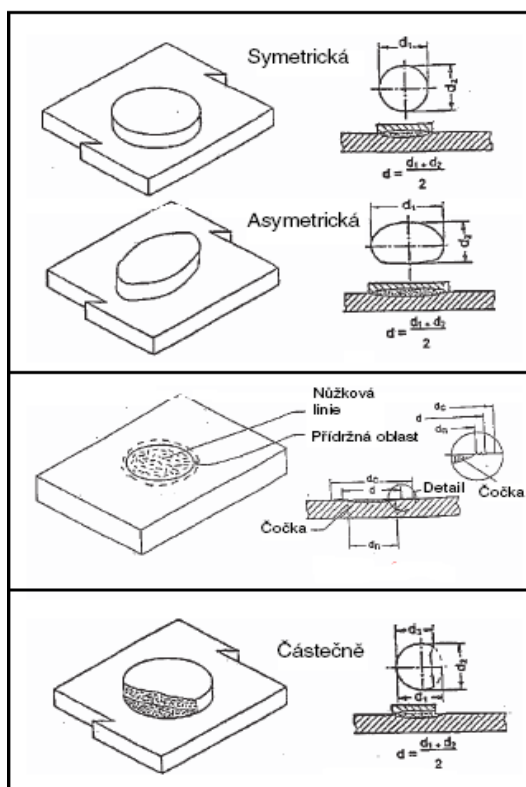


Obr. 15: Bodové svařování



Obr. 16: Bodové svařování-detail

Při svařování se nevytvoří vždy stejný tvar svaru. Při průchodu elektrického proudu ocelí a v důsledku vzniklého ohřevu probíhá vytvrzování u různých materiálů odlišnými způsoby. Tudíž svarová čočka (zrno) může být pro několik svarů odlišná:



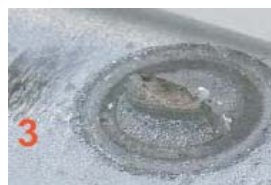
Obr. 17: Určení bodového svaru [12]



Obr. 18: Knoflíkový lom



Obr. 19: Nůžkový lom

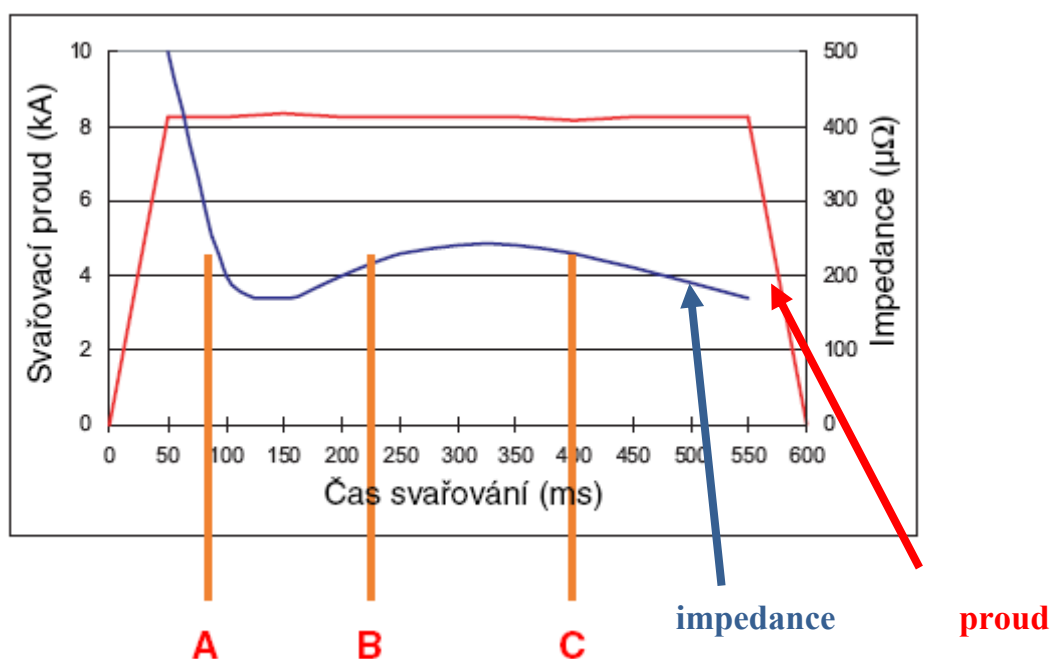


Obr. 20: Smišený lom

3.2 Děje při bodovém svařování

Pomocí dvou elektrod jsou kovové plechy k sobě přitlačeny, poté se zapíná svařovací proud, jenž musí protékat úzkým průměrem elektrod. Odporů základního kovu, odporů mezi elektrodami a základním materiálem a mezi materiálem jednoho a druhého plechu způsobí zahřívání plechů na velmi vysokou teplotu. Přítlačná síla elektrod přiková materiály k sobě. V tomto okamžiku se svářecí proud přeruší a elektrody se od sebe oddálí. Tímto je ukončen proces svařování.

Jedním ze základních parametrů ovlivňujících jakost bodového svaru je tedy velikost tepla dodaného při svařování [13]. Toto teplo je ovlivňováno velikostí času, při němž působí elektrický proud, velikostí použitého proudu a odporu [14]. U střídavého proudu je velikost odporu vyjádřena jako impedance. Průběh těchto tří veličin je znázorněn na obr. 21.



Obr. 21: Závislost proudu a impedance

A = svařovací kleště sevřeny, proud začíná protékat, vzájemný kontakt obou kovů se zlepšuje, tím pádem se impedance zmenšuje

B = proud stále protéká, plechy se ohřívají a tím pádem vzrůstá elektrický odpor

C = vytvářením svarové čocky se sníží odpor na konečnou hodnotu

Svařovací proud po dobu tvarování čocky zůstává konstantní.

Vnitřní odpor kovového plechu stoupá s jeho tvrdostí. Je tedy pravděpodobné, že plechy z rozdílných kovů budou při bodovém svařování reagovat rozdílně.

4. Vlastnosti základního materiálu ovlivňující jakost spoje

Jak již bylo výše zmíněno, na kvalitu spoje má mimo nastavení svařovacích parametrů významný vliv chemické složení matrice základního materiálu. V našem případě bylo svařování prováděno na B-sloupcích vyrobených z materiálu BTR a USI, jež obsahují 0,22 - 0,25 % C, 0,25 - 0,35 % Si, 1,2 - 1,4 % Mn a až 0,005 % B. Mimo tyto záměrně dodané legující prvky se do svarové lázně mohou dostat z okolní atmosféry i ostatní prvky, jako vodík, dusík a kyslík.

Prvky C, Si, Mn, B mají jednoznačný vliv na prokalitelnost.

Ocel, jež má vyhovovat požadavkům kvalitního zakalení, musí mít obsah uhlíku minimálně 0,2 %. Čím větší množství uhlíku dodáme do oceli, tím je schopna dosáhnout po zakalení vyšších hodnot pevnosti. Oproti tomu oceli vhodné ke svařování využívají obsahu uhlíku s maximální hodnotou 0,3 %.

Obsah *křemíku* v základní matici má vliv na zvyšování mj. pevnosti, tvrdosti, pružnosti a prokalitelnosti. Jeho přítomnost negativně působí na tažnost, tvárnost a podobně jako u uhlíku na svařitelnost oceli.

Mangan patří mezi austenitotvorné prvky. Ve slitinách Fe-Mn-C je část manganu rozpuštěna v základní kovové matici a část tvoří podvojný karbid $(\text{Fe, Mn})_3\text{C}$. Rozdělovací koeficient závisí na obsahu manganu a uhlíku. V rovnovážném diagramu železo-cementit posouvá bod E vpravo, tj. zvyšuje rozpustnost uhlíku v austenitu.

Mangan ovlivňuje také tepelné zpracování ocelí. Se stoupajícím obsahem manganu se zpomaluje transformace austenitu v perlitické a bainitické oblasti. Křivky TTT (Temperature - Time - Transformation) se posouvají vpravo, takže se zvyšuje prokalitelnost [15].

Bór je často používán jako legura ve stopovém množství u ocelí ke svařování pro řízení tvorby fází, které zahajují v austenitu tvorbu povrchu zrna. Vyjimečnou vlastností borových ocelí je zlepšení kalitelnosti přidáním pouze malého množství bóru [6, 14].

Je obecně známo, že vrchol kalitelnosti je dosažen při množství mezi 3 až 15-ti ppm. Je-li v oceli větší množství než 30 ppm bóru, vyloučí se bór v austenitu na hranicích zrn, což vede nejen ke snížení kalitelnosti, ale také může snížit houževnatost materiálu. To se pak stává příčinou křehnutí a praskání za tepla. Vliv bóru také závisí na množství uhlíku v oceli. Jeho účinek vzrůstá obráceně k poměru k procentu uhlíku.

V našem případě se jedná o materiál s obsahem uhlíku 0,22 - 0,25 %, což nepředstavuje typický limitní stav z hlediska problematiky zakalení v tepelně ovlivněné oblasti.

V souvislosti s nižším obsahem uhlíku lze předpokládat, že po martenzitickém zakalení materiálu nevznikne vysokouhlíkový martenzit, jenž bývá spojován se značnou ztrátou tažnosti [14]. Nehrozí tedy vady typu studených trhlin.

S ohledem na skutečnost, že jsou tyto oceli definovány jako oceli se zaručenou svařitelností, není nutno kontrolovat materiál na uhlíkový ekvivalent CE.

Jako možný limitující ukazatel při svařování daného materiálu, respektive vlivný na pevnostní charakteristiky, je nutno spíše uvažovat o vlivech metalurgických procesů, tedy:

- 1) vzniku apriorních vad typu inkluzí, heterogenit apod. jako důsledku přítomnosti nežádoucích prvků (viz dále),
- 2) rafinačního procesu v etapě krystalizace svarového kovu, který v podstatě představuje miniaturní svarovou lázeň, v níž se opět uplatňují nejen procesy dezoxidace, ale také i možné segregace, kupříkladu fosforu.

V této souvislosti se může opět uplatnit vliv výše diskutovaných legur jako dezoxidačních prvků, např. heterogenity. Jedná se konkrétně o Si, Mn, B, popřípadě možné stopové množství Ti a Al. V pořadí Al, Ti, Si, Mn, B klesá afinita ke kyslíku, jenž určuje nástup vzniku možných oxidů. Účinek těchto prvků se uplatňuje postupně dle aktuálního obsahu ve svarové lázni a také její teploty.

4.1 Vliv kyslíku na vlastnosti svarů

Má-li vzduch volný přístup k roztavené svarové lázni a do oblasti sloupce elektrického oblouku, bude se zde kyslík nacházet ve třech formách: molekulární, atomární a ionizovaný (v oblasti nejvyšších teplot elektrického oblouku). Molekulární a atomární kyslík reaguje přímo s kovovými prvky na oxidy (oxidační reakce), často s vysokou teplotou tavení. Se železem tvoří kyslík tři oxidy: FeO (železnatý), Fe₂O₃ (železitý) a Fe₃O₄ (železnato-železitý). Oxidace železa může probíhat vlivem molekulárního kyslíku a v důsledku vysoké teploty elektrického oblouku je možno předpokládat i oxidaci železa atomárním kyslíkem, která je méně pravděpodobná než oxidace molekulárním kyslíkem [11].

Oxidace svarového kovu nastává i při redukčních procesech křemíku a manganu. Přejít těchto prvků do svarové lázně ze strusky je podle molekulární teorie spojen s oxidací železa na FeO, který z části přechází do strusky a z části dojde k jeho rozpouštění ve svarové lázni.

Obsah kyslíku ve svarové lázni se zvyšuje také při znečištění svarových ploch vyššími oxidy železa (rez) a vysokým obsahem Fe₂O₃ v tavidle.

Rozpouští-li se vznikající oxid ve svarové lázni, je v ní nositelem kyslíku. Nejvíce kyslíku obsahuje FeO, který jediný z uvedených oxidů se ve svarové lázni rozpouští. Jeho rozpustnost roste se stoupající teplotou. Protože je FeO lehčí, stoupá k povrchu svarové lázně a vytváří na ní jemnou vrstvičku okují. Není-li FeO vázán např. struskou (struska je sama bohatá na FeO nebo je jí málo a ještě k tomu špatně váže FeO), vrací se zpět do svarové lázně a tím dochází k jejímu obohacování kyslíkem.

Nepříznivý účinek kyslíku ve svarovém kovu se projevuje precipitačními procesy oxidů železa v důsledku rozdílné rozpustnosti kyslíku v železe α a γ , jakožto i proměnlivé rozpustnosti v železe β s teplotou. Jeho rozpustnost se výrazně snižuje při krystalizaci svarové lázně.

Zůstane-li kyslík ve svarovém kovu, zhorší se jeho mechanické vlastnosti.

Kovů, které mají zvýšenou schopnost slučovat se s kyslíkem, se používá v obalech elektrod a v tavidlech k dezoxidaci svarové lázně. Nejčastěji se používá ferosicilia (FeSi), feromanganu (FeMn) a ferotitanu (FeTi), které vážou vytvořený FeO tím, že s jeho kyslíkem vytvoří jiné, v železe již nerozpustné oxidy.

Při dezoxidaci manganem tento reaguje velmi pomalu a dochází proto také současně k reakci FeO s uhlíkem. Tato reakce probíhá ještě při tuhnutí. Vznikající CO z větší části uniká, ale mohou vznikat póry, a to hlavně tehdy, když svarový kov obsahuje malé množství křemíku.

Při dezoxidaci křemíkem či titanem vznikají nové oxidy (křemičitý, titaničitý, manganatý) a dále se vážou s kyslíkem oxidů FeO nebo MnO a tvoří jednoduché nebo podvojně silikáty. Ty jsou v železe nerozpustné, z nich se kyslík již více neuvolňuje a přechází do strusky, čímž je svarový kov nezoxidován [10].

4.2 Vliv dusíku na vlastnosti svarů

Dusíku je ve svaru různé množství, podle toho, jak měl k svarové lázni přístup vzduch. Z atmosférických plynů ovlivňuje jakost svarového kovu v největší míře dusík. Atmosférický vzduch obsahuje 78 % dusíku ve formě dvouatomového plynu. Aktivita dvouatomového dusíku je relativně malá, avšak v oblasti teplot elektrického oblouku dochází k reakci s kyslíkem a vzniká oxid dusnatý. Vzniklý atomární dusík má podstatně větší difúzní schopnost než dusík molekulární a tím jsou vytvořeny podmínky i pro jeho intenzivní přechod do svarového kovu.

Dusík může být příčinou pórů nebo vzniku nitridů, což obojí výrazně ovlivňuje kvalitu svarového spoje. Klesá-li teplota svarového kovu dostatečně pomalu, dochází k uvolňování dusíku a ten z něho uniká, aniž by došlo ke vzniku pórů. Je-li však svarový kov nasycen do té míry, že v daném časovém intervalu při poklesu teploty nemůže v dostatečném množství dusík uniknout nebo probíhá-li proces chladnutí příliš rychle, jsou všechny předpoklady pro vznik pórovitosti.

Atomární dusík se ale také v rozmezí teplot 800 - 500 °C začne slučovat se železem na nežádoucí nitrid železa Fe₄N, který s feritem tvoří tuhý roztok. Při rychlém ochlazování zůstanou nitridy v železe α rozpuštěny, zabrání se rozpadu přesyceného tuhého roztoku v železe α , zůstane také zachována jeho maximální neuspořádanost (atomy dusíku jsou v mřížkách železa α uloženy náhodně) a maximální koncentrace vakancí. Při dalším poklesu teploty, asi na 250 °C, dochází k uspořádání neuspořádaného přesyceného tuhého roztoku v železe α , atomy dusíku se seskupují hlavně v okolí dislokačních smyček (do nich kondenzuje část vakancí), dislokací a jiných mřížkových poruch, precipitují ve formě destiček

nebo jehlicovitých útvarů. Výsledkem je pokles vrubové houževnatosti. Dusík tím vyvolá stárnutí svarového spoje [10].

4.3 Vliv vodíku na vlastnosti svarů

Vodík se dostává do svarů z atmosférického vzduchu, z nedostatečně vysušených obalů elektrod, tavidel a ze znečištěného povrchu základního materiálu.

Vodík je příčinou řady negativních jevů vedoucích ke zhoršení kvality svarových spojů, neboť ve svarovém spoji v důsledku změny své modifikace podmiňuje vznik vysoké hladiny mikronapětí, respektive vznik trhlin za studena. V atomární formě se rozpouští v železe za vysokých teplot. Při teplotě přechodu tekutého železa do tuhého stavu klesá rozpustnost vodíku rychle, při dalším ochlazování již pomaleji. Podobně jako u kyslíku a dusíku dochází v oblasti solidifikace k výraznému poklesu rozpustnosti a vodík se při tuhnutí uvolňuje. Difunduje přitom do dutin, mezer, míst struskových vměstků a jiných necelistvostí, mění se tam na molekulární vodík, což je doprovázeno zvyšováním jeho tlaku.

Uzavřený vodík v místech s porušenou mřížkou je pod velkým tlakem a zvyšuje napětí ve svaru. Někdy je toto napětí tak velké, že přestoupí pevnost kovu a vznikají kruhové trhliny, tzv. vločky. Je-li napětí způsobené molekulárním vodíkem menší než pevnost kovu, zůstane vodík uzavřen ve svaru pod tlakem i za normální teploty. Jestliže pak k tomuto napětí přistoupí přídavné napětí od provozního namáhání, vzniká kruhová trhlina, v jejímž středu je obvykle struskový vměstek, dutina apod., vznikají tzv. rybí oka.

K zabránění pórů vlivem vodíku se používají tavidla (strusky) s vysokým obsahem fluoridů a určitým množstvím SiO_2 .

4.4 Vliv povrchové vrstvy na vlastnosti svarů

Běžnou metodou ochrany oceli proti korozi jsou ochranné povlaky, které vytvářejí bariéru mezi ocelí a korozním prostředím. Nejčastěji využívaným kovem, který je především v ochraně proti atmosférické korozi schopen zajistit dlouhodobou životnost ocelového dílu, je zinek s přísadou hliníku. Vzhledem k tomu, že při svařování hrozí nebezpečí pouze v důsledku přítomnosti hliníku, vliv zinku zanedbáme.

Velká afinita hliníku ke kyslíku má za následek tvorbu oxidové vrstvy Al_2O_3 s vysokou teplotou tavení asi 2 050 °C. Oxid zabraňuje metalickému propojení svarového kovu a je nutno jej během svařování odstraňovat (u MIG svařování např. kinetickou energií kladných iontů, které svým dopadem vrstvičku oxidu naruší). Vrstva Al_2O_3 je elektricky nevodivá, tím se zhoršují podmínky pro stabilní průběh elektrického oblouku. Dále je hygroskopická, tj. pohlcuje vlhkost z okolí, a proto je zdrojem vodíku ve svarovém kovu. To s sebou přináší další problémy při svařovacím procesu.

5. DOE – Taguchiho přístup

5.1 Taguchiho filozofie a přístup k jakosti

Design of Experiments (DOE) používající Taguchiho přístup je standardizovanou formou techniky plánování experimentů, kterou vyvinul Angličan R. A. Fisher na začátku 20. let minulého století (1920). Na konci 40. let minulého století se D. R. Taguchi začal zabývat zlepšováním kvality. Taguchi usiloval o zjednodušení a standardizaci techniky DOE. Jeho technika byla poté uplatňována úspěšně v mnoha organizacích.

DOE je experimentální strategie, při které najednou studujeme účinky několika faktorů prostřednictvím jejich testování na různých úrovních.

Taguchiho přístup vede k nové definici jakosti. Ta je definována množstvím ztrát, které výrobek způsobí společnosti poté, co je dán do užívání. Důsledkem tohoto přístupu může pak být provedena kalkulace nákladů způsobených špatnou kvalitou. Dle Taguchiho filozofie je nutno jakost výrobku či procesu navrhovat a ne pouze kontrolovat. Aplikace DOE v návrhové fázi jsou pomalejší, přinášejí však větší zisk.

5.2 Základní pojmy

Při všech úrovních aplikace DOE používáme následující výrazy, které je nutno vysvětlit:

- *charakteristika jakosti*, Y - je veličina, pomocí níž se vyjadřují určité vlastnosti produktu či procesu. V experimentální terminologii představuje charakteristika jakosti závislou proměnnou, díky které jsou kvantifikovány výsledky experimentů
- *faktor (parametr)*, A - je nezávislá návrhová proměnná ovlivňující charakteristiku jakosti. Symbolicky jsou označovány faktory velkými tiskacími písmeny, tj. A, B, C atd. a jejich úrovně pro experiment označujeme jako A1 (faktor A na první úrovni), A2 (faktor A na druhé úrovni) apod.

Faktory dělíme na dvě skupiny:

- *spojité* – pro danou úroveň lze nastavit jejich libovolnou hodnotu (ve vymezeném pracovním rozsahu) např. teplota, tlak atd.
- *diskrétní* – pro danou úroveň lze nastavit konkrétní jedinou hodnotu nebo status, např. typ materiálu

Dle toho, jakým způsobem lze zacházet s faktory, možno rozlišit:

- *regulovatelný faktor* – je návrhová proměnná, o níž si myslíme, že ovlivňuje odezvu (charakteristiku jakosti) a je při tom začleněna do experimentu. Hodnotu proměnné můžeme a zároveň požadujeme nastavit a udržovat.
- *šumový faktor* – je faktorem, jenž negativně ovlivňuje odezvu (charakteristiku jakosti) a narušuje funkce produktu. Takový faktor nemůžeme nebo nechceme

při vlastní aplikaci nastavit a udržovat na požadované hodnotě, ale můžeme toto provádět během experimentu

- *interakce* – závislost jednoho faktoru na druhém, vyjadřuje vliv jednoho faktoru na přítomnosti (nastavení) druhého faktoru. Symbolicky značíme $A \times B$. Interakcí může existovat velký počet. Abychom navrhovali experimenty efektivně a správně, musíme vytvořit rozumnou rovnováhu mezi počtem zkoumaných faktorů a interakcí. Taguchiho DOE se zabývá pouze interakcemi prvního řádu. Interakce vyšších řádů dle empirických zkušeností nebývají významné, a proto je zanedbáváme.

5.3 Výhody Taguchiho ortogonální soustavy

Budeme-li studovat, jaký má faktor vliv na daný výsledek, musíme provést experiment se dvěma nebo více úrovněmi faktorů. Nejmenší možný experiment bude testování jednoho faktoru ve dvou úrovních, tj. A1 a A2. Je tedy nutno provést dva testy (2^1).

Budeme-li zjišťovat vliv dvou faktorů ve dvou úrovních, je nutno provést 2^2 , tedy 4 testy (A1 B1, A1 B2, A2 B1, A2 B2).

Při testu 15 faktorů ve 2 úrovních je nutno provést 2^{15} , tedy 32 768 testů atp.

Je zřejmé, že v podnikové praxi není možné provádět takové experimenty nejen z důvodů časové a ekonomické náročnosti. Proto Taguchi sestavil soustavu speciálních tabulek (tzv. ortogonální soustavy), podle kterých lze provádět pouze malou část z celkového počtu možných experimentů. Pomocí těchto soustav provádíme nejmenší možný počet experimentů s maximálním množstvím získaných informací.

Při návrhu experimentů je nutno získat odpovědi na dvě otázky. Kolik experimentů musíme provést a jaké podmínky budou pro jednotlivé experimenty. Na tyto otázky nalezneme odpovědi pomocí návrhu využívajícího Taguchiho ortogonální soustavy.

Pro náš případ byl navržen experiment se čtyřmi faktory ve třech úrovních se třemi interakcemi (vysvětleno níže). Proto byl využit ortogonální systém L27, jenž byl upraven přímo pro naše požadavky.

	A	B	AxB	C	AxC	BxC	D
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1
5	1	2	2	2	2	2	2
6	1	2	2	2	3	3	3
7	1	3	3	3	1	1	1
8	1	3	3	3	2	2	2
9	1	3	3	3	3	3	3
10	2	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3
14	2	2	3	1	2	3	1
15	2	2	3	1	3	1	2
16	2	3	1	2	1	2	3
17	2	3	1	2	2	3	1
18	2	3	1	2	3	1	2
19	3	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2
23	3	2	1	3	2	1	3
24	3	2	1	3	3	2	1
25	3	3	2	1	1	3	2
26	3	3	2	1	2	1	3
27	3	3	2	1	3	2	1

Tab. 1: Upravený ortogonální systém L27

„L“ v označení tabulky vyjadřuje původ soustavy (eulerovy latinské čtverce), číslice 27 vyjadřuje počet pokusů. Číslice v soustavě (1, 2, 3) reprezentují úrovně faktorů. Řádky reprezentují podmínky pro jednotlivé pokusy. Sloupce indikují možnost přiřazení faktoru.

Všimněme si, že první řádek soustavy obsahuje samé jedničky (všechny faktory jsou na základní úrovni). Toto platí pro všechny ortogonální soustavy. Naproti tomu není k dispozici řádek se samými maximálními hodnotami.

Sloupce v soustavě jsou ortogonální a vyvážené, tzn. ve všech sloupcích je stejný počet jedniček, dvojek a trojek. Jsou vyvážené rovněž dvojice sloupců, tzn. v každé dvojici sloupců je stejný počet dvojic. Experiment se čtyřmi faktory ve třech úrovních znamená, že každý z faktorů je přiřazen do jednoho sloupce. Pro tyto čtyři faktory provedeme 27 pokusů dle ortogonální soustavy.

5.4 Experimentální procedura DOE

Při navrhování systému DOE postupujeme v 5 krocích, tj.:

- 1) *plánování experimentu*
- 2) *navrhování experimentu*
- 3) *provedení experimentu*
- 4) *analýza experimentu*
- 5) *provedení ověřovacího testu*

Plánování experimentu představuje inženýrskou část Taguchiho metody. V této části musí experimentální tým jednoznačně definovat všechny nutné vstupy pro návrh systému, tj. především definovat cíl experimentu, charakteristiku jakosti, faktory ovlivňující charakteristiku jakosti a jejich počet úrovní. Tato část postupu probíhá při brainstormingu.

Při návrhu experimentu je nutno určit použitou ortogonální soustavu s ohledem na možné interakce v systému, smíšené úrovně a opakování, jenž má zajistit robustnost. Tato část vychází z části plánování experimentu.

Provedení experimentu dle daného návrhu provádíme v aktuálních výrobních podmínkách, v laboratoři atp. Důležitou podmínkou je provádět experimenty v náhodném pořadí.

Analýzu experimentu provádíme ve 3 krocích. V prvním kroku určujeme průměrné a hlavní účinky faktorů a stanovujeme optimální podmínky. V druhém kroku zjišťujeme procentuální podíl faktorů (ANOVA) a ve třetím kroku hodnoty charakteristiky jakosti při optimálních podmínkách.

Ověřovacími testy potvrzujeme, jsou-li závěry z analýzy správné. Ověřovací testy jsou nedílnou součástí Taguchiho metody.

5.5 Návrh experimentu s interakcemi

Přes veškerou snahu, při návrhu systému a při experimentu, se v praxi dostáváme do situací, v nichž je při experimentech nutno zkoumat interakce. Pokud označíme celkový počet faktorů N , bude mezi nimi existovat $[N \cdot (N - 1)]/2$ interakcí. To je velké číslo. Když posoudíme např. situaci pro sedm faktorů ve dvou úrovních, existuje mezi faktory $7 \cdot 6/2 = 21$ interakcí. Je zřejmé, že si nemůžeme dovolit zkoumat všechny interakce, proto při plánování experimentu pečlivě zvažujeme, zda je nutné interakci zkoumat a vybíráme opravdu jen důležité případy.

Interakce mezi faktory zapisujeme symbolicky $A \times B$. Při přiřazování sloupců jednotlivým interakcím platí pravidla, kterými se musíme řídit. Nemusíme naštěstí zjišťovat, které sloupce v ortogonální soustavě tvoří interakční skupiny, protože Taguchi vyvinul pro tento účel triangulární tabulky:

sloupec:	1	2	3	4	5	6	7
	(1)	3	2	5	4	7	6
		(2)	1	6	7	4	5
			(3)	7	6	5	4
				(4)	1	2	3
					(5)	3	2
						(6)	1
							... atd.

Tab. 2: Taguchiho triangulární tabulka

Aplikace použití interakční tabulky na daný případ bude vysvětlena později v textu.

5.6 Návrh experimentu s více charakteristikami jakosti

Jak již bylo výše zmíněno, charakteristiky jakosti zapisujeme do posledního sloupce v ortogonální soustavě. Ke každému experimentu přísluší jeden výsledek. Tedy výsledek o jednom čísle. Matematické metody, a tedy ani Taguchiho analýza, neumí analyzovat výsledky zapsané formou více čísel.

Této situaci se snažíme vyhnout tak, že nahradíme tato čísla číslem jediným se stejnou vypovídající hodnotou, tj. převedeme více čísel na číslo jediné. Pro převod existují následující případy:

- při provedení testu je na výstupu více výrobků. Všechny tyto výrobky přísluší danému experimentu (danému jednomu nastavení parametrů). Pokud je na výstupu např. 10 výrobků, změříme na všech charakteristiku jakosti a vypočteme aritmetický průměr. Vypočtený aritmetický průměr se pak zapíše do posledního sloupce jako výsledek experimentu, tedy jediné číslo,
- jsou provedena opakování testů. Opakujeme-li test např. desetkrát, získáváme měřením 10-ti stejných experimentů deset většinou blízkých čísel.

Do sloupce pro charakteristiky jakosti pak zapíšeme výsledek experimentu vyjádřený jedním číslem ve formě S/N - signál/šum (viz dále),

- pokud při experimentování chceme zlepšit více než jednu charakteristiku jakosti, nebo při zlepšování jedné charakteristiky jakosti, mohou být implicitně ovlivňovány i některé další charakteristiky jakosti. Máme-li hodnoty více různých charakteristik jakosti, pak je nutno použít speciální postup pro „slučování“ do jediného kritéria pro hodnocení OEC (Overall Evaluation Criteria). OEC zapisujeme jako výsledek experimentu jediným číslem.

Obecně platí, že experiment s více charakteristikami jakosti vždy představuje určitý kompromis. Proto se tomuto snažíme vyhnout. Není-li jiné cesty, než sloučit výsledky několika experimentů, použijeme jeden z výše popsanych postupů.

Měřitelné charakteristiky jakosti při zpracovávání výsledků budeme dělit do následujících typů:

- typ S (smaller is better), čím menší tím lepší, cílovou hodnotou je 0,
- typ B (digger is better), čím větší tím lepší, cílovou hodnotou je $+\infty$,
- typ N (nominal is best), cílovou hodnotou je obvykle střed tolerančního pole.

5.7 Robustnost návrhu

Variabilita v provedení charakteristiky jakosti je zapříčiněna regulovatelnými a šumovými faktory. Při metodě DOE jsme schopni rozpoznávat faktory, jenž mají vliv na charakteristiku jakosti a posléze jsme schopni tyto faktory nastavovat tak, aby bylo dosaženo konzistentnosti provedení. Problémem je, že u mnoha systémů je variabilita zapříčiněna z větší části šumovými faktory. Pro tyto situace zdokonalil Taguchi strategii robustnosti návrhu, ve které se dle jeho představ minimalizuje vliv šumových faktorů pomocí nastavení regulovatelných faktorů. Tzn., že požadovaný návrh není proveden výběrem hodnot regulovatelných faktorů za optimálních či standardních podmínek, ale hledáním takového návrhu, jenž poskytuje konzistentnost provedení při působení šumových faktorů.

Na rozdíl od jiných teorií se při robustním návrhu nesnažíme odstranit příčiny variability. Jejich účinky regulujeme tak, že zajistíme nastavení regulovatelných faktorů tak, aby bylo imunní vůči šumovým vlivům.

Důsledkem práce se šumovými faktory při provádění experimentu je to, že každý z experimentů provedeme více než jedenkrát při jednom a tom samém nastavení parametrů ovlivňujících charakteristiku jakosti. Z tohoto důvodu se tyto experimenty nazývají také jako experimenty s opakováním. Šumové faktory do experimentu zahrnujeme v zásadě třemi způsoby:

- *Prosté opakování*, při kterém neidentifikujeme jednotlivé šumové faktory, pouze je bereme jako celek, jenž náhodně ovlivňuje charakteristiku jakosti. Šumové faktory jsou

zahrnuty do experimentu tak, že jednotlivé experimenty provádíme více než jedenkrát. Při náhodném zařazení šumových faktorů do experimentu je počet opakování volen subjektivně dle povahy projektu a rozhodnutí realizačního týmu. Je zvykem provést dvě až pět opakování. Tento postup je z hlediska praktické realizace nejjednodušší, ale také nejméně sofistikovaný.

- *Kombinace extrémních hodnot šumových faktorů.* Identifikujeme jednotlivé faktory, ale nezkoumáme je objektivně, nýbrž skupinově. Při provádění návrhu experimentu vytvoříme nejhorší a nejlepší možnou kombinaci úrovní faktorů, přičemž každý experiment provádíme dvakrát – tj. při nejhorších a nejlepších šumových podmínkách. Je-li proces či produkt robustní vůči extrémním šumovým podmínkám, bude s vysokou pravděpodobností robustní i vůči kombinacím šumových faktorů mezi těmito extrémy.
- *Experimenty s vnější soustavou.* Využíváme je v případech, kdy považujeme za nutné zkoumat vlivy šumových faktorů individuálně. Typickým příkladem takového případu může být zkoumání diskretních šumových faktorů. Taguchiho zdokonalení DOE analýzy zahrnuje větší množství šumových faktorů do návrhu experimentů tak, že každý z šumových faktorů lze studovat individuálně. Pro tento účel dle Taguchiho metody byly vyvinuty vnitřní a vnější ortogonální soustavy, přičemž vnitřní soustavy jsou užívány pro regulovatelné faktory a vnější pro šumové faktory.

6. Příprava experimentu

6.1 Plánování experimentu

Na kvalitní výsledky experimentu má největší vliv přípravná fáze. Zanedbání či opomenutí jakéhokoliv činitele ovlivňujícího výsledné hodnoty s sebou přináší zvýšené procento chybovosti výsledků. Budeme-li pak požadovat snížení této chybovosti, je nutno se navrátit opět až k fázi plánování. Proto je třeba plánování experimentu řešit jako souhrn maxima informací, které podávají specializovaní odborníci z několika oborů (dále jen experimentální tým) při brainstormingu.

Cílem experimentu bylo zjistit optimální nastavení parametrů jakosti vysokopevných materiálů, jenž bývají využívány při stavbě automobilů. Konkrétně šlo o materiály BTR s tloušťkou plechu 2 mm a o USI v šířce plechu 1,8 mm. Tyto materiály byly poskytnuty firmou Škoda Auto, a. s., ve formě B-sloupků.

Jedním z nejnáročnějších úkolů experimentálního týmu je definovat charakteristiky jakosti a faktory, které ji ovlivňují.

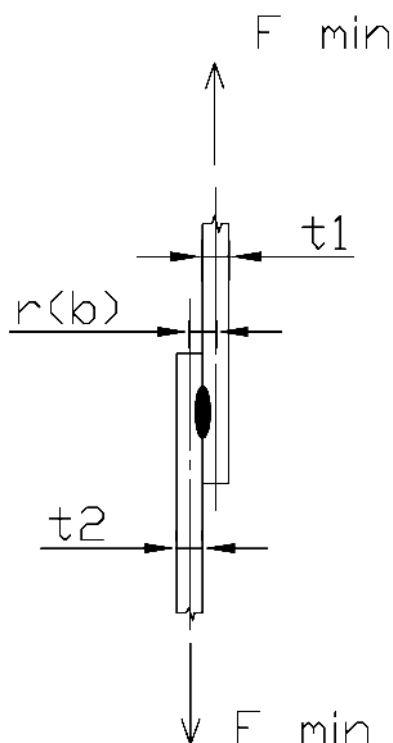
Experimentální tým se rozhodl využít možnosti volby několika charakteristik jakosti a to i přes následné komplikace při fázi vyhodnocování. Jako charakteristiky jakosti byly tedy voleny:

- pevnosti svarového spoje ve stříhu
- velikost energie, kterou pohltí svarový spoj při destrukci
- hloubka průvaru svarové čochky

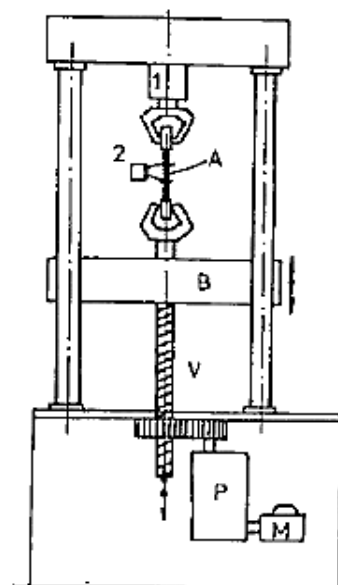
6.1.1 Pevnost svarového spoje ve stříhu

Pevnost je zjišťována při stříhové destrukční zkoušce. Jednotlivý svarový bod je na zkušebním trhacím stroji zkoušen až do selhání svarového bodu. Přitom se měří síla potřebná k selhání vzorku. Selhání je definováno jako přetržení svařených částí nebo jako 10% pokles síly na zkušebním trhacím stroji.

Za výslednou hodnotu je považována síla, při níž dojde k destrukci svarového spoje.



Obr. 22: Stříhová zkouška [16,17]



Obr. 23: Schéma univerzálního zkušebního stroje

6.1.2 Velikost energie, kterou pohltní svarový spoj při destrukci

Jedním z nejdůležitějších požadavků pro bezpečnost karoserie, potažmo automobilu, je schopnost konstrukčního celku pohlcovat energii, která vznikne při střetu vozidla s překážkou.

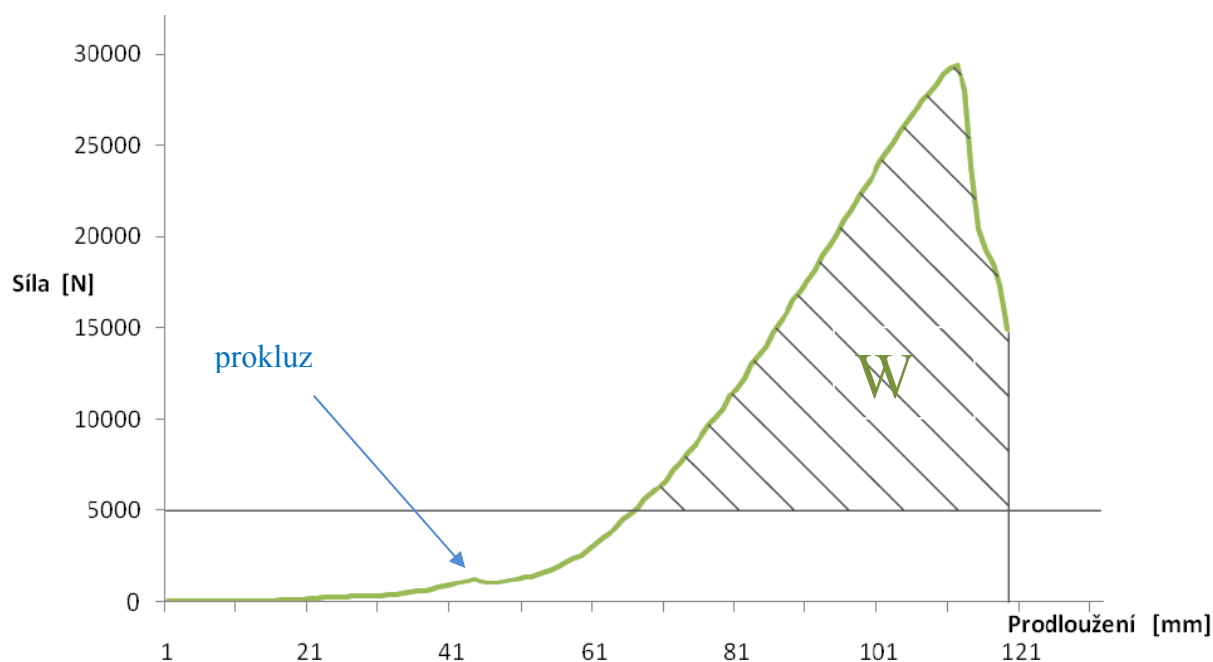
Při zkoušce tahem (stříhem) působí síla F a měrná délka L_0 zkušebního tělesa se prodlužuje o $\Delta L = x$. Množství práce vynaložené na prodloužení tělesa z hodnoty $x = 0$ na hodnotu x' je dáno vztahem:

$$W = \int_0^{x'} F dx \quad (1.)$$

Aby bylo docíleno sjednocení výsledků měření všech vzorků s ohledem na prokluz čelistí trhačího stroje a vzorku, rozhodl se experimentální tým volit hranici nulové energie při velikosti zatěžování 5 000 N. Pak tedy velikost mechanické práce nevyjadřuje celkovou energii, jenž je materiál schopen pohltit, ale měrnou hodnotu práce. Tato hodnota pak může vyjadřovat celkovou schopnost materiálu se započítáním jistého bezpečnostního součinitele. S ohledem na korekci dalšího textu je tato charakteristika jakosti dále označována jako „užitečná práce“.

Pak vzorec pro výpočet „užitečné práce“:

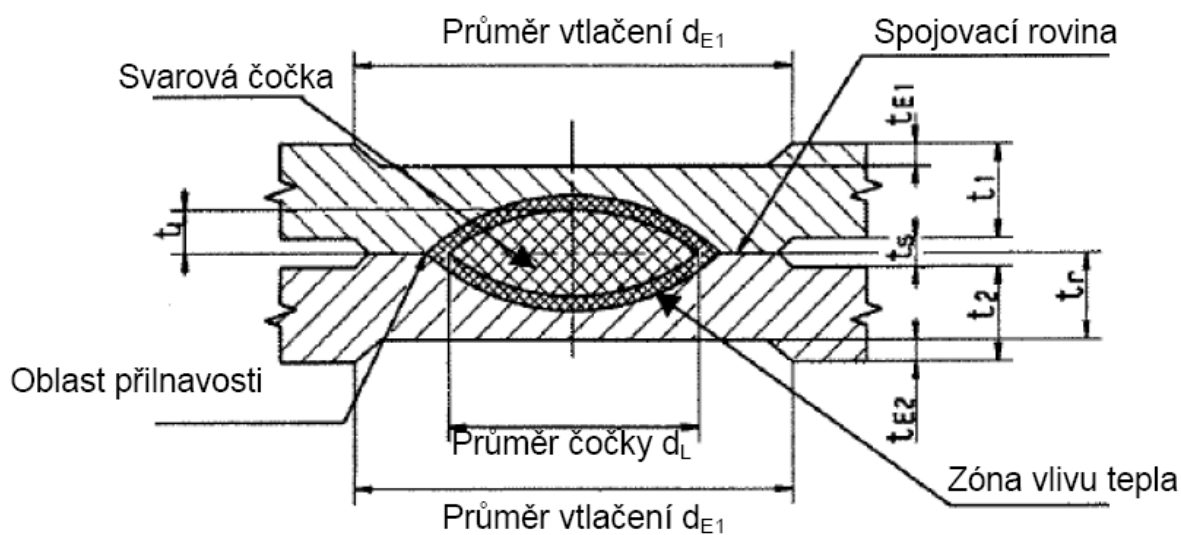
$$W = \int_{5000 N}^{x'} F dx \quad (2.)$$



Obr. 24: Graf tahové zkoušky pro výpočet měrné hodnoty mechanické práce

6.1.3 Hloubka průvaru svarové čochky

Hloubkou průvaru svarové čochky můžeme též rozumět hloubku vniknutí svářecích elektrod do základního materiálu $t_{E1,2}$ (dále jen hloubka vniknutí).



Obr. 25: Schematické znázornění bodového svaru [16,17]

Hloubka vniknutí úzce souvisí s jakostí povrchu materiálu po sváření. Pro posouzení kvality povrchu materiálu svařence je normami zavedeno hodnocení dle stupňů kvality povrchu.

Norma rozeznává čtyři druhy kvality povrchu:

- OG1 - platí pro povrchy plechů, které musí být po „povrchové úpravě kovů“ tak dalece bez značkování a nerovností, že jsou po lakování neviditelné. Povrchovou úpravou kovu však nesmí být odstraněno více než 10 % tloušťky plechu.
- OG2 - zahrnuje minimum značkování na povrchu a je používáno tam, kde je ještě akceptováno minimální vtlačení až 15 % pod normální povrch.
- OG3 - charakterizuje vtlačení na povrchu plechu až 20 % příslušné tloušťky plechu. V tomto rámci jsou povoleny také pevně přilnavé rozstříky, pokud výkres nepředepisuje povinnost bez otřepů a rozstříků.
- OG4 - charakterizují vtlačení bez speciálních kvalitativních požadavků [16].

Experimentální tým se po zvážení umístění svarů na B-sloupku a po shodě s představiteli Škoda Auto, a. s., rozhodl volit stupeň kvality povrchu OG3.

Jako charakteristika jakosti byla při vyhodnocování experimentu použita průměrná hodnota dvou měřených hloubek vniknutí, a to z obou stran svařence.

6.1.4 Faktory ovlivňující charakteristiky jakosti

Faktory ovlivňující charakteristiky jakosti jsou nezávislé proměnné.

V praxi je obvyklé provádět experimenty s počtem úrovní 2 nebo 3 a v odůvodněných případech s faktorem ve 4 úrovních. Použití většího počtu úrovní bývá spíše záležitostí marketingového výzkumu.

Na základě technologického postupu svařování a charakteristik jakosti se experimentální tým rozhodl volit 4 základní faktory ve třech úrovních. Mezi činitele, jenž nejvíce ovlivňují jakost spoje, byly vybrány faktory v úrovních:

- (A) velikost svařovacího proudu,
 - o (1) 6 500 A
 - o (2) 8 400 A
 - o (3) 9 800 A

- (B) čas sváření (doba, při které prochází elektrodami elektrický proud),
 - o (1) 15 period,
 - o (2) 20 period,
 - o (3) 25 period,
 přičemž 1 perioda = 0,02 ms,
- (C) přítláčná síla svařovacích elektrod,
 - o (1) 2 000 N,
 - o (2) 3 000 N,
 - o (3) 4 000 N,
- (D) zamaštění základního materiálu,

vzhledem k tomu, že se při kalení lisováním používá mazacího oleje, bylo nutno zjistit vliv mastnoty na jakost svařence. Proto byly uvažovány úrovně:

 - o (1) bez mastnoty,
 - o (2) 2 g mastnoty na jeden m² plechu,
 - o (3) 4 g mastnoty na jeden m² plechu.

6.2 Navrhování experimentu

Při navrhování experimentu je nutno zvážit jak časové a finanční možnosti, tak i ostatní okolnosti, které ovlivňují složitost daného experimentu.

Jelikož v našem případě již před požadovaným experimentem proběhla sada experimentů, která využívala osmi vzorků se třemi parametry ve dvou úrovních, a to s uspokojivými výsledky, rozhodl se experimentální tým volit o poznání složitější experiment využívající ortogonální soustavy L27, kterou si upravil podle požadovaných výstupů. Dle jeho rozhodnutí pak měly být do experimentu začleněny jak interakce jednotlivých parametrů, tak i několik charakteristik jakosti. Toto vše mělo být pro zvýšení verifikovatelnosti výsledků užito tak, aby bylo dosaženo robustnosti celkového systému. Na jeho základě pak měl být sestaven výpočetní program, jenž by určoval optimální nastavení svařovacích parametrů při požadovaných vstupech.

S ohledem na výše zmíněné byl tedy navržen systém ortogonálních matic s desíti sloupci. Ve čtyřech sloupcích jsou obsaženy parametry svařování (velikost svařovacího proudu - označení A, čas sváření - označení B, přítláčná síla svařovacích elektrod - označení C, a zamaštění základního materiálu - označení D).

Systém určování počtu interakcí byl již vysvětlen dříve. V našem případě (ve shodě s tímto pravidlem) byl celkový počet existujících interakcí roven $4 \cdot 3/2 = 6$ interakcí. Po pečlivém

uvážení experimentálního týmu byly při brainstormingu vybrány tři nejvýznamnější interakce a to: $A \times B$, $A \times C$ a $B \times C$.

Pro názornost si ukažme uplatňovaný postup při začleňování jednotlivých interakcí do ortogonální matice L27. Postup si vysvětleme na interakci $A \times B$.

sloupec:	1	2	3	4	5	6	7
	(1)	(2)	2	5	4	7	6
		(2)	1	6	7	4	5
			(3)	7	6	5	4
				(4)	1	2	3
					(5)	3	2
						(6)	1
							... atd.
							... atd.

Obr. 26: Postup při zařazování interakce $A \times B$

Při určování sloupce pro interakci $A \times B$ vycházíme horizontálně z prvního řádku (A) a vertikálně ze druhého (B) sloupce. Interakce bude tedy ve třetím sloupci.

Interakci $A \times C$, tj. první (A) a čtvrtý sloupec (C) – třetí je zaplněn interakcí $A \times B$, budeme doplňovat do pátého sloupce.

Interakci $B \times C$, tj. druhý (B) a čtvrtý sloupec (C), budeme doplňovat do šestého sloupce.

Poslední tři sloupce v ortogonálním systému L27 jsou vyhrazeny pro charakteristiky jakosti zmíněné dříve.

Vysvětlení nastavení úrovní parametrů při jednotlivých pokusech již bylo vysvětleno v kapitole 5.3. Pak tedy můžeme danou matici rozšířit o ony výsledné charakteristiky jakosti, čímž doplníme soustavu do konečného tvaru, viz tab. 3:

	A (I)	B (t)	AxB	C (F)	AxC	BxC	D (mastnota)	Y1	Y2	Y3
1	6500	15	1	2000	1	1	ne	Y 1.1	Y 2.1	Y 3.1
2	6500	15	1	2000	2	2	2g/m ²	Y 1.2	Y 2.2	Y 3.2
3	6500	15	1	2000	3	3	4g/m ²	Y 1.3	Y 2.3	Y 3.3
4	6500	20	2	3000	1	1	ne	Y 1.4	Y 2.4	Y 3.4
5	6500	20	2	3000	2	2	2g/m ²	Y 1.5	Y 2.5	Y 3.5
6	6500	20	2	3000	3	3	4g/m ²	Y 1.6	Y 2.6	Y 3.6
7	6500	25	3	4000	1	1	ne	Y 1.7	Y 2.7	Y 3.7
8	6500	25	3	4000	2	2	2g/m ²	Y 1.8	Y 2.8	Y 3.8
9	6500	25	3	4000	3	3	4g/m ²	Y 1.9	Y 2.9	Y 3.9
10	8400	15	2	4000	1	2	4g/m ²	Y 1.10	Y 2.10	Y 3.10
11	8400	15	2	4000	2	3	ne	Y 1.11	Y 2.11	Y 3.11
12	8400	15	2	4000	3	1	2g/m ²	Y 1.12	Y 2.12	Y 3.12
13	8400	20	3	2000	1	2	4g/m ²	Y 1.13	Y 2.13	Y 3.13
14	8400	20	3	2000	2	3	ne	Y 1.14	Y 2.14	Y 3.14
15	8400	20	3	2000	3	1	2g/m ²	Y 1.15	Y 2.15	Y 3.15
16	8400	25	1	3000	1	2	4g/m ²	Y 1.16	Y 2.16	Y 3.16
17	8400	25	1	3000	2	3	ne	Y 1.17	Y 2.17	Y 3.17
18	8400	25	1	3000	3	1	2g/m ²	Y 1.18	Y 2.18	Y 3.18
19	9800	15	3	3000	1	3	2g/m ²	Y 1.19	Y 2.19	Y 3.19
20	9800	15	3	3000	2	1	4g/m ²	Y 1.20	Y 2.20	Y 3.20
21	9800	15	3	3000	3	2	ne	Y 1.21	Y 2.21	Y 3.21
22	9800	20	1	4000	1	3	2g/m ²	Y 1.22	Y 2.22	Y 3.22
23	9800	20	1	4000	2	1	4g/m ²	Y 1.23	Y 2.23	Y 3.23
24	9800	20	1	4000	3	2	4g/m ²	Y 1.24	Y 2.24	Y 3.24
25	9800	25	2	2000	1	3	2g/m ²	Y 1.25	Y 2.25	Y 3.25
26	9800	25	2	2000	2	1	4g/m ²	Y 1.26	Y 2.26	Y 3.26
27	9800	25	2	2000	3	2	ne	Y 1.27	Y 2.27	Y 3.27

Tab. 3: Kompletní ortogonální systém L27

Pro dosažení maximální robustnosti celého experimentu a tedy i výsledku byly použity postupy v souladu s pravidly zmiňovanými v kapitole 5. 7.

Jelikož na experimentální tým nebyly kladené požadavky na identifikaci jednotlivých šumových faktorů, rozhodl se proto, s přihlédnutím na finanční a časové možnosti, při brainstormingu užít metody prostého opakování celého experimentu pro každý z materiálů. Z důvodů náročnosti provedení byly provedeny dvě opakování experimentu u každého ze zkoumaných materiálů.

V souhrnu toto znamenalo získání $27 \cdot 2 \cdot 2 = 108$ vzorků z každého z materiálů.

7. Provedení experimentu

7.1 Metody zkoumání, příprava vzorků

Strukturou kovů, slitin i nekovových materiálů rozumíme souhrn fází, charakterizovaný jejich druhem, množstvím, tvarem, způsobem vyloučení a vzájemného uspořádání. Struktura materiálů se projevuje na vhodně upraveném rovinném řezu nebo lomové ploše. Zatímco makrostrukturu lze pozorovat volným okem nebo lupou, podrobnosti mikrostruktury jsou hodnotitelné pouze při minimálním 50-ti násobném zvětšení. Mnoho důležitých vlastností materiálů je však určených vnitřní stavbou (vlastnosti strukturně citlivé). Tyto vlastnosti vyšetřujeme sledováním krystalové struktury.

Makroskopické vyšetřování umožňuje tedy pouze posouzení poměrně hrubých detailů struktury, jako jsou např. charakter lomové plochy, hrubost krystalizace, hrubší materiálové vady apod.

Při použití leptadla na makrovýbrusu lze dosáhnout viditelnosti jemnějších podrobností makrostruktury, jako například chemickou nestejnorodost (odmíšení některých prvků, dendritickou nestejnorodost), strukturu svarových spojů, popř. velikost tepelně ovlivněné oblasti apod.

Ovšem k detailnímu posouzení struktury materiálu je makroskopické sledování nedostačující. Je nutno provést také sledování mikrostruktury. Ke zjišťování krystalové struktury se při tomto procesu sledování používá difrakce vhodného zařízení na mřížce zkoušeného kovu (světelná mikroskopie). Světelná metalografická mikroskopie je jednou z nejstarších, ale stále nejpožívanějších metod studia struktury kovů a jejich povrchu. Omezení možností jen na povrch kovu je způsobeno jejich optickými vlastnostmi, umožňujícími studium v odraženém světle.

Mikroskopické pozorování tedy umožňuje vyhodnocovat způsob vyloučení i morfologii jednotlivých fází přítomných ve struktuře materiálu, a tím dovoluje hodnotit jakost výroby i složité procesy zpracování, stejně tak jako umožňuje posoudit vhodnost vybraného materiálu pro daný účel.

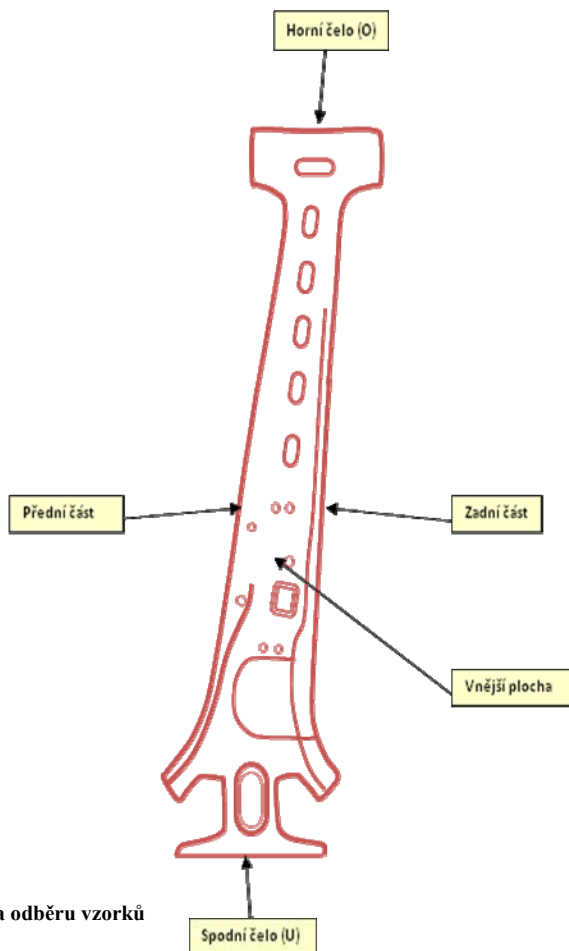
Ovšem základní podmínkou k využití mikroskopického pozorování je zajištění reprodukovatelnosti přípravy vzorků a rozpoznání jednotlivých fází. O jednotlivých fázích již bylo pojednáno v kapitole 1, věnujme se tedy způsobům přípravy vzorků.

7.1.1 Příprava metalurgických vzorků

Jak již bylo výše zmíněno, správné a opakovatelné hodnocení mikrostruktury materiálu vyžaduje použití reprezentativního vzorku.

Příprava metalurgického vzorku je podmíněna požadavky, jenž mají zajistit, aby se struktura vzorků během preparace nezměnila a nebyla tak v důsledku jednotlivých operací ovlivněna. Významnou fází je správné určení místa, z něhož bude připraven výbrus a jeho následný odběr.

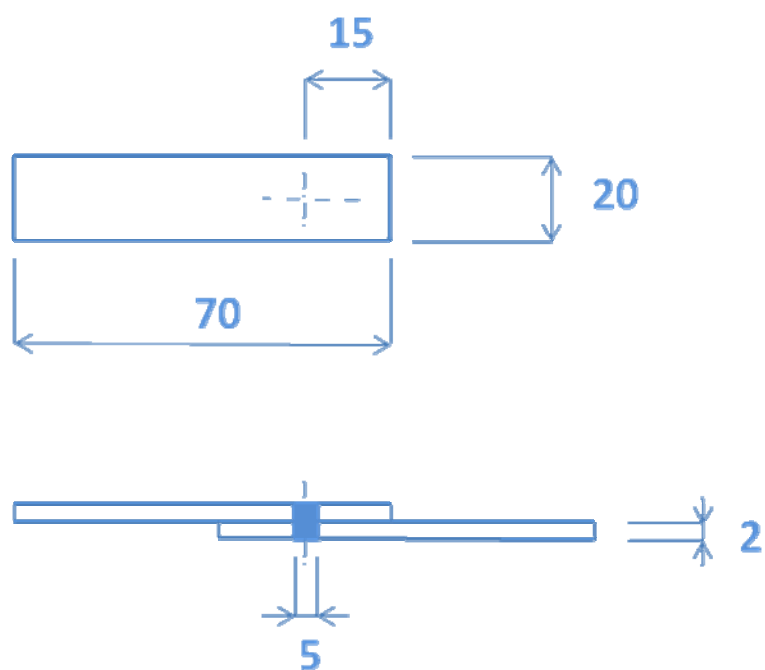
Místa odběru vzorků byla volena tak, aby stykové plochy pro následující proces svařování byly co nejrovinnější a tím se zabránilo následnému rozstříku roztaveného materiálu. S ohledem na maximální využití materiálu byly využity všechny možné rovinné plochy B-sloupku, tj. horní čelo (O), spodní čelo (U), přední a zadní část B-sloupku a vnější rovinné plochy.



Obr. 27: Místa odběru vzorků

V souladu s DIN EN ISO 14 273 (Rozměry vzorků a provedení) a po následném upravení hodnot (po dohodě se zástupci Škoda Auto, a. s.) byly voleny rozměry zkušebních vzorků 20 x 70 mm při předpokládaném 15-ti milimetrovém překrytí vzorků s 5-ti milimetrovým průměrem svařovacích kleští a tloušťkou plechu 2 mm pro BTR a 1,8 mm u USI, viz obr. 28. Tyto rozměry měly zaručovat dostatečný prostor pro jevy spojené s ohřevem a následným ochlazením materiálu při procesu sváření a následné dostatečné upnutí zkoušeného vzorku ve statické trhačce.

Způsob odběru vzorků závisí na druhu materiálu a rovnovážnosti jeho stavu. Obecně však lze říci, že při odběru vzorků (odříznutí, osoustružení, rozbroušení apod.) nesmí dojít k zahřátí materiálu na teplotu případných fázových přeměn a nesmí být plasticky zdeformován. V našem případě byly z B-sloupků pomocí elektrické ruční brusky vyříznuty pruhy o šíři 5-ti cm. Tyto pruhy pak byly upraveny pomocí přesné pily pro experimentální účely MIKRON 110 do požadovaných rozměrů.



Obr. 28: Rozměry zkušebního vzorku pro BTR



Obr. 29: Přesná pila pro experimentální účely MIKRON 110

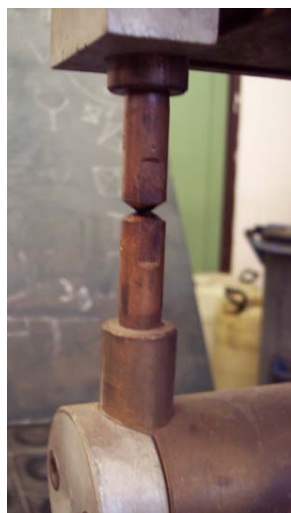
7.2 Svaření vzorků

Svařování vzorků probíhalo ve společnosti Dům techniky Pardubice, spol. s r.o., za odborné asistence Ing. Josefa Brendla.

V této společnosti využívají k bodovému svařování pneumatické bodové svářečky BP 20.12 (výkon 20 kVA, výrobce BEZ Bratislava)



Obr. 30: Pneumatická bodová svářečka
BP 20.12



Obr. 31: Detail svařovacích elektrod

Svářečka BP 20.12 umožňuje pneumatický přítlak svařovacích elektrod, nastavování svařovacího proudu a času, po který bude působit svařovací proud. Proto byla vybrána jako vhodné zařízení pro daný experiment.

Před samotným svařováním byla provedena vizuální kontrola celého zařízení a byl doplněn vzduch v zásobnících pro přítlak svařovacích elektrod.

Kontrola svařovacích elektrod spočívala ve vizuálním zjištění jejich stavu, popřípadě očištění dosedacích ploch ocelovým kartáčem či jemné srovnání dosedacích ploch pilníkem.

Předem připravené vzorky v požadovaných rozměrech byly vzájemně přesazeny o 15 mm a vloženy do prostoru mezi svařovacími elektrodami. Tam byla provedena kontrola umístění vzorků ortogonálně vůči svislé ose svařovacích elektrod.

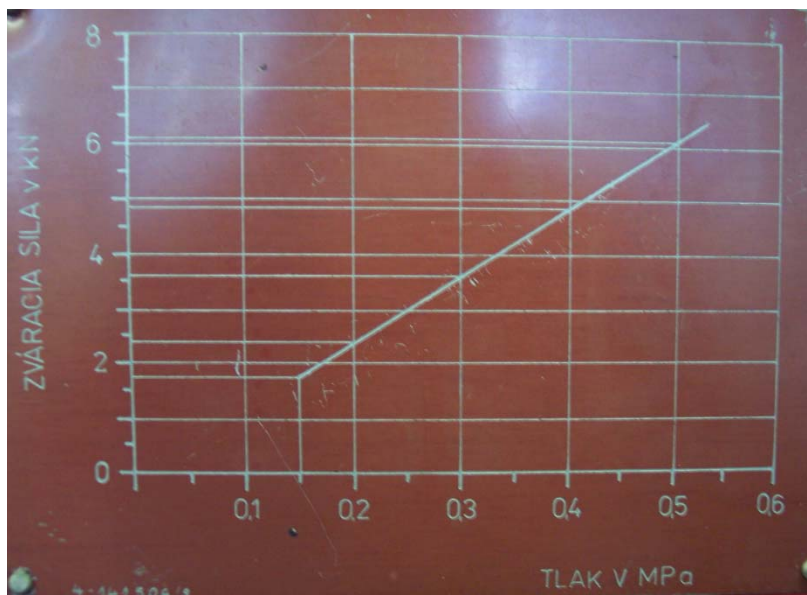
Po správném umístění svařovaných plechů byla uvedena do činnosti svářečka nožním pedálem.

Při výměně vzorků bylo dbáno na to, aby pořadí jednotlivých pokusů bylo náhodné a tím bylo dosaženo snížení vlivu šumových faktorů.

Pomocí laboratorní váhy KPZ 2-05-4/06000 bylo odměřeno požadované množství maziva určeného ke snížení tření při tváření plechů. To bylo následně nanášeno na vzorky, u nichž

bylo požadováno zamaštění. Vzorky, u kterých byla požadována nulová mastnota, byly odmaštěny technickým benzínem určeným pro čištění kovových předmětů.

Nastavování svařovacích parametrů na svařovacím zařízení bylo prováděno pomocí otočných regulátorů (u svařovacího proudu a času) a pomocí manometru (pro nastavování přtlaku svařovacích elektrod). Pro docílení požadovaného přtlaku byl využit přepočtový graf, viz obr. 32, svařovací síla (kN) - tlak na manometru (MPa).



Obr. 32: Přepočtový graf

8. Analýza experimentu

Po provedení všech požadovaných experimentů byly získány tři určené charakteristiky jakosti pro každý z pokusů a materiálů (pevnost ve střihu, užitečná energie, hloubka vniknutí). Získané hodnoty jsou uspořádány do tabulek 4, 5, 6, 7.

pokus	Pevnost ve střihu (N)	hloubka vniknutí (mm)	práce (MJ)
1	10 170	0,16	58
2	12 660	0,3	100
3	10 946	0,22	72
4	16 817	0,34	171
5	14 093	0,36	119
6	14 770	0,34	129
7	19 207	0,42	262
8	19 529	0,51	247
9	16 175	0,4	165
10	19 171	0,44	235
11	14 961	0,36	136
12	15 744	0,35	160
13	25 262	0,68	407
14	26 290	0,95	490
15	24 623	0,53	441
16	26 308	0,86	387
17	26 802	0,75	521
18	21 733	0,71	263
19	24 907	0,91	401
20	22 329	1,13	347
21	21 888	0,96	300
22	23 440	1,2	406
23	25 891	1,15	391
24	26 897	1,46	468
25	29 175	1,06	528
26	27 400	1,37	521
27	24 643	1,15	301
USI 1			

Tab. 4: Charakteristiky jakosti USI první sada

pokus	pevnost ve střihu (N)	hloubka vniknutí (mm)	práce (MJ)
1	7 521	0,14	19
2	12 282	0,16	92
3	11 885	0,16	81
4	12 841	0,31	108
5	14 290	0,3	152
6	14 182	0,26	128
7	18 260	0,38	222
8	19 570	0,37	268
9	16 483	0,38	199
10	20 946	0,43	310
11	13 544	0,27	119
12	14 038	0,28	138
13	21 225	0,34	410
14	24 972	0,56	407
15	25 909	0,57	374
16	24 250	0,54	421
17	24 442	0,5	372
18	21 636	0,57	307
19	25 367	0,54	498
20	20 152	1,03	283
21	22 871	0,93	319
22	23 437	1,05	373
23	25 185	1,09	422
24	21 166	1,09	257
25	22 423	1,15	370
26	25 618	1,05	114
27	26 893	1,12	156
USI 2			

Tab. 5: Charakteristiky jakosti USI druhá sada

pokus	pevnost ve střihu (N)	hloubka vniknutí (mm)	práce (MJ)
1	15 537	0,21	164
2	15 815	0,25	171
3	12 445	0,24	100
4	19 660	0,38	235
5	15 829	0,34	153
6	17 781	0,3	193
7	15 146	0,43	156
8	17 802	0,41	188
9	14 990	0,46	136
10	8 767	0,37	31
11	17 324	0,47	188
12	9 133	0,32	37
13	21 846	0,34	279
14	28 268	0,62	507
15	20 089	1,04	216
16	28 975	0,86	508
17	30 142	0,82	610
18	32 254	0,78	697
19	22 244	1,14	375
20	22 775	0,95	397
21	21 180	0,97	293
22	27 461	1,55	515
23	23 855	1,07	338
24	22 189	1,25	316
25	30 631	1,04	586
26	26 472	1,03	435
27	32 794	1,14	746
BTR 1			

Tab. 6: Charakteristiky jakosti BTR první sada

pokus	pevnost ve střihu (N)	hloubka vniknutí (mm)	práce (MJ)
1	13 094	0,12	90
2	14 639	0,09	125
3	13 759	0,09	104
4	13 505	0,14	103
5	17 440	0,18	173
6	14 472	0,18	128
7	17 053	0,31	167
8	16 638	0,36	141
9	18 169	0,42	231
10	12 157	0,18	80
11	17 321	0,26	163
12	10 933	0,2	71
13	21 989	0,38	311
14	24 399	0,43	435
15	19 869	0,8	267
16	25 900	0,59	475
17	30 861	0,81	616
18	28 311	0,74	500
19	24 224	0,8	475
20	28 440	0,7	467
21	19 386	0,91	201
22	25 075	0,77	450
23	24 874	1,09	376
24	26 529	0,75	580
25	31 382	1,08	578
26	31 661	0,99	717
27	29 987	1,06	582
BTR 2			

Tab. 7: Charakteristiky jakosti BTR druhá sada

Hodnoty byly zpracovány dle požadavků a rozhodnutí experimentálního týmu v několika skupinách, a to:

- hodnocení výsledků pro dosažení maximální „užitečné práce“
- hodnocení výsledků pro dosažení maximální pevnosti ve střihu
- hodnocení výsledků pro dosažení optimální hloubky vniknutí
- hodnocení výsledků pouze první sady experimentů a to u každého z materiálů zvlášť

- hodnocení výsledků pouze druhé sady experimentů a to u každého z materiálů zvlášť
- hodnocení obou sad experimentů a to u každého z materiálů.

U každého z jednotlivých hodnocení se postup více či méně lišil a užívaly se jiné prostředky k získání výsledků, proto je nutno si jednotlivé kroky objasnit zvlášť.

8.1 Vyhodnocení dle maximální užitečné energie.

Charakteristiku jakosti „užitečná práce“ můžeme označit za typ B (bigger is better), protože požadujeme od svarového spoje dosažení maximálních hodnot.

Při vyhodnocování dle tohoto požadavku využíváme data ve sloupečku charakteristik jakosti „užitečné práce“. Je nutno transformovat dvě charakteristiky jakosti (zjištěné hodnoty z obou sad experimentů) do jediné hodnoty. Při této transformaci bylo využito postupu pro MSD (Mean Squared Deviation) a S/N (signal/noise-signál/šum). MSD představuje střední kvadratickou odchylku, je proto logické, že nejžádanější hodnotou pro MSD bude hodnota co nejnižší.

Výpočet MSD pro charakteristiku jakosti typu B:

$$MSD = (1/y_1^2 + 1/y_2^2)/2 \quad (3.)$$

Pak jednoduchou transformací získáme obecnou definici poměru signál/šum (S/N), který je měřítkem robustnosti:

$$S/N = -10 \log (MSD) \quad (4.)$$

Poměr S/N je nezávislý na specifikacích, umožňuje pohodlně pracovat se širokou škálou výsledků, podporuje linearitu, a proto je ideálním prostředkem pro měření variability, resp. robustnosti.

Bez ohledu na typ charakteristiky jakosti, je vždy žádanější co nejvyšší hodnota S/N.

Po získání výsledků MSD, resp. S/N přistupujeme k vlastní analýze, jejímž cílem je získání hlavních účinků.

$$\text{Dle vzorců: } A_{1,\text{prům.}} = (y_1 + y_2 + \dots + y_9)/9 \quad (5.)$$

$$A_{2,\text{prům.}} = (y_{10} + y_{11} + \dots + y_{18})/9 \quad (6.)$$

$$A_{3,\text{prům.}} = (y_{19} + y_{20} + \dots + y_{27})/9, \text{ pro parametr A,} \quad (7.)$$

$$B_{1,\text{prům.}} = (y_1 + y_2 + y_3 + y_{10} + y_{11} + y_{12} + y_{19} + y_{20} + y_{21})/9 \quad (8.)$$

$$B_{2,\text{prům.}} = (y_4 + y_5 + y_6 + y_{13} + y_{14} + y_{15} + y_{22} + y_{23} + y_{24})/9 \quad (9.)$$

$$B_{3,\text{prům.}} = (y_7 + y_8 + y_9 + y_{16} + y_{17} + y_{18} + y_{25} + y_{26} + y_{27})/9, \text{ pro parametr B,} \quad (10.)$$

$$C_{1,\text{prům.}} = (y_1 + y_2 + y_3 + y_{13} + y_{14} + y_{15} + y_{25} + y_{26} + y_{27})/9 \quad (11.)$$

$$C_{2,\text{prům.}} = (y_4 + y_5 + y_6 + y_{16} + y_{17} + y_{18} + y_{19} + y_{20} + y_{21})/9 \quad (12.)$$

$$C_{3,\text{prům.}} = (y_7 + y_8 + y_9 + y_{10} + y_{11} + y_{12} + y_{22} + y_{23} + y_{24})/9, \text{ pro parametr C,} \quad (13.)$$

$$D_{1,\text{prům.}}=(y_1+y_4+y_7+y_{11}+y_{14}+y_{17}+y_{21}+y_{24}+y_{27})/9 \quad (14.)$$

$$D_{2,\text{prům.}}=(y_2+y_5+y_8+y_{12}+y_{15}+y_{18}+y_{19}+y_{22}+y_{25})/9 \quad (15.)$$

$$D_{3,\text{prům.}}=(y_3+y_6+y_9+y_{10}+y_{13}+y_{16}+y_{20}+y_{23}+y_{26})/9, \text{ pro parametr D,} \quad (16.)$$

vypočítáme průměrné účinky jednotlivých faktorů. Podobně bychom spočítali průměrné účinky všech uvažovaných interakcí ($A \times B_{1,\text{prům.}}$, $A \times B_{2,\text{prům.}}$, $A \times B_{3,\text{prům.}}$, $A \times C_{1,\text{prům.}}$, $A \times C_{2,\text{prům.}}$, $A \times C_{3,\text{prům.}}$, $B \times C_{1,\text{prům.}}$, $B \times C_{2,\text{prům.}}$, $B \times C_{3,\text{prům.}}$). Pro výpočet průměrného účinku vždy sečteme výsledné charakteristiky jakosti v řádcích, ve kterých je námi počítaná úroveň faktoru či interakce.

Data uspořádáme do tabulky. Protože jde o charakteristiku jakosti čím větší, tím lepší (typ B), hledáme v tabulce vždy nejvyšší hodnotu průměrného účinku pro dané úrovně faktorů. Optimální úroveň faktoru bude tedy ta, která dává vyšší průměrný účinek. Optimum bez interakcí je proto:

A_3, B_3, C_2, D_1 pro BTR

A_3, B_2, C_2, D_2 pro USI.

Označení úrovní faktorů viz kapitola 6.1.4.

Při výpočtu procentuálního podílu faktorů (ANOVA) je vhodné dodržovat logickou souslednost jednotlivých kroků, tak jak je naznačeno dále.

Krok 1: Celkový součet všech výsledků T

$$T = y_1 + y_2 + y_3 \dots + y_{27} \quad (17.)$$

Krok 2: korekční faktor C.F.

$$C.F. = T^2/27 \quad (18.)$$

Krok 3: Celkový součet čtverců S_T

$$S_T = \sum y_i^2 - C.F. \quad (19.)$$

Krok 4: Součet čtverců pro faktory a interakce S_A

$$S_A = A_1^2/9 + A_2^2/9 + A_3^2/9 - C.F., \quad (20.)$$

kde A_1, A_2, A_3 označují sumu charakteristik jakosti, které jsou ovlivňovány parametrem A v první, druhé, či třetí úrovni nastavení,

pak podobně pro ostatní faktory $S_B, S_C, S_D, S_{(A \times B)}, S_{(A \times C)}, S_{(B \times C)}$.

$$\text{Pro chybu } S_E = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D + S_{(A \times B)} + S_{(A \times C)} + S_{(B \times C)}) \quad (21.)$$

Krok 5: Celkový počet stupňů volnosti f_T

$$f_T = n - 1, \text{ kde „n“ vyjadřuje celkový počet experimentů} \quad (22.)$$

$$\text{pak } f_T = 27 - 1 = 26$$

Krok 6: Stupně volnosti pro faktory a interakce f_i

$$f_A = (\text{počet úrovní faktoru} - 1) = 3 - 1 = 2 \quad (23.)$$

$$f_B = 2$$

$$f_C = 2$$

$$f_D = 2$$

$$\text{pro interakce: } f_{(A \times B)} = f_A \cdot f_B = 2 \cdot 2 = 4 \quad (24.)$$

$$f_{(A \times C)} = f_A \cdot f_C = 4$$

$$f_{(B \times C)} = f_B \cdot f_C = 4$$

$$\begin{aligned} \text{pro chybu } f_E &= f_T - (f_A + f_B + f_C + f_D + f_{(A \times B)} + f_{(A \times C)} + f_{(B \times C)}) = \\ &= 26 - (2 + 2 + 2 + 2 + 4 + 4 + 4) = 6 \end{aligned} \quad (25.)$$

Krok 7: Průměrný čtverec (rozptyl)

$$V_A = S_A / f_A \quad (26.)$$

$$V_B = S_B / f_B$$

$$V_C = S_C / f_C$$

$$V_D = S_D / f_D$$

$$V_{(A \times B)} = S_{(A \times B)} / f_{(A \times B)} \quad (27.)$$

$$V_{(A \times C)} = S_{(A \times C)} / f_{(A \times C)}$$

$$V_{(B \times C)} = S_{(B \times C)} / f_{(B \times C)}$$

Rozptyl způsobený chybou: $V_E = S_E / f_E$

Krok 8: Procentuální podíl jednotlivých faktorů a interakcí

$$P_A = (S_A / S_T) \cdot 100 \quad (28.)$$

$$P_B = (S_B / S_T) \cdot 100$$

$$P_C = (S_C / S_T) \cdot 100$$

$$P_D = (S_D / S_T) \cdot 100$$

$$P_{(A \times B)} = (S_{(A \times B)} / S_T) \cdot 100 \quad (29.)$$

$$P_{(A \times C)} = (S_{(A \times C)} / S_T) \cdot 100$$

$$P_{(B \times C)} = (S_{(B \times C)} / S_T) \cdot 100$$

$$P_E = (S_E / S_T) \cdot 100$$

Výsledné hodnoty analýzy rozptylu si uspořádáme do tabulky ANOVA. Pro náš případ:

Faktory	f	S	V	P
A	2	430,84	215,42	37,41
B	2	334,52	167,26	29,05
AxB	4	90,44	22,61	7,85
C	2	149,20	74,60	12,96
AxC	4	35,08	8,77	3,05
BxC	4	33,93	8,48	2,95
D	2	13,47	6,74	1,17
chyba	6	64,11	10,68	5,57
celkem	26	1152	515	100

Tab. 8: ANOVA pro vyhodnocení dle maximální užitečné energie materiálu BTR

Z tabulky plyne, že na jakost svarového spoje z pohledu „užitečné energie“ má největší vliv nastavení faktoru svařovací proud 37,41 %, čas působení svařovacího proudu 29,05 % a přítlak svařovacích elektrod 12,96 %. Parametr mastnoty můžeme zanedbat, protože jeho hodnota (1,17 %) je menší než hodnota interakcí či velikost chyby.

Procentuální podíl chyby (5,57 %) lze vzhledem k rozsáhlosti experimentu považovat za uspokojivý. Velikost chyby bude posléze eliminována přiřazením váhy jednotlivých mezivýsledků při určování optimálních svařovacích parametrů ze všech dílčích hodnot.

Po stanovení optima potřebujeme vědět, jakou hodnotu bude mít charakteristika jakosti při tomto optimálním nastavení faktorů. Protože provádíme jen zlomek z celkového možného počtu experimentů, je obecně velmi malá pravděpodobnost, že naše optimální kombinace bude zahrnuta mezi provedenými experimenty.

Při výpočtu očekávané hodnoty výsledné charakteristiky jakosti je nutno uvažovat i vliv interakcí.

Připomeňme si ještě jednou vypočtené optimální nastavení, protože jej budeme využívat při výpočtu: A3, B3, C2, D1 pro BTR

A3, B2, C2, D2 pro USI.

Z interakcí měly nejvyšší vliv pro BTR: (A x B)1, (A x C)2, (B x C)3

pro USI: (A x B)3, (A x C)1, (B x C)3

Pak očekávatelná hodnota:

Pro BTR

$$Y_{\text{opt.}} = T_{\text{prům.}} + (A3 - T_{\text{prům.}}) + (B3 - T_{\text{prům.}}) + (C2 - T_{\text{prům.}}) + (D1 - T_{\text{prům.}}) + [(A \times B)1 - T_{\text{prům.}}] + [(A \times C)2 - T_{\text{prům.}}] + [(B \times C)3 - T_{\text{prům.}}] = 64,47 \text{ dB} \quad (30.)$$

Pro USI

$$\begin{aligned} Y_{\text{opt.}} &= T_{\text{prům}} + (A3 - T_{\text{prům}}) + (B2 - T_{\text{prům}}) + (C2 - T_{\text{prům}}) + (D2 - T_{\text{prům}}) + \\ &+ [(A \times B)3 - T_{\text{prům}}] + [(A \times C)1 - T_{\text{prům}}] + [(B \times C)3 - T_{\text{prům}}] = \\ &= 58,53 \text{ dB} \end{aligned} \quad (31.)$$

Hodnotu $Y_{\text{opt.}}$ v decibelech je pak nutno zpětně převést na jednotku MSD a pak na jednotku práce, pomocí vztahů (3.) a (4.).

Po provedení tohoto převodu obdržíme hodnotu „užitečné práce“, kterou můžeme očekávat od svarového spoje při dodržení námi vypočtených svařovacích parametrů.

8.2 Vyhodnocení dle pevnosti ve střihu.

Při vyhodnocování experimentu dle pevnosti využíváme sloupeček výsledků, v němž jsou uvedeny charakteristiky jakosti v podobě pevnosti svarového spoje ve střihu.

Protože charakteristiku jakosti - pevnost - můžeme považovat za stejný typ jako „užitečná práce“, tedy typ B, je možno i v tomto případě postupovat shodně jako při výpočtu dle „užitečné práce“. Proto není potřeba celý postup odvozovat znovu. Ukážeme si jen výsledné nastavení svařovacích parametrů a očekávatelné hodnoty:

Materiál:	BTR	Svařovací parametry: A3, B3, C2, D1
		Očekávatelný výsledek: 24 kN
	USI	Svařovací parametry: A3, B3, C2, D3
		Očekávatelný výsledek: 28 kN

Označení úrovní faktorů viz kapitola 6.1.4.

8.3 Hodnocení výsledků pro dosažení optimální hloubky vniknutí

Protože požadujeme od svarového spoje dosažení optimální hodnoty hloubky vnoření svařovacích elektrod, lze označit charakteristiku jakosti - hloubka vniknutí - jako typ N (nominal is best).

Při vyhodnocování dle tohoto požadavku využíváme data ve sloupečku charakteristik jakosti - průvar.

Protože se od předchozích postupů liší typ charakteristiky jakosti, je nutno pozměnit i postup výpočtu, proto tedy některé užité vzorce budou pozměněny, ale logický princip postupu zůstává zachován.

Opět je nutno transformovat dvě hodnoty (pro každý z materiálů) na jedinou a to pomocí MSD a S/N. Ovšem v tomto případě se vztah pro výpočet MSD změní na:

$$\text{MSD} = [(y_1 - m)^2 + (y_2 - m)^2] / 2 \quad (32.)$$

Kde y_1 , y_2 jsou naměřené hodnoty hloubky vniknutí a „m“ je cílová, námi požadovaná hodnota, jenž byla určena na 20 %, viz dříve.

Pak S/N stejně jako v předchozím:

$$S/N = - 10 \log (MSD) \quad (33.)$$

Požadavky na velikosti hodnot MSD a S/N zůstávají podobné. Díky tomuto průběžnému porovnávání velikostí MSD (co nejnižší) a S/N (co nejvyšší) lze provádět kontrolu i v průběhu výpočtů.

Po převodu opět následuje fáze, v níž je třeba určit optimální nastavení parametrů. Tato část, stejně tak jako část ANOVA, je obdobná jako v případech dle „užitečné práce“ a maximální pevnosti ve střihu.

Při výpočtu očekávané hodnoty hloubky vniknutí je však nutno uvažovat onen pozměněný vzorec pro MSD. Protože očekáváme výsledek ve formě jediného čísla a nikoliv dvou, jak je uvedeno v upraveném vzorci pro MSD, je nutno nahradit hodnoty y_1 a y_2 hodnotou jedinou např. $y_{stř.}$. Jak je vidno ze vzorce, vyskytuje se v něm druhá mocnina, což může způsobovat při vyhodnocování jisté komplikace. Výpočet hledaných velikostí hloubek vniknutí pak vede ke kvadratické rovnici, která, jak je známo, mívá dva kořeny (x_1 , x_2). Proto je po získání obou kořenů rovnice nutno jeden kořen vyloučit. Toto provádíme na základě fyzikálních zákonů, či po jiném pečlivém uvážení.

Výsledné nastavení optimálních svařovacích parametrů je po provedení výše zmíněných výpočtů:

materiál:	BTR	Svařovací parametry: A2, B3, C2, D1
		Očekávatelný výsledek: 0,8 mm
	USI	Svařovací parametry: A2, B3, C2, D2
		Očekávatelný výsledek: 0,9 mm

Při požadovaném 20% průvaru obou materiálů.

Označení úrovní faktorů viz kapitola 6.1.4.

8.4 Hodnocení výsledků jednotlivých sad experimentů

Hodnocení jednotlivých experimentů probíhalo v úvodní části diametrálně jinak, než u výše zmíněných postupů, proto je třeba tomuto věnovat pozornost.

Při zpracovávání těchto výsledků bylo nutno brát zřetel na všechny tři požadavky, kterým jsme přizpůsobovali experimenty, tedy: velikost „užitečné práce“, pevnost spoje ve střihu a hloubka vniknutí. Jak je vidno, tyto tři charakteristiky jakosti jsou dvojího typu. „Užitečná práce“ a pevnost ve střihu jsou charakteristiky typu B a hloubka vniknutí je typu N. S ohledem na toto nebylo možné využít předcházející postupy, ale bylo nutno aplikovat postup OEC, jenž umožňuje provádět výpočty s charakteristikami jakosti, jenž mají různé jednotky měření, jsou jiného typu a mají různou relativní váhu (důležitost).

Abychom mohli všechny charakteristiky jakosti sloučit do jediné OEC, je nutno provést jejich standardizaci (převod na bezrozměrné číslo). Musíme tedy zajistit, aby všechny charakteristiky byly buď typu B nebo S a každé charakteristice přidělit váhu.

Standardizace se provádí pomocí vztahů:

$$OEC_{i,1} = (|Y_i - w| / |b - w|) \cdot k_1 \quad \text{pro charakteristiku typu B,} \quad (34.)$$

$$OEC_{i,2} = [1 - (|Y_i - w| / |b - w|)] \cdot k_2 \quad \text{pro charakteristiku typu N.} \quad (35.)$$

Kde: Y naměřená hodnota,

w nejhorší hodnota,

b nejlepší hodnota,

$k_{1,2}....$ koeficient důležitosti,

přičemž nejhorší hodnotou pro charakteristiku jakosti typu B je minimální, a naopak. Pro charakteristiku typu N je nejlepší hodnotou hodnota cílová, zatímco nejhorší hodnotou je horní nebo dolní specifikace.

Váhu určuje experimentální tým kolektivním hlasováním, kde každý člen týmu přidělí váhu a spočítá se aritmetický průměr.

Tímto postupem získáme tři hodnoty $OEC_{1,2,3}$, které sečteme do jediné hodnoty OEC. Tak obdržíme jedinou hodnotu ze všech tří výsledků.

Pro získání optimálního nastavení svařovacích parametrů a výpočtu ANOVA dále již postupujeme stejně jako při předchozích výpočtech. Nevýhodou OEC postupu je, že není možno získat očekávatelné hodnoty svarového spoje při aplikování optimálních parametrů.

Vypočtené hodnoty prvního a druhého experimentu jsou uvedeny v tabulkách 9, 10, 11 a 12.

Důležitost:	pevnost:	40 %
	užit. energie:	45 %
	hloubka vniknutí:	15 %
Optimální nastavení:		A3, B3, C2, D1
Vliv faktoru:	sv. proud:	35,1 %
	čas:	32,2 %
	přítlak:	17,1 %
	mastnota:	2,8 %
	chyba	6,5 %

Tab. 9: Vyhodnocení první sady experimentů - materiál BTR

Důležitost:		pevnost:	40 %
		užit. energie:	45 %
		hloubka vniknutí:	15 %
Optimální nastavení:		A3, B3, C2, D2	
Vliv faktoru:	sv. proud:	59,2 %	
	čas:	23,4 %	
	přítlak:	5,2 %	
	mastnota:	0,1 %	
	chyba:	4,3 %	

Tab. 10: Vyhodnocení druhé sady experimentů - materiál BTR.

Důležitost:		pevnost:	40 %
		užit. energie:	45 %
		hloubka vniknutí:	15 %
Optimální nastavení:		A3, B3, C2, D2	
Vliv faktoru:	sv. proud:	56,6 %	
	čas:	24,4 %	
	přítlak:	1,6 %	
	mastnota:	0,0 %	
	chyba:	6,7 %	

Tab. 11: Vyhodnocení první sady experimentů - materiál USI

Důležitost:		pevnost:	40 %
		užit. energie:	45 %
		hloubka vniknutí:	15 %
Optimální nastavení:		A3, B3, C2, D2	
Vliv faktoru:	sv. proud:	51,6 %	
	čas:	13,3 %	
	přítlak:	2,9 %	
	mastnota:	1,8 %	
	chyba:	9,4 %	

Tab. 12: Vyhodnocení druhé sady experimentů - materiál USI

8.5 Hodnocení obou sad experimentů

Vyhodnocování obou sad experimentů u obou materiálů zvlášť bylo provedeno jakou souhrnnou výše zmíněných postupů. Proto bylo nejnáročnější a můžeme tomuto výsledku přiřadit nejvyšší váhu.

Nejprve byly experimentálním týmem určeny jednotlivé váhy důležitosti pro každou z charakteristik. Poté byla provedena normalizace jednotlivých charakteristik jakosti pomocí OEC na společný typ charakteristiky jakosti B pomocí:

$$OEC_{i,j} = (|Y_i - w| / |b - w|) \cdot k_1 \quad \text{pro charakteristiku typu B,} \quad (36.)$$

$$OEC_{i,j} = [1 - (|Y_i - w| / |b - w|)] \cdot k_2 \quad \text{pro charakteristiku typu N.} \quad (37.)$$

Tímto jsme obdrželi OEC1.1 pro charakteristiku jakosti - pevnost ve stříhu, OEC2.1 pro „užitečnou energii“ a OEC3.1 pro hloubku vniknutí. Jednička za tečkou ve značení označuje, že se jednalo o první sadu experimentů. Stejný postup jsme aplikovali na druhou sadu experimentů, takže výsledkem jsme obdrželi šest hodnot pro každý řádek ortogonální matice a materiál:

OEC1.1	OEC1.2
OEC2.1	OEC2.2
OEC3.1	OEC3.2
- první sada experimentů	- druhá sada experimentů

S každou trojicí hodnot jsme provedli jejich sumaci dle: $OEC_1 = \sum OEC_{i,1}$,

$$OEC_2 = \sum OEC_{i,2}.$$

Tak jsme transformovali normalizovaných šest hodnot do hodnot dvou (OEC_1 , OEC_2) (u každého z materiálů).

Tímto krokem končila úprava vstupních dat pro další vyhodnocování. Dále se již struktura vyhodnocování dělila na dvě části a to:

- vyhodnocování pomocí ANOVA postupu,
- vyhodnocování klasickým matematickým průměrem.

ANOVA postup byl aplikován stejnou formou jako u ostatních vyhodnocování. Hodnota MSD byla získána pomocí vzorce pro charakteristiku jakosti typu B:

$$MSD = (1/OEC_1^2 + 1/OEC_2^2)/2 \quad (38.)$$

Z ní vycházel poměr S/N a tyto hodnoty pak byly použity pro další postupy.

Při průměrování byl ze dvou hodnot OEC pro každý z řádků ortogonální matice proveden aritmetický průměr, čímž jsme obdrželi hodnotu jedinou.

V obou výpočtech pak byl aplikován postup pro získání hlavních účinků stejně, jako bylo ukázáno v kapitole 8.1.

Při vyhodnocování by stačilo využít postupu ANOVA, ovšem experimentální tým zajímalo, jak rozdílné budou výsledky získané pomocí ANOVA postupu a pomocí klasického aritmetického průměru. Přestože vyhodnocení „průměrováním“ neposkytuje výsledky ve formě procentuálních vlivů jednotlivých faktorů ani jiné statistické ukazatele, byl tento postup aplikován.

Pro porovnání výsledků obou aplikovaných metod jsou hodnoty zobrazeny do tabulek 13, 14 pro každý materiál zvlášť:

Důležitost:		pevnost:	40 %
		užit. energie:	45 %
		hloubka vniknutí:	15 %
Optimální nastavení (ANOVA):		A3, B3, C1, D1	
Vliv faktoru: (dle ANOVA)	sv. proud:	52,7 %	
	čas:	14,4 %	
	přítlak:	10,2 %	
	mastnota:	0,5 %	
	chyba:	4,4 %	
Optimální nastavení (průměrem):		A3, B3, C2, D1	

Tab. 13: Vyhodnocení obou sad experimentů - materiál BTR

Důležitost:		pevnost:	40 %
		užit. energie:	45 %
		hloubka vniknutí:	15 %
Optimální nastavení (ANOVA):		A3, B3, C2, D2	
Vliv faktoru: (dle ANOVA)	sv. proud:	50,7 %	
	čas:	23,8 %	
	přítlak:	4,3 %	
	mastnota:	1,1 %	
	chyba:	5,8 %	
Optimální nastavení (průměrem):		A3, B3, C1, D2	

Tab. 14: Vyhodnocení obou sad experimentů - materiál USI

8.6 Tvorba výpočetního programu

Na základě těchto postupů byl vytvořen výpočetní program, jehož cílem mělo být usnadnění práce a času při navrhování svařovacích parametrů pomocí metody DOE materiálů USI a BTR o různých tloušťkách. Pro každý z materiálů je k dispozici samostatný program.

Program byl vytvořen v operačním systému Windows XP v aplikaci Excel 2007, je však ovladatelný i pomocí aplikace Excel 2003.

Vstupními hodnotami programu jsou data získaná z 54 experimentů u každého z materiálů. Tato data jsou v základní verzi doplněna našimi výsledky experimentů, ale uživateli programu je umožněno doplnit si data svá. Provede-li pak uživatel vlastní experiment s nastavením svařovacích parametrů dle listu „Zadání DOE“, po provedení zkoušek získá výsledky, jež může doplnit do listu „Data_vlož“.

Přepnutím na list „PROTOKOL“ se uživatel programu dostává do vyhodnocovací části programu. Tato část je vytvořena jako protokol pro tisk, v němž je nutno nejprve vyplnit údaje o zadavateli práce, zhotoviteli experimentu a protokolu a jiné informace, jež jsou nedílnou součástí každého protokolu.

Na druhé stránce protokolu je nutno zadat tloušťku materiálu, který byl předmětem měření a požadovanou hodnotu hloubky vniknutí v procentech.

Určení optimálních parametrů z hlediska pevnostního, energetického a z hlediska optimálního průvaru po zadání těchto údajů probíhá pak samovolně a uživatel již nemusí zadávat žádné další doplňující informace. Výsledkem těchto vyhodnocení je pak určení optimálních svařovacích parametrů, očekávatelný výsledek (jež obdržíme při svařování s těmito parametry), vyjádření velikosti chyby, kterou je ovlivněn výsledek a procentuální vliv jednotlivých faktorů včetně interakcí.

Před vyhodnocením samostatného prvního a druhého experimentu a vyhodnocení obou experimentů současně je nutno zadat koeficienty důležitosti pro pevnost ve stříhu, „užitečnou práci“ a pro hloubku vniknutí, s nimiž má být prováděn výpočet. Tímto je uživateli nabídnuta možnost navrhovat svařovací parametry dle jeho aktuálních požadavků na jakost svařence.

Po zadání hodnot důležitosti program pracuje samostatně s výsledkem určení optimálních svařovacích parametrů, hodnotou očekávatelného výsledku, vyjádřením chyby a vyjádřením procentuálního vlivu jednotlivých faktorů a interakcí.

Pro tisk celého protokolu je nutno použít klávesovou zkratku Ctrl + p.

8.7 Určení svařovacích parametrů pro provedení ověřovacího experimentu

Protože pro provedení ověřovacího testu potřebujeme určit jediné nastavení svařovacích parametrů, rozhodl se experimentální tým přiřadit váhy důležitosti jednotlivým výsledkům, které byly určeny na základě námi definovaných požadavků a poté vytvořit jediné optimální nastavení svařovacích parametrů pomocí porovnání. Tímto postupem bychom měli současně eliminovat chybu, kterou vykazují jednotlivá nastavení svařovacích parametrů dle různých požadavků.

Experimentální tým se rozhodl volit důležitosti jednotlivých vyhodnocení:

- | | |
|--|------|
| • vyhodnocení dle maximální užitečné energie | 10 % |
| • vyhodnocení dle pevnosti ve střihu | 10 % |
| • hodnocení výsledků pro dosažení optimální hloubky vniknutí | 10 % |
| • hodnocení výsledků první sady experimentů | 20 % |
| • hodnocení výsledků druhé sady experimentů | 20 % |
| • hodnocení obou sad experimentů dle ANOVA | 20 % |
| • hodnocení obou sad experimentů dle průměru | 10 % |

Na základě porovnání procentuálního výskytu nastavení jednotlivých parametrů byly určeny optimální svařovací parametry ve formě:

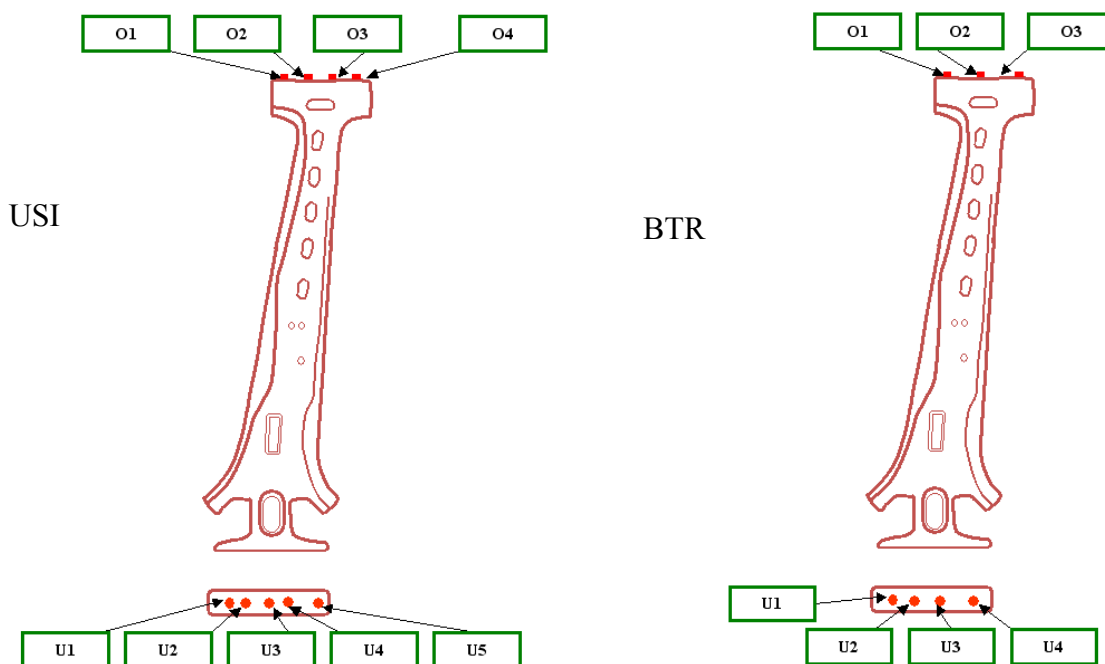
- | | | | | |
|--------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| • pro materiál BTR | A3,
90 ze 100 % | B3,
100 ze 100 % | C2,
80 ze 100 % | D1
80 ze 100 % |
| • pro materiál USI | A3,
90 ze 100 % | B3,
90 ze 100 % | C2,
100 ze 100 % | D2
90 ze 100 % |

Toto nastavení pak bude použito při ověřovacím experimentu.

9. Provedení ověřovacího experimentu

Ověřovací test je nedílnou součástí Taguchiho metody. Tímto testem chceme ověřit, zda jsou závěry a analýzy správné.

Ověřovací test byl proveden v širokém rozsahu, zahrnoval 32 svařenců. Z toho bylo 14 svařenců materiálu BTR a 18 materiálu USI. Místa odběru vzorků byla volena shodně s aplikací v praxi v horní a spodní části B-sloupku. Svařence byly vyhotoveny vždy jako spojení dvou totožných vzorků, co se místa odběru týče.



Obr. 33: Schéma odběru vzorků pro ověřovací experiment

9.1 Vyhodnocení ověřovacího experimentu

Hodnocení pro ověřovací test bylo provedeno ve dvou samostatných sadách při použití různých zařízení pro statické testy. Základní vyhodnocení bylo provedeno ve stejných parametrech, jako při vyhodnocování základního experimentu, použitých pro návrh svařovacích parametrů. Tedy: pevnost ve stříhu, „užitečná práce“ a „hloubka průvaru“.

Výsledky ověřovacího experimentu jsou uvedeny v tabulkách 15, 16, 17 a 18.

Č. vzorku	Pevnost (N)	Průvar (mm)	Práce (MJ)
O1-5	32193	1,01	396
O2-5	27390	1,47	174
O3-5	24506	1,35	169
U1-5	23398	1,36	177
U2-5	27469	1,43	203
U3-5	30777	0,85	177
U4-5	31681	1,09	489

Tab. 15: Výsledky hodnocení spojů oceli BTR

Č. vzorku	Pevnost (N)	Průvar (mm)	Práce (MJ)
O1-6	30 613	1,17	566
O2-6	31 415	1,02	566
O3-6	28 359	1,21	503
U1-6	22 181	1,62	310
U2-6	27 912	0,90	488
U3-6	26 983	0,96	456
U4-6	-	0,91	-

Tab. 16: Výsledky hodnocení spojů oceli BTR

Číslo za pomlčkou v označování rozděluje materiál BTR na jednotlivé charge.

Č. vzorku	Pevnost (N)	Průvar (mm)	Práce (MJ)
O1	29120	1,22	259
O2	22501	1,49	121
O3	28769	1,19	262
O4	28186	1,17	372
U1	28882	1,22	246
U2	29752	1,08	318
U3	20560	1,67	98
U4	29459	1,17	136
U5	25715	1,57	418

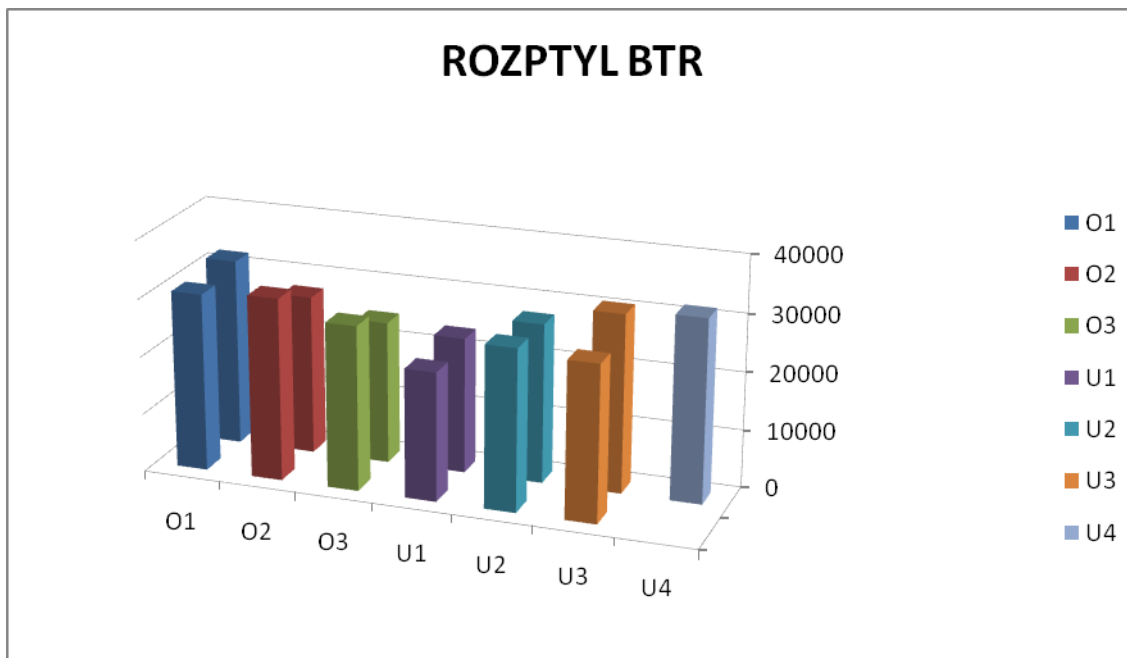
Tab. 17: Výsledky hodnocení spojů oceli USI

Č. vzorku	Pevnost (N)	Průvar (mm)	Práce (MJ)
O1	29 861	1,12	545
O2	23 209	1,77	408
O3	16 269	1,60	134
O4	28 361	1,21	510
U1	29 411	1,20	595
U2	29 461	1,32	584
U3	21 355	1,63	291
U4	-	1,13	-
U5	29 708	1,10	516

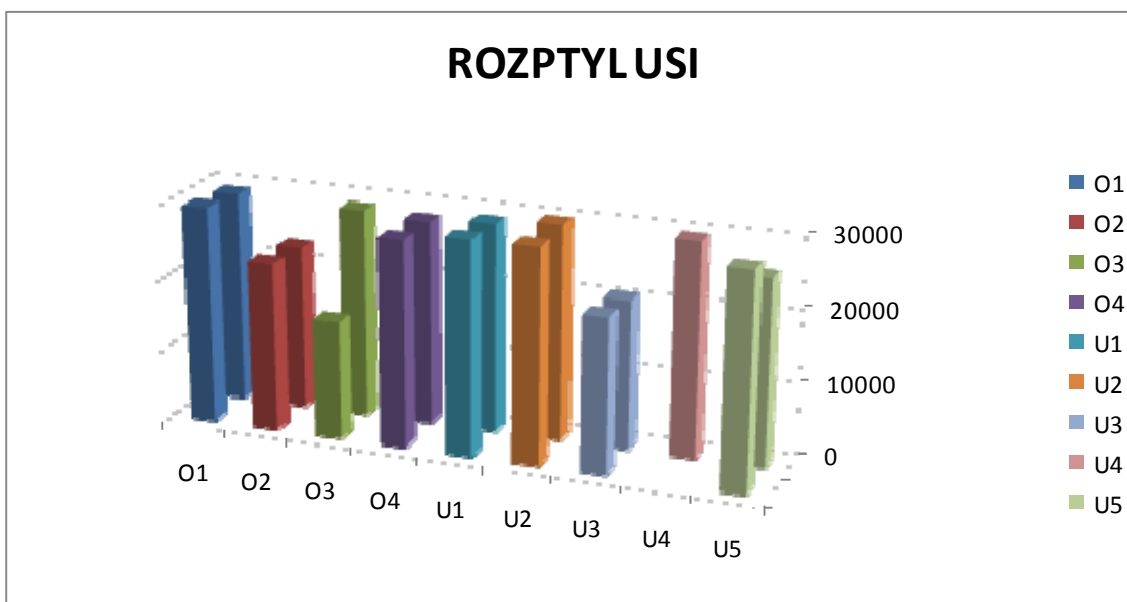
Tab. 18: Výsledky hodnocení spojů oceli USI

U obou kontrolních sad chybí výsledky pro pevnost a práci, vždy u jednoho vzorku ze sady. Tyto vzorky byly použity pro metalografickou analýzu v celku, proto nemohly být destruktivně zkoušeny.

Rozptyl výsledných hodnot zobrazují obr. 34 a 35.



Obr. 34: Srovnání výsledků – pevnost - obou sérií po profilu výlisku, materiál BTR



Obr. 35: Srovnání výsledků – pevnost - obou sérií po profilu výlisku, materiál USI

V návaznosti na výsledky bylo provedeno hodnocení základních charakteristik spojů u celé testované série. Byly provedeny podrobnější materiálové rozborů u vzorků, jež vykazovaly

pokles pevnosti ve stříhu, či odlišný průběh lomu při dostatečné pevnosti. Ze základní sady byly vybrány vzorky:

- materiál BTR -O2-5
 -O3-5
 -U3-5
- materiál USI -O2
 -O3
 -U3

Tyto vzorky byly dále podrobeny analýzám ke zjištění důvodu jejich odlišných vlastností, viz dále.

U obou sad bylo mimo tyto vyloučené vzorky dosaženo odpovídajících výsledků, což potvrzuje dodržení technologických podmínek. Srovnání výsledků potvrdilo pevnost vyhotovených svarových spojů nad cca 24 kN u materiálu BTR a 28 kN u materiálu USI.

Rovněž předpokládané výsledky „užitečné práce“ byly potvrzeny pro oba materiály. Předpokládaná hodnota pro materiál BTR byla 419 MJ a průměrná hodnota vycházející z ověřovacího testu byla 410 MJ. U materiálu USI byla očekávána hodnota 422 MJ a dosažena byla hodnota 410 MJ.

Po srovnání dosažených a vypočtených hodnot lze prohlásit experiment a jeho vyhodnocení za uspokojivé.

9.2 Materiálové analýzy

Pro vysvětlení odlišného chování vyčleněných vzorků bylo použito měření geometrických rozměrů svarů, metalografických analýz, chemických analýz, měření tvrdosti metodou HVm a faktografických analýz lomových ploch po statické zkoušce.

Těmito analýzami bylo zjištěno zejména:

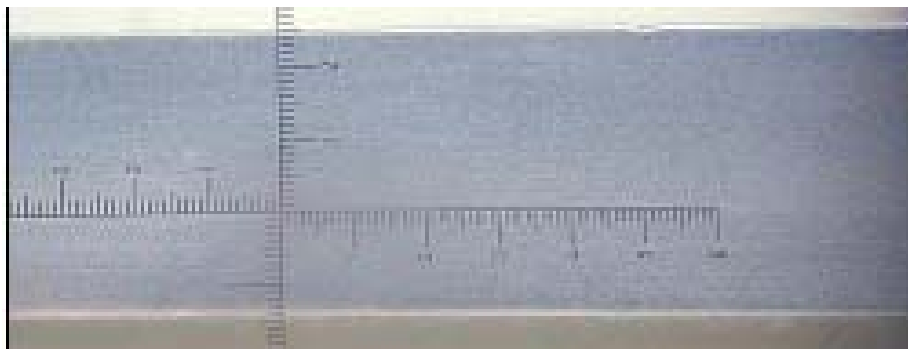
- dodržení / nedodržení technologických podmínek svařování
- strukturní / pevnostní heterogenita materiálu BTR
- oduhličení povrchové vrstvy plechu materiálu BTR
- vada povrchové úpravy materiálu USI
- přítomnost vnitřních imperfekcí ocelí.

Ze vzorků, jež byly vybrány pro podrobné analýzy, pouze jeden nevyhovoval geometrickým podmínkám bodového svaru dle VW 011 05-1. U tohoto vzorku nebyl dodržen technologický

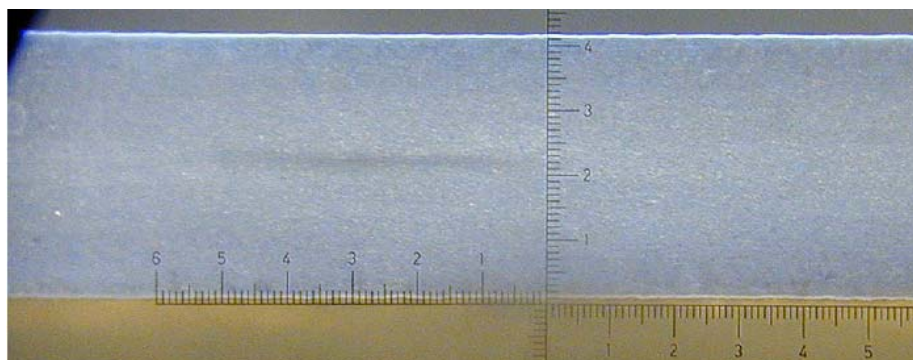
postup svařování a na základě toho vznikl spoj s nerovnoměrnou hloubkou vniknutí (O2-5). Ostatní vzorky nevykazovaly důsledky nedodržení technologických postupů.

9.2.1 Materiál BTR

Při metalografické analýze byla zjištěna zejména strukturní heterogenita po tloušťce plechu materiálu BTR. Tato různorodost byla zjištěna v nerovnoměrném rozsahu v různých částech profilu. Pro posouzení je na obr. 36 zobrazena homogenní struktura, zatímco na obr. 37 a 38 je zachycena evidentní heterogenita materiálu BTR.



Obr. 36: Homogenní struktura materiálu BTR (zvětšení: 20 dílků = 1mm)

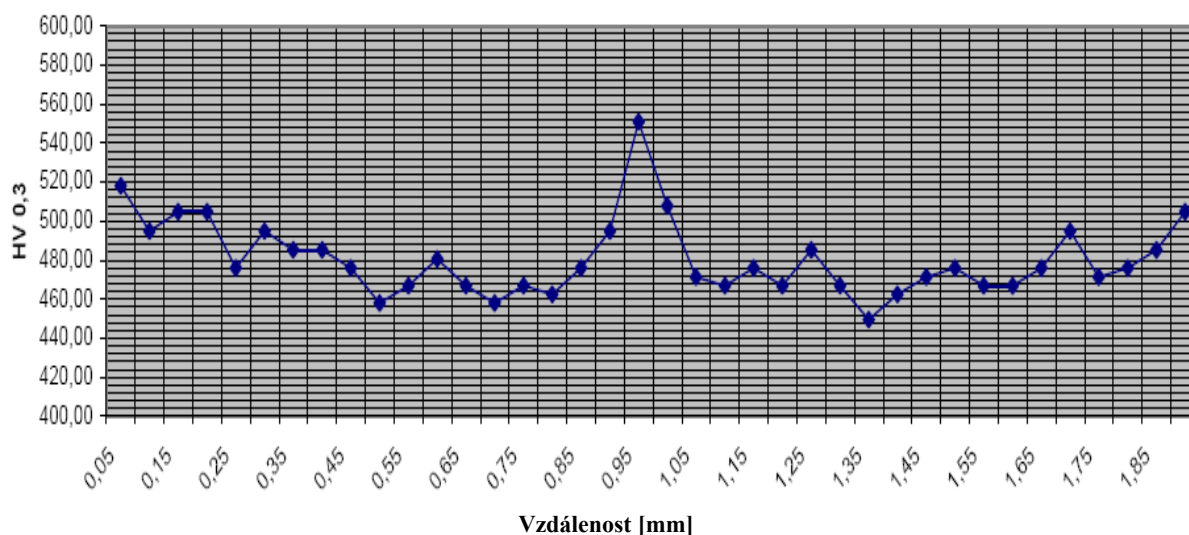


Obr. 37: Heterogenita ve středovém pásmu materiál BTR (zvětšení: 20 dílků = 1mm)



Obr. 38: Heterogenita ve středovém pásmu materiál BTR (zvětšeno 100x)

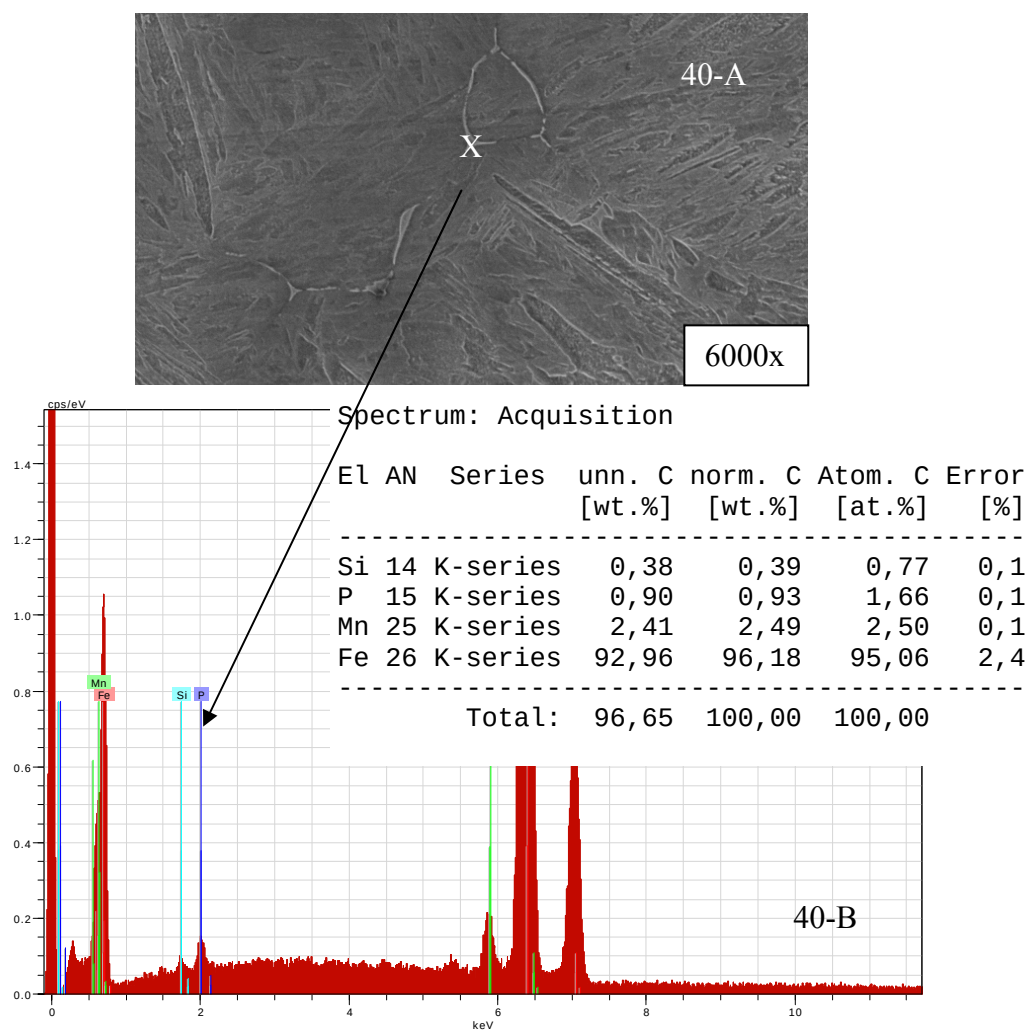
Vzhledem k tomu, že lze efekt přítomnosti heterogenit spojovat s nerovnoměrnou distribucí uhlíku, nutno uvažovat přímý vliv na pevnostní rozdíly a možný vliv na svařitelnost ve formě vyššího rozptylu dosahovaných pevností svarového spoje. Proto bylo provedeno srovnávací vyhodnocení tvrdosti kolmo k povrchu po celé tloušťce plechu. Výsledky měření v závislosti na vzdálenosti od povrchu jsou prezentovány na obr. 39.



Obr. 39: Gradient lokálních rozdílů tvrdosti po tloušťce plechu BTR

Jako další materiálový defekt oceli BTR byl zjištěn výskyt fosfidické fáze. Konkrétně u vzorku BTR O3-5, viz obr. 40 - A. V souvislosti s primární metalurgií základního materiálu oceli byl metalograficky zjištěn, v oblasti po hranicích zrn primární stavby, zvýšený obsah fosforu (P). Toto bylo následně potvrzeno chemickou analýzou, viz obr. 40 - B.

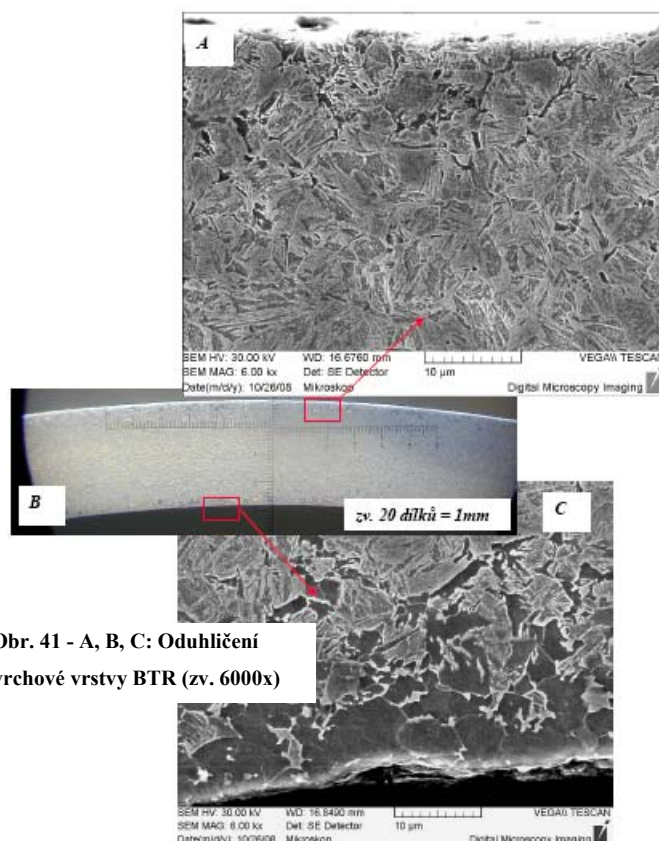
Celkově z kontroly chemického složení u všech rozborovaných profilů bylo zjištěno vyhovující chemické složení (vzhledem k obvyklým relacím daného typu oceli). V případě lokálního odmíšení toto dává možnost vzniku nežádoucích fází, které v závislosti na konkrétním obsahu fosforu limitně vedou až k typickým projevům vad svařitelnosti ocelí, např. typu trhlin za horka. V důsledku toho vzniká nízkotavitelná fáze na původních hranicích dendritů, viz obr. 40 - A.



Obr. 40 - A, 40 - B: Fosfidická fáze materiálu BTR, chemická analýza

Výše zmíněné efekty pak můžeme považovat za majoritní příčinu odlišného chování vzorků O3-5 a U3-5.

U materiálu BTR bylo navíc metalograficky zjištěno nerovnoměrné oduhličení povrchu plechu, částečně spojené se zhrubnutím struktury, viz obr. 41 A až C.

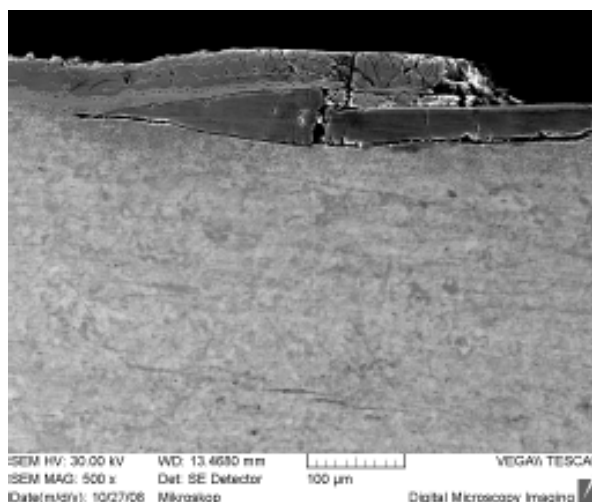


Obr. 41 - A, B, C: Oduhličení
povrchové vrstvy BTR (zv. 6000x)

Rozdíly v tloušťce a zároveň intenzitě oduhličení byly zjištěny v dosahu řádově mikrometrů po ploše plechu, popř. mezi oběma stranami plechu v hodnocené části metalografického výbrusu. Efekt oduhličení materiálu BTR ovšem nelze spojit s vlivem na jakost svařence.

9.2.2 Materiál USI

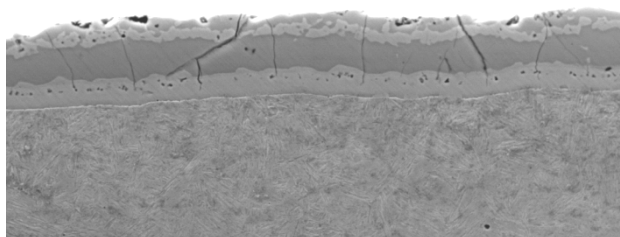
U materiálu USI byla velká část zkoumání věnována posouzení kvalitě povrchové úpravy materiálu. V povrchové vrstvě byla lokálně zjištěna specifická nehomogenita, viz obr. 42, jež byla dále podrobena chemické analýze.



Obr. 42: Vada povrchové úpravy

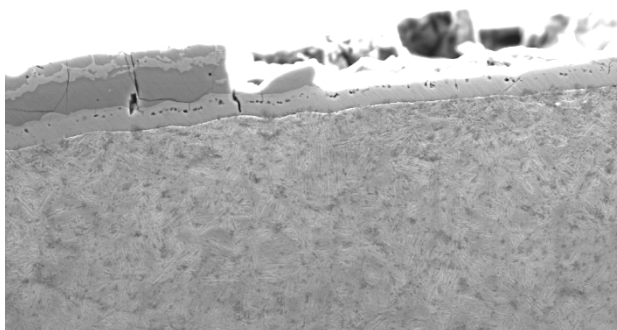
Výsledky chemické analýzy poukazují na vznik mezivrstvy na bázi oxidů železa, která lokálně omezila jakost povrchové vrstvy na bázi hliníku. Zjištěná oxidace vedla k dekohezi vrstvy a následně došlo k souvisejícímu poškození struktury povrchu. U zjištěného poškození, vzhledem k povaze vrstvy i souvisejícímu vlivu na jakost volného povrchu materiálu, lze předpokládat podstatný vliv na svařitelnost takto postižené části povrchu materiálu.

Mimo tento efekt byla hodnocena celková tloušťka použité povrchové ochrany materiálu, viz obr. 43. Jelikož je tato vrstva složena zejména z prvků Al a Si, lze očekávat z hlediska svařitelnosti velký vliv na jakost spoje.



Obr. 43: Povrchová vrstva - vyhovující stav

U spojů, jež vykazovaly odlišné vlastnosti, byl zjištěn defekt povrchové vrstvy spočívající v odstranění vrstvy bohatší na hliník, viz obr. 44. Do kontaktu se svařovací elektrodou tak přistupuje vrstva o podstatně vyšším obsahu křemíku, což s sebou přináší změnu svařovacího odporu a následnou změnu dodaného tepla do svarového kovu při procesu sváření. Z uvedeného lze očekávat výrazný vliv na kvalitu svarového spoje při dodržení námi určených svařovacích parametrů.

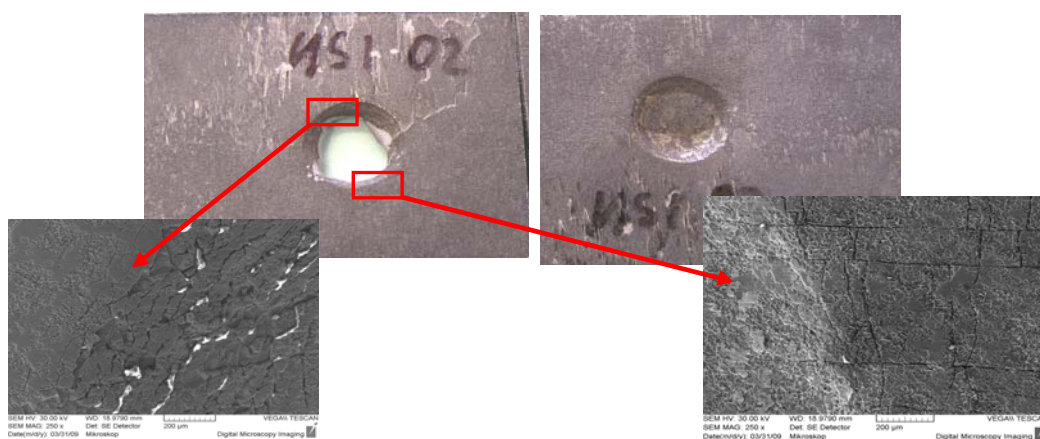


Obr. 44: Povrchová vrstva - vyhovující / nevyhovující stav

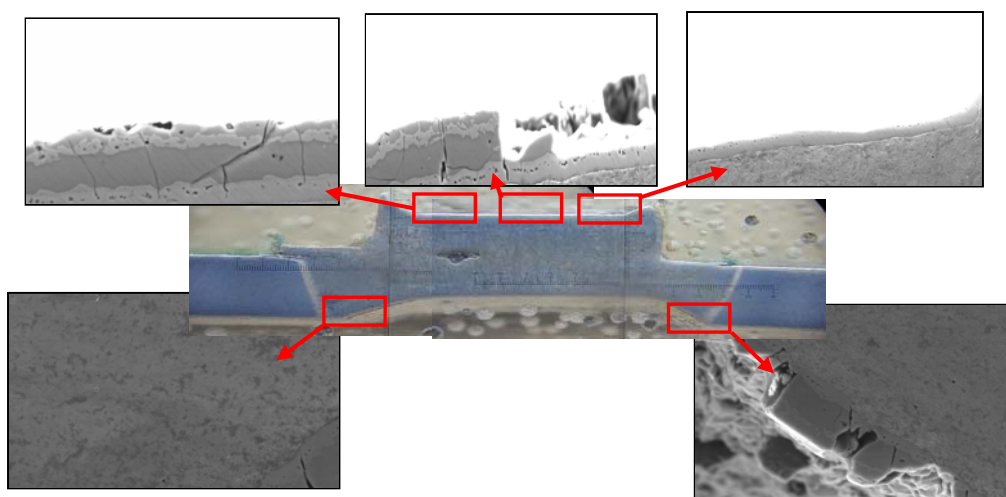
Vliv kvality, spíše poruchy povrchové úpravy na jakost svarového spoje, se ukázal jako dominantní u vzorků O2 a O3.

U spojů USI se s dosažením optima jakosti zachovává povrchová vrstva konstantní po celé ploše průvaru. Plošně rozsáhlejší poškození, u kterého se projevil vliv na únosnost spoje, bylo zjištěno v horní oblasti B-sloupku (tedy označení O). Při tomto poškození povrchové vrstvy přichází do kontaktu s elektrodou vrstva o podstatně vyšším obsahu křemíku (Si) spolu s mírným zvýšením obsahu manganu (Mn). Změna chemického složení povrchové vrstvy má určující vliv na změnu odporu svařované oblasti a tedy i výši pevnosti spoje. Pozorován byl vliv na geometrii průvaru. Změnou, zejména hloubky průvaru, dochází, místo k žádoucímu přetržení po obvodu oblasti tepelného ovlivnění, k čistě stříhovému poškození ve svarové čočce. Situaci dokumentuje sada snímků povrchu svarového bodu v místě vady, viz obr. 45 a obr. 46.

Na základně uvedených výsledků byl, po kontrole celistvého profilu materiálu USI, potvrzen výskyt vizuálně rozlišitelné vady, orientované do středu šířky profilu, viz obr. 47.



Obr. 45: Kolize povrchové vady a svarového bodu - materiál USI

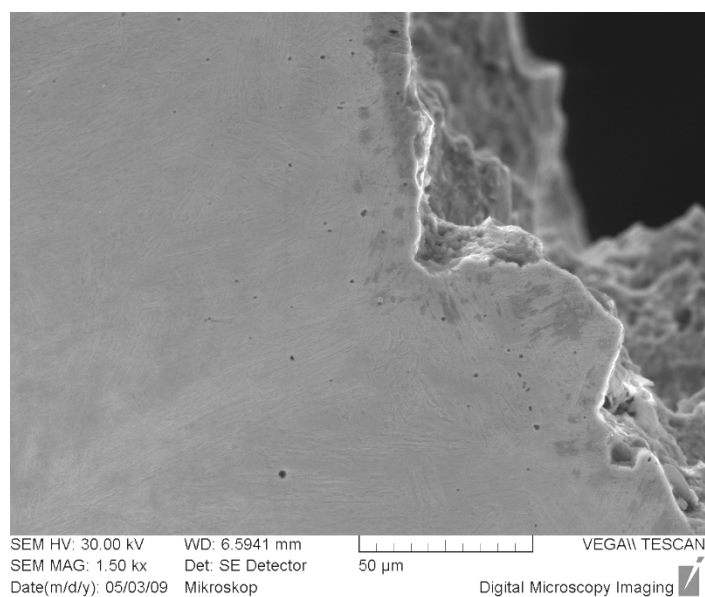


Obr. 46: Vliv stavu povrchové vrstvy na geometrii svaru



Obr. 47: Profil materiálu USI - povrchová vada v horní oblasti B-sloupku

Vedle uvedeného vlivu, jež má podstatný vliv na svařitelnost tohoto materiálu, byly lokálně zjištěny shluky inkluzí (typu komplexních oxidů). Např. u vzorku U3 byly tyto shluky dokumentovány bezprostředně u lomové plochy, viz obr. 48. Na základě nálezu tohoto typu vady a jejího umístění ji lze do jisté míry spojovat se sníženou pevností spoje. Ovšem vliv této imperfekce je ve srovnání s imperfekcí povrchové úpravy v daném rozsahu nepodstatný.



Obr. 48: Shluk inkluzí - materiál USI

Závěr

Cílem této práce bylo experimentální studium problematiky svařování vysokopevnostních materiálů a navržení dostatečně robustního plánu experimentu, jež by vedl při použití Taguchiho metodiky k nalezení optimálních svařovacích parametrů testovaných materiálů.

V práci byl vysvětlen postup při určování svařovacích parametrů a bylo prokázáno, že pro dostatečné určení svařovacích parametrů vyhovuje ortogonální systém L27.

Pro další aplikaci v praxi, kdy je po technologovi požadováno co největší snížení nákladů na návrh svarového spoje, a to jak finančních, tak i časových, byl vytvořen výpočetní program. Tento technologovi umožňuje určení svařovacích parametrů pro různé tloušťky plechů a to prakticky s minimálními náklady. Rovněž tak je v práci vyhotoven návod postupu realizace vlastního experimentu s jinými materiály a jeho vyhodnocení.

Navržené svařovací parametry v rámci této práce prokázaly dostatečnou stabilitu mechanických vlastností svarových spojů s přijatelnou chybou, jež byla ovlivněna zejména materiálovými anomáliemi, které způsobovaly rozptyl mechanických vlastností svařovaného materiálu a posléze tedy i svarového spoje.

Pomocí materiálových rozborů, tedy metalografickou, chemickou a faktografickou analýzou a měřením tvrdosti HVm, byly identifikovány konkrétní vady mající vliv na svařitelnost zkoumaných materiálů.

Z řady poznatků, zjištěných při zkoumání daných materiálů, lze vyjmout jako rozhodující:

- přítomnost strukturních heterogenit u materiálu BTR,
- výskyt fosfidických fází u materiálu BTR,
- šířku povrchové úpravy materiálu USI,
- homogenitu v povrchové úpravě materiálu USI,
- přítomnost shluků inkluzí v blízkosti lomové plochy materiálu USI,

jež při svařování danou technologií zkoumaných materiálů vykazují vysoký vliv na jakost spoje.

Zjištěná přítomnost strukturní heterogenity po tloušťce plechu materiálu BTR byla prokázána zkoumáním tvrdosti metodou liniových měření mikrotvrdosti kolmo k rovině procházející povrchem plechu. Toto měření zároveň potvrdilo nerovnoměrný obsah uhlíku v profilu plechu související s evidentním vlivem na pevnost i svařitelnost základního materiálu.

Chemickou analýzou byla zjištěna přítomnost fosfidických fází, které v případě lokálního odmíšení mohou dávat možnost vzniku nežádoucích fází. Ty v závislosti na konkrétním obsahu v matici vedou až k typickým projevům vad svařitelnosti, jako např. vzniku trhlin za horka.

U materiálu USI bylo jednoznačně prokázáno, že rozhodující vliv na jakost svarového spoje lze spojovat s kvalitou provedení povrchové úpravy plechu, a to jak dosahované pevnosti, tak i docílení hodnoty optimálního průvaru svarové čochy.

Co se svařitelnosti zkoumaných materiálů týče, byla zjištěna vyšší stabilita materiálu USI než BTR. Materiál USI vykazoval menší rozptyl pevnosti jak základního materiálu, tak i svarového spoje. Vzniklý rozptyl je nutno jednoznačně spojovat s defekty v povrchové úpravě materiálu. Podstatné pro praktické uplatnění výsledků, plynoucích ze zkoumání povrchové úpravy materiálu, je skutečnost, že se jedná o vizuálně rozlišitelný efekt, který lze omezit ještě před provedením svarového spoje a tím snížit náklady související se zmetkovitostí.

Na rozdíl k USI byl u materiálu BTR zjištěn větší rozptyl měřených hodnot, který nutno spojovat pouze s interními vadami základního materiálu. Jelikož se tyto vady vyskytují pod povrchem materiálu, je jejich identifikovatelnou obtížná. Tyto vady proto zůstávají téměř nepodchytitelné a to prakticky i při standardní kontrole mechanických vlastností, která se v praktické aplikaci v daném rozsahu provádí.

V průběhu hodnocení rozsáhlé sady experimentů bylo mimo výše zmíněné zjištěno několik doprovodných nálezů vypovídajících v rozporu se standardní metodikou používanou ke kontrole jakosti svarových spojů. Např. porušení v rovině propojení plechů vykazovalo vysokou pevnost spoje, ačkoli by tento spoj byl vyřazen při tzv. sekáčové zkoušce. Navíc byl zjištěn prakticky zanedbatelný vliv (do jisté míry) vnitřních vad svarového kovu ve formě dutin či trhlin.

Použité značení:

DP - Dual Phase - dvoufázové oceli

BH - Bake Hardening - dvojfázové oceli ve stavu válcování za studena

IF - Interstitials Free - nízkouhlíkové oceli bez intersticiálního zpevnění

CP - Complex Phase - vícefázové oceli

HSS - Hardened by Solid Solution - tvrzené tuhým roztokem

AHSS - Advanced High Strength Steels - pokročilé vysocepevné oceli

TRIP - Transformation Induced Plasticity - oceli s transformačně indukovanou plasticitou

BH efect – Baking hardenability - zvýšení $R_{p0,2}$ při teplotě vypalování laku
(20 min při 170 °C)

TTT - Temperature Time Transformation - transformační závislost teplota - čas

Seznam obrázků

Obr. 1: Materiály pro Škoda Octavia první a druhé generace	8
Obr. 2: Vývoj mikrostruktury při ochlazování při výrobě AHSS	10
Obr. 3: Mikrostruktura DP oceli	10
Obr. 4: Mikrostruktura TRIP oceli	11
Obr. 5: Mikrostruktura CP oceli	11
Obr. 6: Mikrostruktura martenzitické oceli	12
Obr. 7: Mikrostruktura MnB oceli válcované zastudena a zatepla	12
Obr. 8: Vlastnosti oceli MnB válcované zastudena a zatepla	13
Obr. 9: Porovnání meze kluzu a tažnosti u AHSS	13
Obr. 10: Přehled vysokopevnostních částí karoserie	14
Obr. 11: Schéma postupu při kalení lisováním	15
Obr. 12: ARA diagram oceli 22MnB5	16
Obr. 13: Vylisovaný díl	17
Obr. 14: Lisovací manipulátor SpeedFeeder	17
Obr. 15: Bodové svařování	19
Obr. 16: Bodové svařování - detail	19
Obr. 17: Určení bodového svaru	19
Obr. 18: Knoflíkový lom	19
Obr. 19: Nůžkový lom	19
Obr. 20: Smíšený lom	19
Obr. 21: Závislost proudu a impedance	20
Obr. 22: Stříhová zkouška	33
Obr. 23: Schéma univerzálního zkušebního stroje	33
Obr. 24: Graf tahové zkoušky pro výpočet měrné hodnoty mechanické práce	34
Obr. 25: Schematické znázornění bodového svaru	34

Obr. 26: Postup při zařazování interakce A x B.....	37
Obr. 27: Místa odběru vzorků	40
Obr. 28: Rozměry zkušebního vzorku pro BTR	41
Obr. 29: Přesná pila pro experimentální účely MIKRON 110.....	41
Obr. 30: Pneumatická bodová svářečka BP 20.12	42
Obr. 31: Detail svařovacích elektrod.....	42
Obr. 32: Přepočtový graf.....	43
Obr. 33: Schéma odběru vzorků pro ověřovací experiment.....	60
Obr. 34: Srovnání výsledků - pevnost - obou sérií po profilu výlisku, materiál BTR	63
Obr. 35: Srovnání výsledků - pevnost - obou sérií po profilu výlisku, materiál USI	63
Obr. 36: Homogenní struktura materiálu BTR (zvětšení: 20 dílků= 1mm).....	65
Obr. 37: Heterogenita ve středovém pásmu materiál BTR (zvětšení: 20 dílků= 1mm).....	65
Obr. 38: Heterogenita ve středovém pásmu materiál BTR (zvětšeno 100x)	65
Obr. 39: Gradient lokálních rozdílů tvrdosti po tloušťce plechu BTR.....	66
Obr. 40 - A, 40 - B: Fosfidická fáze materiálu BTR, chemická analýza	67
Obr. 41 - A, B, C: Oduhličení povrchové vrstvy BTR (zv. 6000x)	68
Obr. 42: Vada povrchové úpravy	68
Obr. 43: Povrchová vrstva - vyhovující stav	69
Obr. 44: Povrchová vrstva - vyhovující / nevyhovující stav.....	69
Obr. 45: Kolize povrchové vady a svařového bodu - materiál USI	70
Obr. 46: Vliv stavu povrchové vrstvy na geometrii svaru	70
Obr. 47: Profil materiálu USI - povrchová vada v horní oblasti B-sloupku	71
Obr. 48: Shluk inkluzí - materiál USI	71

Seznam tabulek

Tab. 1: Upravený ortogonální systém L27	27
Tab. 2: Taguchiho triangulární tabulka	29
Tab. 3: Kompletní ortogonální systém L27	38
Tab. 4: Charakteristiky jakosti USI první sada	44
Tab. 5: Charakteristiky jakosti USI druhá sada.....	45
Tab. 6: Charakteristiky jakosti BTR první sada	46
Tab. 7: Charakteristiky jakosti BTR druhá sada	47
Tab. 8: ANOVA pro vyhodnocení dle maximální užitečné energie materiálu BTR	51
Tab. 9: Vyhodnocení první sady experimentů - materiál BTR	54
Tab. 10: Vyhodnocení druhé sady experimentů - materiál BTR	55
Tab. 11: Vyhodnocení první sady experimentů - materiál USI	55
Tab. 12: Vyhodnocení druhé sady experimentů - materiál USI.....	55
Tab. 13: Vyhodnocení obou sad experimentů - materiál BTR	57
Tab. 14: Vyhodnocení obou sad experimentů - materiál USI.....	57
Tab. 15: Výsledky hodnocení spojů oceli BTR	61
Tab. 16: Výsledky hodnocení spojů oceli BTR	61
Tab. 17: Výsledky hodnocení spojů oceli USI.....	62
Tab. 18: Výsledky hodnocení spojů oceli USI.....	62

Seznam použité literatury:

- [1] Trendy ve vývoji plechů pro automobilový průmysl [online databáze]. Technická univerzita v Liberci, Katedra strojírenské technologie, Liberec, 2008 - [cit. 2009-8-1]. Dostupná z WWW:
<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf>
- [2] Vysoce pevné mikrolegované oceli High Strength Low Alloy Steels HSLA [online databáze]. Západočeská univerzita v Plzni, Katedra materiálu a strojírenské metalurgie, Fakulta strojní, Plzeň, 2009 - [cit. 2009-8-1]. Dostupná z WWW:
<<http://www.ateam.zcu.cz/hsla.pdf>>
- [3] The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation [online databáze]. Scribd, 2008 - [cit. 2009-8-1]. Dostupná z WWW:
<<http://www.scribd.com/doc/3134592/NonIsothermal-Deformation-and-Martensitic-Transformation>>
- [4] Current Status of Advanced High Strength Steel for Auto-making and its Development in Baosteel [online databáze]. Baosteel research institute, Shangai - [cit. 2009-8-1]. Dostupná z WWW: <http://www.baosteel.com/english_n/e07technical_n/021702e.pdf>
- [5] New advances in surface treatment [online databáze]. Acelor Mittal, England, 2008 - [cit. 2009-8-1]. Dostupná z WWW:
<http://www.arcelormittal.com/fce/repository/Unassigned/EN_UpdateFCE_nov08.pdf>
- [6] Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperatures [online databáze]. Science Direct, 2008 - [cit. 2009-8-1]. Dostupná z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TXD-4NWKCNX-1&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=f1345f756906f4a8b2a82e2374c6851f>
- [7] Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations [online databáze]. Science Direct, 2006 - [cit. 2009-8-1]. Dostupná z WWW:
<http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TGJ-4K717R9-7&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=f37623adc3e3bb6fde0f1b4da2ab59da>
- [8] A Numerical and Experimental Investigation into Hot Stamping of Boron Alloyed Heat Treated Steels [online databáze]. Department of Ferrous Metallurgy, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2007 - [cit. 2009-8-1]. Dostupná z WWW:
<http://www.stahleisen.de/html/zeitschriften/files/steel_research_free_paper_hot_stamping_boron_steels_english.pdf>
- [9] Inovativní technologie v automobilovém průmyslu [online databáze]. MM průmyslové spectrum, Praha, 2007 - [cit. 2009-8-1]. Dostupná z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/inovativni-technologie-v-automobilovem-prumyslu>>

- [10] Konečný, M.: *Povrchové úpravy spojovacích prvků karoserií osobních vozů a jejich vliv na jakost spojů*. Univerzita Pardubice, Fakulta dopravní, Pardubice, 2007. Bakalářská práce (Bc.).
- [11] Hrivňák, I.: Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin, *Veda*, 1988, ISBN 80-224-0016-5.
- [12] VW 011 05-1, Odporové bodové svařování, konstrukce, výpočty, zajištění procesu - nepovrstvené a povrstvené plechy, © *VOLKSWAGEN AG*, duben 2004.
- [13] Beneš, A.: Mechanická technologie kovů. *Státní nakladatelství technické literatury, Praha*, 1967.
- [14] TOMČÍK, P., TROJAN, R., MOHYLA, P.: The Pulsed Magnetic Treatment Effects on the Mechanical Properties of the Heat - treated High-Speed Steel 19830.8. *Sborník vědeckých prací VŠB – TUO, řada strojní*, 2006, ročník LII, 1/2006, s. 209-213. ISSN 1210-0471.
- [15] Steel - Innovative solutions for energy and resource challenges [online databáze]. 8th International Arab Iron and Steel Conference, Doha / Qatar, 2008 - [cit. 2009-8-1]. Dostupná z WWW:
<http://www.stahl-online.de/english/media_lounge/Lectures/200803178thInternationalArabIronandSteelConferenceDohaQatarlang.pdf>
- [16] DIN EN 10149-1, Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen-Allgemeine Lieferbedingungen, © *VOLKSWAGEN AG*, November 1995.
- [17] DIN EN 10149-2, Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen-Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle, © *VOLKSWAGEN AG*, November 1995.