

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

ANALÝZA PARAMETRŮ KVALITY
SVAROVÝCH SPOJŮ VYSOKOPEVNÝCH OCELÍ
PŘI STAVBĚ KAROSERIÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

2009

Ing. Vlastimil KAPSA

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Analýza parametrů kvality svarových spojů
vysokopevných ocelí při stavbě karoserií

Ing. Vlastimil Kapsa

Disertační práce

2009

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.

V Pardubicích dne 11. 3. 2009

Vlastimil Kapsa

Děkuji všem, kteří nějakým způsobem přispěli ke vzniku této práce. Jmenovitě děkuji doc. Ing. Evě Schmidové, Ph.D. za odborné vedení práce, Ing. Lubomíru Rolečkovi a Ing. Petru Vlkovi za poskytnuté díly z výroby karoserií Škoda Auto a.s. a cenné rady během konzultací.

Anotace

Práce se věnuje problematice spojování dílů z vysokopevné borem legované oceli technologií bodového odporového svařování při stavbě karoserií osobních automobilů. Byly provedeny materiálové rozbory základního materiálu vysokopevné oceli a heterogenních i homogenních svarů pomocí metod fraktografie, metalografie, mikrotvrlosti HVm a tahové pevnostní zkoušky. Pomocí metody DOE byl navržen experiment, jehož výsledky určily podíly vlivu jednotlivých parametrů procesu svařování a jejich interakcí na charakteristiky jakosti spoje. Byla provedena analýza možných způsobů a důsledků závad (FMEA) svarových spojů a hodnocení způsobilosti daného procesu výroby.

Klíčová slova

svařování, karoserie, automobil, bodové odporové svary, vysokopevná ocel, lisování za tepla, heterogenní svary, homogenní svary, pevnost, variabilita, robustnost, způsobilost, návrh experimentu, DOE, FMEA, proces

Annotation

The thesis deals with the issue of joining parts made of high-strength boron alloyed steel (BHSS) by using resistance spot welding technology within a car body building process. There were material analyses of BHSS base metal, heterogeneous and homogeneous welds performed by means of fractography, metallography, HVm microhardness and tensile strength test methods. Using the DOE method an experiment was designed, so its results could identify effect rates of particular welding process parameters and their interactions on weld quality characteristics. Failure mode and effect analysis (FMEA) of weld joints and capability rating was also implemented.

Keywords

welding, car body, automotive, resistance spot welding, high-strength steel, hot stamping, heterogeneous welds, homogeneous welds, strength, variability, robustness, capability, Design of Experiments, DOE, FMEA, process

Obsah

Úvod	3
1 Cíle disertační práce	4
2 Oceli pro stavbu karoserií	5
2.1 Příklady použití vysokopevných ocelí u automobilů.....	5
2.2 Členění ocelí pro automobilový průmysl	6
2.2.1 Členění ocelí dle principu strukturního zpevnění	7
2.3 Ocel 22MnB5.....	8
3 Technologie lisování za tepla.....	10
4 Technologie bodového odporového svařování.....	12
4.1 Princip odporového svařování	12
4.2 Zkoušení jakosti bodových odporových svarů	13
4.2.1 NDT ultrazvukové zkoušky	13
5 Příprava experimentu.....	15
5.1 Vyhotovení vzorků	15
5.2 Použitá zařízení.....	17
5.3 Použité standardy	19
6 Aplikace metody DOE	20
6.1 Metodika vlastního návrhu experimentu	21
6.1.1 Definice a charakteristika problému	21
6.1.2 Výběr faktorů a jejich úrovní.....	22
Regulovatelné faktory experimentu.....	22
Šumové faktory experimentu.....	25
Interakce faktorů.....	29
6.1.3 Stanovení sledované odezvy	29
Pevnost bodových svarů	30
6.1.4 Plán experimentu	31
Experiment podle Taguchiho.....	31
Vlastní plán experimentu.....	32
6.1.5 Realizace experimentu	33
Svařování vzorků.....	33
Měření.....	33
6.1.6 Zpracování dat (ANOVA)	34
Analýza naměřených dat průměrů svarových bodů	35
Analýza robustnosti nastavení parametrů	40
6.1.7 Závěry a doporučení	43
7 Materiálové analýzy	46
7.1 Analýzy základního materiálu vysokopevné oceli	46
7.1.1 Strukturní heterogenita materiálu BTR165.....	46

7.1.2	Oduhličení povrchové vrstvy plechu z materiálu BTR165.....	48
7.1.3	Jakost povrchové vrstvy materiálu USIBOR 1500.....	49
	Kompaktnost jednotlivých subvrstev	49
	Vady povrchové úpravy.....	50
7.1.4	Statické lomové chování aplikovaných ocelí.....	52
7.1.5	Analýzy defektního lomu materiálu USIBOR 1500.....	53
7.1.6	Strukturní charakteristika ocelí	56
7.1.7	Shrnutí výsledků analýz základních materiálů	56
7.2	Materiálové analýzy heterogenních svarových spojů.....	57
7.2.1	Pevnostní zkoušky	57
	Korelace d_p a F_{max}	59
7.2.2	Fraktografie.....	60
7.2.3	Zkoušky tvrdosti	63
7.2.4	Metalografie	65
	Metalografie vzorků dle metody DOE	66
	Metalografie vzorků iniciačního testu rozsahu parametrů	76
	Nečistota a kvalita vnitřní struktury bodových svarů.....	79
	Souhrn poznatků z metalografie heterogenních svarů.....	80
7.3	Materiálové analýzy homogenních svarových spojů.....	82
7.3.1	Tahové zkoušky stříhem	82
7.3.2	Makroskopická pozorování a měření mikrotvrdosti	83
7.3.3	Fraktografie.....	84
7.4	Závěry z materiálových analýz bodových svarů	85
8	FMEA procesu bodového odporového svařování	87
8.1	Vlastní FMEA.....	89
9	Způsobilost procesu	92
10	Ekonomická rozvaha.....	96
11	Diskuze experimentálních výsledků.....	98
12	Vlastní přínos.....	100
	Závěry a shrnutí hlavních poznatků.....	101
	Seznam použité literatury	104
	Seznam obrázků.....	107
	Seznam tabulek.....	110
	Seznam grafů.....	111
	Seznam zkratk.....	112
	Seznam vlastních publikací.....	114
	Seznam příloh	115

Úvod

Snížení spotřeby paliva bylo a je jedním z primárních úkolů automobilového průmyslu. Je tomu tak proto, že při spalování paliv dochází ke vzniku emisí nežádoucích plynů (především CO_2). Existuje mnoho faktorů, které mohou ovlivnit spotřebu paliva u vozidel. Patří sem především celková hmotnost vozidla, vysoká účinnost motoru a převodů a aerodynamika vozidla.

Z pohledu materiálového inženýrství čelíme nástupu „lehkých“ materiálů jako jsou plasty, lehké kovy a vysokopevné ocelové plechy. Vysokopevná ocel je dobrou odpovědí na dnes rychle se měnící požadavky automobilového průmyslu právě tam, kde je zapotřebí redukce hmotnosti vozidla při zachování vlastností pevnosti karoserie. Hmotnost karoserie představuje asi 25 % celkové hmotnosti hotového vozu [1].

Na druhou stranu, tyto vysokopevné materiály pomáhají výrobcům automobilů posílit pozici na trhu, když musí dennodenně čelit zvyšujícím se požadavkům legislativních standardů na pasivní bezpečnost při nárazu automobilu (crash testy). Záruky vyšší bezpečnosti však směřují ke zvětšování tloušťek ocelových plechů a ke zvýšení počtu výstužných dílů, což vede k trendu zvyšování celkové hmotnosti karoserie.

Při konstrukci vozu je současně kladen důraz na požadavky redukce hmotnosti vozu a zlepšení odolnosti proti nárazu. Z toho titulu je rozšíření užití vysokopevných ocelových plechů při stavbě karoserie vozu velmi důležité. Aplikace těchto materiálů nemá však za viditelný efekt pouze snížení hmotnosti vozidla, ale také zlepšení pohodlí a stability jízdy.

Bodové odporové svařování je dnes obecně nejčastěji používanou technologií při stavbě karoserie vozu ve všech významných automobilových závodech. Bodové odporové svary tvoří asi 90 % montáže karoserie vozu [9]. Kvalitní provedení technologie bodového svařování má u karoserií značný význam pro odolnost konstrukce vozu proti nárazu [10]. Proto se disertační práce zabývá především svařitelností vysokopevných ocelových plechů technologií bodového odporového svařování.

Praktická část práce je zaměřena na rozборы implementace vysokopevných ocelových plechů a jejich svařitelnost v prostředí svařovny automobilového závodu, za použití vhodných nástrojů řízení kvality a materiálových analýz.

1 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce byla analýza interakce parametrů procesu bodového odporového svařování a materiálu daných dílů B-sloupku z vysokopevné borem legované oceli. Pomocí zvolené metodiky materiálových analýz bylo třeba provést studium vlastností předmětných typů základního materiálu dílů i jejich vliv na svařitelnost v relaci k řízení parametrů technologie spojování. Podrobné materiálové analýzy bylo nutné zaměřit především na konkrétní charakteristiky jakosti daného materiálu a tyto experimentálně vyhodnotit v míře jejich vlivu při aplikaci různých nastavení svářecích parametrů na kvalitu vyrobených svarů.

Jedním z nosných záměrů disertační práce bylo experimentální stanovení vhodných technologických parametrů svařování pro zabezpečení požadovaných kritérií jakosti bodových odporových svarů. Návrh režimu experimentálního svařování a metodiky hodnocení výsledků bylo nutné založit na konkrétních podmínkách z hlediska praktické aplikovatelnosti v relaci k zavedeným normativním požadavkům. Bylo třeba se zaměřit na kombinace materiálů, kterých se užívá ve stavbě karoserií. Standardně se přitom nejvíce svařují kombinace plechů z vysokopevných a nízkopevných ocelí.

Oba typy vysokopevných ocelových plechů, které jsou v reálu používány, jsou z hlediska svařitelnosti různorodé zejména rozdíly v jakosti povrchu.

Vzniká tak heterogenní svarový spoj (materiálů různých mechanických a strukturních vlastností), kde predikci materiálové odezvy na teplotní a napět'ové pole bylo nutné opřít o strukturní a fázové analýzy obou variant ocelí za působení zvolených extrémních hodnot technologických parametrů. To určuje požadavky na definici rozptylu hodnot v rámci realizovaných experimentů.

Pro vyhodnocení konkrétních podílů vlivu na vybrané charakteristiky jakosti spoje bylo třeba aplikovat několik k tomuto účelu vhodných metod řízení kvality.

Cílem bylo provedení návrhu a realizace experimentu pomocí metody DOE.

Pro kvantifikaci způsobilosti procesu svařování dílů z vysokopevné oceli bylo třeba vzhledem k jednostrannosti předepsaných specifikací aplikovat výpočet indexu způsobilosti C_{pk} .

Jako stěžejní charakteristika hodnocení experimentu bylo stanoveno kritérium statické pevnosti. Komplexní vyhodnocení zahrnuje rovněž další ukazatele jakosti svarů (průměr svarového bodu aj.). Zde bylo nutné zohlednit návaznosti na možnosti provozních hodnocení a závažnost konkrétních ukazatelů jakosti. Cílem bylo provést návrh optimálních parametrů procesu bodového odporového svařování a vyhodnotit přitom podíly vlivů těchto parametrů a jejich možných interakcí.

Dalším záměrem práce bylo provést analýzu možných způsobů a důsledků závad (FMEA), která umožňuje hodnocení rizik u bodových svarů, zpracovat výsledky uvedené metody formou stručného katalogu vnitřních i vnějších vad, které mohou u bodových svarů nastat během procesu spojování dílů z vysokopevné oceli. Přehled vad umožní transparentní rozhodování při řízení daného procesu svařování.

Dílčím záměrem disertační práce byla i orientační ekonomická rozvaha nasazení materiálu vysokopevné oceli v konstrukci karoserií automobilů rámcově vzhledem k širší studované problematice.

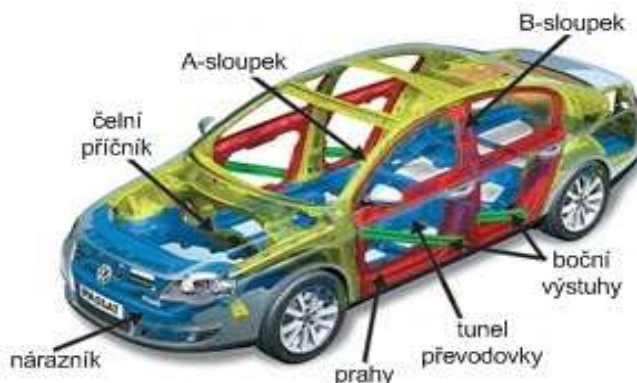
2 Oceli pro stavbu karoserií

Vysokopevné ocelové plechy se začaly ve značném měřítku v automobilovém průmyslu používat během posledních třiceti let, přičemž posledních osm let nabývá jejich použití rapidně na intenzitě. Dnes se v oboru stávají významnými především vysokopevné oceli lisované za vysokých teplot – martenzitické, legované borem, které dosahují pevnosti 1500 MPa. Nové technologie lisování však s sebou přinášejí mnohé otázky do následujících procesů výroby vozu, a to především do výroby karoserie, tj. svařování.

Zmiňovaný typ vysokopevných ocelových plechů pro stavbu vozu v naší zemi distribuují vybraní dodavatelé ArcelorMittal a Benteler.

Nasazení vysokopevných materiálů do výroby vozu se stalo trendem a výsadou všech významných výrobců automobilů. Vysokopevnou ocel lze najít například v karoseriích vozů Volvo XC90, BMW E60, Porsche Cayenne, VW Touareg a v mnoha dalších [2]. Ve Škoda Auto a.s. byly vysokopevné ocelové plechy nasazeny při stavbě vozu již od vývoje modelu Octavia druhé generace v roce 2004. Jsou tedy i v modelových řadách Roomster, Fabia druhé generace a v nemalé míře jsou implementovány i do modelu Superb druhé generace.

Je logické, že praktické využití nacházejí tyto vysokopevné materiály především u velkých dílů karoserie, které jsou z hlediska bezpečnosti lidské posádky automobilu při možném nárazu nejdůležitější. Jsou to hlavně díly výztuh bočních dveří a prahů, kde se přivařují trubky z vysokopevných materiálů [3], A a B sloupky, díly rámu, prahy, uchycení nárazníků, příčníky podvozku a střechy, různé podélné i příčné nosníky a další „crashové“ důležité díly karoserie vozu [4].



Obr. 2-1: Vysokopevné díly karoserie vozu [5]

Svařitelnost vysokopevných plechů je podmíněná nejen jejich chemickým složením, nýbrž i druhem a způsobem povrchové úpravy. K antikoroznímu pokovení ocelových karosářských plechů se dnes ve většině případů používá zinek a někdy také hliník. Tyto prvky značnou měrou znesnadňují kvalitní svaření plechů karoserie. Nutno uvést, že ne všechny díly karoserie mají povrchovou antikorozní ochranu. Dodnes se užívá „černých“ plechů na takových místech karoserie, kde za běžných podmínek provozu koroze nevadí.

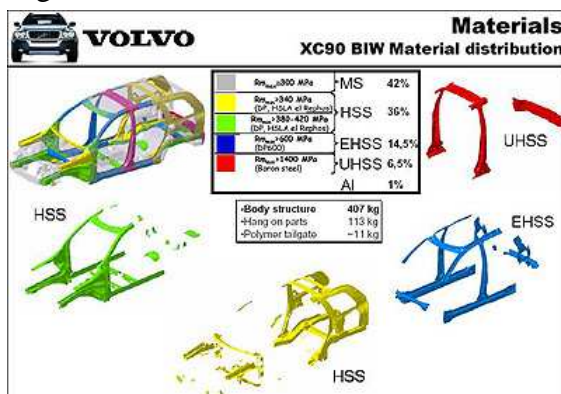
2.1 Příklady použití vysokopevných ocelí u automobilů

Plech z vysokopevných ocelí jsou v současné době nasazeny u mnoha modelů osobních vozů. Příkladem je model Mazda 2 (2008), který oproti svému předchůdci snížil hmotnost karoserie o celých 100 kg, Jeep Compass (2007) snížil hmotnost o 20 kg, dále Toyota Prius, Ford Freestyle, Ford 500, Volvo XC90 a V50, Volkswagen Touareg, Porsche Cayenne, Mercedes třídy S a další nové modely různých typů automobilů.

Volvo XC90

Automobilka Volvo zvýšila stupeň nasazení vysokopevných ocelí ve výrobě karoserií kvůli celkovému snížení hmotnosti a cenové efektivitě. Použití vysokopevných plechů je dobře patrné na karoserii modelu XC90 (obr. 3-2).

Vysokopevné oceli tvoří většinu předního i zadního skeletu vozu. Přední podélníky jsou tvářeny hydraulicky. Ze třinácti dílů, které utváří střechnu a postranice, je sedm vylisováno z dvoufázové oceli DP 600 legované borem. Vnější díl B-sloupku je konstruován z vysokopevné oceli pro efektivní snížení hmotnosti při zachování dobré tvářitelnosti. Díl střešního příčnicku v oblasti B-sloupku a rám sedadla jsou u daného modelu vozu vylisovány také z vysokopevné oceli legované borem [6].



Obr. 2-2: Rozklad karoserie Volvo XC90 [6]

Škoda Octavia II. generace

U karoserie Octavia klesl oproti předchůdci podíl zastoupení ocelí do meze kluzu $R_{p0,2}$ 180 MPa z 87 % na 22 %. Především u dílů rozhodujících o bezpečnosti posádky při bočním nárazu (B-sloupek, boční výztuhy, prahy) bylo užito ocelí s mezí kluzu nad 500 MPa (oceli DP 600, DP 800, CPW 900) – vysokopevné oceli typu Dual Phase. Největší podíl na karoserii nesou oceli s $R_{p0,2}$ 180 ÷ 300 MPa (cca 65 %), zatímco podíl ocelí s $R_{p0,2}$ více než 500 MPa vzrostl ze 2 % na 6 % [7].

2.2 Členění ocelí pro automobilový průmysl

V dostupné literatuře mají oceli pro automobilový průmysl několikero členění [6]. Jeden ze způsobů členění je podle metalurgie, resp. podle principu strukturního zpevnění:

- nízkopevné oceli (bez intersticií a měkké oceli s nízkým obsahem uhlíku),
- konvenční HSS (uhlík-manganové, kalené, vysokopevné bez intersticií, vysokopevnostní a nízkolegované oceli)
- nové typy AHSS (= Advanced High-Strength Steel, dvoufázové, s plasticitou indukovanou přetvořením, komplexně fázové a martenzitické oceli).

Druhé členění ocelí důležité hlavně pro designéry a konstruktéry dílů je podle kritéria pevnosti:

- oceli HSS (= High-Strength Steel), kde se mez kluzu pohybuje v rozmezí 210 ÷ 550 MPa a celková pevnost v tahu 270 ÷ 700 MPa,
- oceli UHSS (= Ultra-High-Strength Steels), u nichž je mez kluzu ≥ 550 MPa a pevnost v tahu ≥ 700 MPa. Tyto mezní hodnoty se v literatuře liší.

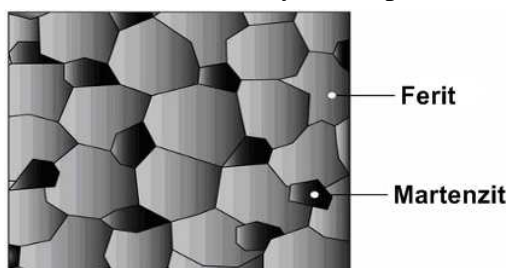
Třetí klasifikace ocelí užívaných v automobilovém průmyslu ke stavbě karoserií se řídí mechanickými vlastnostmi a parametry tváření (celková průtažnost, deformační zpevnění či míra roztlačnosti).

Různí výrobci automobilů z celého světa převzali různá kritéria specifikací těchto materiálů.

2.2.1 Členění ocelí dle principu strukturního zpevnění

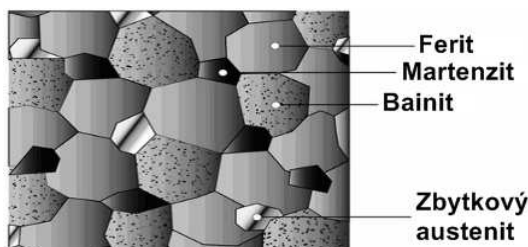
Při stavbě karoserií vozů se dnes obecně používá následující značení:

- Konvenční nízko- a vysokopevné ocelové plechy – měkké oceli (MILD), oceli bez intersticií (IF), kalené oceli (BH), izotropické oceli (IS), uhlík-manganové oceli (CM) a vysokopevné nízkolegované oceli (HSLA).
- Dvoufázové oceli (DP = Dual Phase) – DP oceli tvoří feritická matrice obsahující ostrůvky tvrdé martenzitické fáze. S rostoucím podílem objemu tvrdých frakcí druhé fáze roste také výsledná pevnost oceli.



Obr. 2-3: Ferit-martenzit (DP) [6]

- Ocel s plasticitou indukovanou přetvořením (TRIP = Transformation-Induced Plasticity) – Mikrostruktura TRIP ocelí je zbytkový (reziduální) austenit uložený v primární matrici feritu. Vedle zbytkového austenitu v minimálním objemu zastoupení 5 %, se zde vyskytují v různém množství také další fáze – martenzit a bainit.

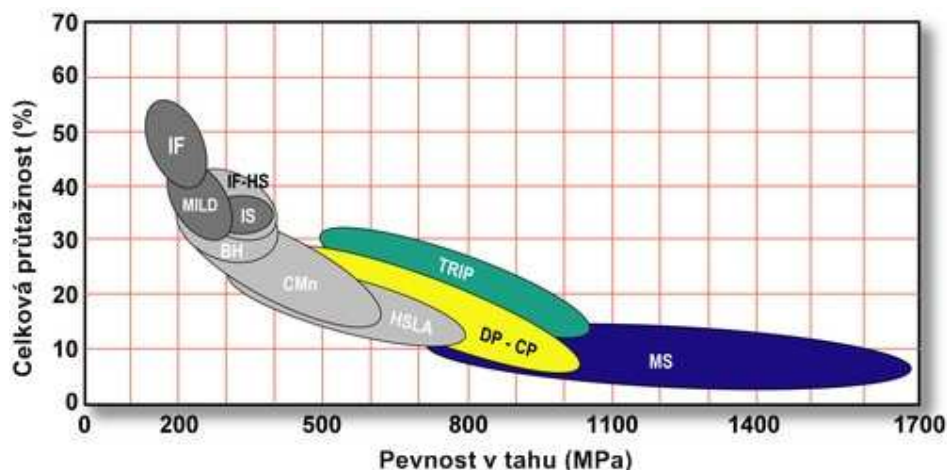


Obr. 2-4: Bainit a austenit – dodatkové fáze (TRIP) [6]

- Komplexně fázové oceli (CP = Complex Phase) – CP typizuje změnu k oceli s velmi vysokou pevností v tahu. Mikrostruktura CP oceli se skládá z malých částic martenzitu, zbytkového austenitu a perlitu ve feriticko-bainitické matrici.
- Martenzitické oceli (MS) – K vytvoření MS ocelí je zapotřebí, aby austenit, který přetrvává během válcování za tepla nebo žíhání, byl přetvořen téměř zcela na martenzit během kalení na výběhové stolici či v chladícím úseku souvislé žíhací linky. Pro MS oceli je charakteristická martenzitická matrice s obsahem malých částic feritu a/nebo bainitu. MS oceli prokazují mezi všemi vícefázovými oceli nejvyšší pevnosti v tahu. Této struktury lze také docílit dodatečným tepelným tvářením. MS struktura poskytuje nejvyšší pevnosti v tahu do 1700 MPa. MS oceli se často po zakalení popouští pro zlepšení tažnosti a jsou schopné dát adekvátní tvárnost při extrémně vysokých pevnostech.

U MS ocelí působí uhlík na zlepšení prokalitelnosti a na zpevnění martenzitu. Hořčík, křemík, chrom, molybden, bor, vanad a nikl se taktéž používají v různých kombinacích ke zlepšení prokalitelnosti.

MS oceli se vyrábí z austenitické fáze rychlým zakalením za účelem přeměny většiny austenitu na martenzit. CP oceli také následují podobný model chlazení, avšak u nich je chemické složení dáno tak, aby vzniklo méně zbytkového austenitu a vytvořili se žádané precipitáty pro zpevnění martenzitické a bainitické fáze [6].



Obr. 2-5: Diagram pevnosti různých karosářských ocelí [6]

2.3 Ocel 22MnB5

Karosářský plech z oceli 22MnB5 se na trhu nabízí pod různými obchodními značkami. Typově jsou 22MnB5 rámcově příbuzné také oceli Ultraform/Voestalpine, USIBOR 1500 / ArcelorMittal, BTR 165 / Benteler a MBW / ThyssenKrupp Steel. Podstatné podíly legujících prvků jsou uvedeny v tabulce 2-1.

C	Si	Mn	B
0,22÷0,25 %	0,25 ÷ 0,35 %	1,2 ÷ 1,4 %	0,005 %

Tab. 2-1: Legury oceli 22MnB5 [8]

Nabízené tloušťky plechů jsou v rozmezí 1,5 mm až 2,5 mm.

Oceli nelegované borem jsou složeny z horního bainitu a směsi martenzitu. Oceli legované borem jsou plně martenzitické struktury s jemnou stavbou jehlic ve srovnání s nelegovanými. Bor segregací stabilizuje hranici primárního austenitického zrna, čímž znemožňuje rekrytalizaci austenitu při vysokých teplotách a prodlužuje transformaci austenitu na ferit [42].

Pro ocel 22MnB5 je podle příslušného diagramu ARA (obr. 3-2) kritická rychlost ochlazení $v_{kh} > 25$ °C/s, počáteční martenzitická teplota $M_s \approx 390$ °C, konečná martenzitická teplota $M_f \approx 190$ °C a teplota $A_{c3} \approx 800$ °C. Hodnoty A_{c3} , M_s a M_f se dají vypočítat pomocí empirických vztahů, které jsou dostupné v literatuře. V případě, že rychlost ochlazení je příliš nízká, může dojít k vytvoření feritu, bainitu nebo perlitu ve struktuře oceli, což by snížilo celkovou pevnost a tuhost dílu [8].

Příliš vysoké rychlosti ochlazování během procesu kalení mohou způsobit nižší obsah martenzitu na úkor horního bainitu ve výsledné struktuře materiálu, protože se vzrůstající rychlostí ochlazování klesá teplota M_s . Stejný efekt na hodnotu M_s má i delší doba austenitizace. Čím vyšší je teplota, při které došlo k prvotní deformaci v nástroji, tím větší je podíl martenzitu ve výsledné struktuře materiálu [36].

Ocel 22MnB5 dosahuje pevnosti v tahu $R_m \geq 1500$ MPa při nízké tažnosti $A_{80} < 10$ %. Její nasazení ve výrobě vyžaduje modifikace a uzpůsobení technologií svařování a zkoušení vzniklých spojů. U homogenních i heterogenních (více) svarů dochází k silnému poklesu pevnosti ve stříhu při srovnání se základním materiálem. Zavádění vysokopevných ocelí přináší problémy i u tváření (vyšší řezné síly při nástřihu, větší pružení a přidržovací síly) a žádá si nová řešení vývoje, plánování výroby, řízení jakosti a výroby.

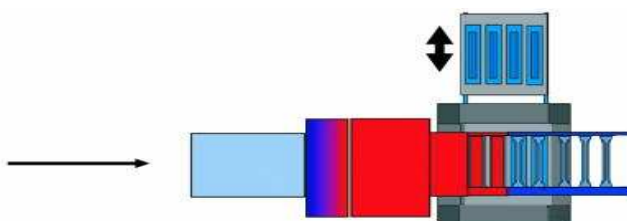
Více informací o základním materiálu vysokopevné oceli bylo zjištěno během provedených materiálových analýz (viz kapitola č. 7).

3 Technologie lisování za tepla

Na trhu karosářských plechů je v posledních cca 30ti letech trend zvyšující se poptávky po dílech s příznivým poměrem pevnosti a hmotnosti. Kalení lisováním je nově vyvinutá technologie, kterou se vyrábí komplexní díly pro automobilový průmysl, jež dosahují vysoké pevnosti při zachování nízké hmotnosti.

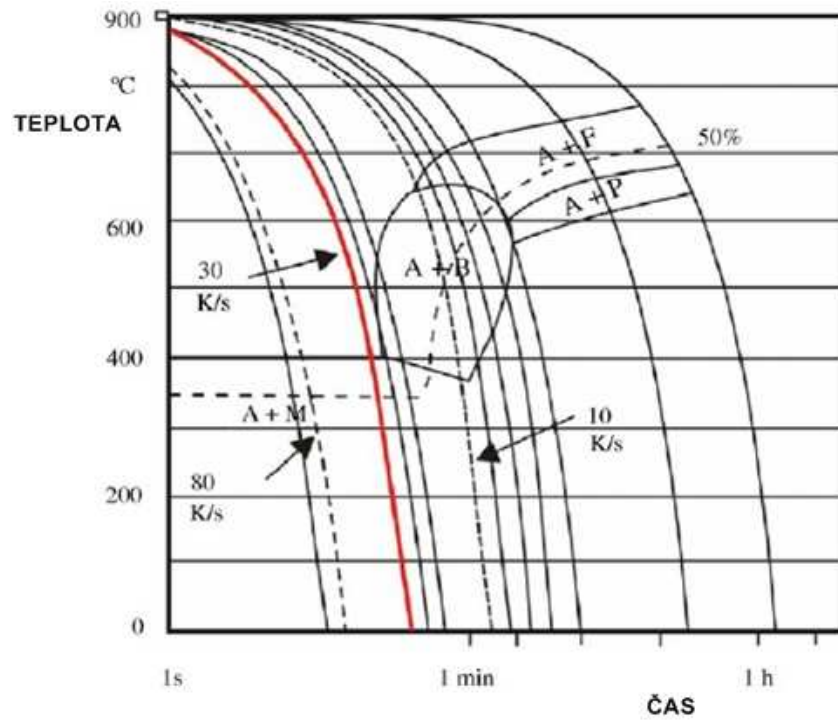
Jak už bylo uvedeno, ke spektru dílů vyšší pevnosti patří A- a B-sloupky, boční výztuhy dveří, prahy, některé díly rámu, nárazníky, příčnický podvozku a střechy a množství podélných i příčných nosníků. Plech s označením 22MnB5 z martenzitické zakalené oceli, který se používá i ve Škoda Auto a.s., nabízí možnosti výroby dílů majících znaky hlubokotažnosti a pevnosti až 1700 MPa.

Relativně nová technologie kalení lisováním má výhodu tváření za tepla a dovoluje vyrábět hlubokotažné díly bez větší zpětné pružnosti [36]. Ke zvýšení pevnosti pak dochází vytvořením martenzitických vazeb. Při kalení se teplotou nad A_{c3} změní stávající feritická struktura na austenitickou strukturu. Následně se prudkým snížením teploty na teplotu M_s přemění austenit na martenzit. Ferit má kubickou prostorově orientovanou strukturu krystalické mřížky, austenit kubickou plošně orientovanou. Austenit má proto o něco vyšší plastickou tváritelnost než ferit. Ve feritu je možné rozpustit max. 0,02 % uhlíku, v austenitu max. 2,06 % uhlíku. Při martenzitické přeměně austenitu se změní kubická plošně orientovaná mřížka na tetragonální prostorově orientovanou. Utváření martenzitu je ukončeno po dosažení teploty M_f .



Obr. 3-1: Schéma procesu kalení lisováním [8]

K procesu vytvrzení dochází v uzavřeném studeném nástroji při kontaktu studeného povrchu nástroje s horkým povrchem tvářeného dílu. Nejprve se v peci ohřívá ocelový plech až do úplné austenitizace. Následně se austenitizovaný polotovar vloží do nástroje hlubokotažného lisu. Po uzavření nástroje dojde nejprve ke tváření dílu, a poté k jeho zušlechťení. Podmínkou pro úplnou přeměnu na martenzit je, aby byl materiál dílu ochlazen takovou rychlostí, aby byla překročena mezní horní ochlazovací rychlost v_{kh} . Velikost hodnot M_s , M_f a v_{kh} je inherentně závislá od obsahu uhlíku v materiálu. To platí především pro oceli s obsahem uhlíku 0,2 ÷ 0,4 %. V tomto intervalu se snižují hodnoty M_f při rostoucím obsahu uhlíku. Pro přehled nad tvorbou martenzitu je nutné předem znát teploty A_{c3} , M_s a kritickou rychlost ochlazení v_{kh} , což nám poskytuje diagram ARA pro daný typ materiálu. Z diagramu ARA je možné vyčíst průběh přeměny austenitu a výsledné složení struktury podle rychlosti ochlazení (viz obr. 3-2).



Obr. 3-2: ARA diagram oceli USIBOR 1500 [2]

4 Technologie bodového odporového svařování

Se sériovou výrobou samonosných karoserií nastal problém při spojování ocelových výlisků, které mohou mít určitou rozměrovou nepřesnost (drobné odlišnosti v geometrii), do svařenců. Při automatizaci spojování dílů karoserií se ukázalo, že jednou z nejuhodnějších technologií je bodové odporové svařování, které umožňuje v určité míře kompenzaci některých rozměrových nepřesností při výrobě karoserií. Dokonalé svařovací přípravky a středofrekvenční svařovací kleště upevněné na robotech, v kombinaci s vyměnitelnými čepičkami svařovacích elektrod, jsou dnes již standardem, který využívají všechny automobilky [9].

Snaha o nasazení velmi pevných materiálů vede k použití materiálů s vyšším obsahem C, mnohdy až na samé hranici svařitelnosti a někdy i nad ní. Dotování takových ocelových plechů legurami (např. Cu, B [42]) vede následně k velkému zpevnění a svařování takových materiálů se stává technicky obtížné a vyžaduje dostatečné zkušenosti svářecího personálu. Často je nutné kombinovat parametry z oblasti tvrdého i měkkého svařování pro dosažení požadované jakosti bodových svarů.

Bodové odporové svařování je dnes v automobilovém průmyslu nejčastější technologií spojování používanou při stavbě karoserií a i do budoucna je vzhledem ke svým výhodám oproti jiným technologiím nezastupitelnou. Bodové odporové svary jsou nasazovány v místech, kde se nepočítá s pozdější demontáží [44].

Moderní provedení karoserie vozu vyžaduje asi 7 000 až 12 000 svařovacích bodů [26].

4.1 Princip odporového svařování

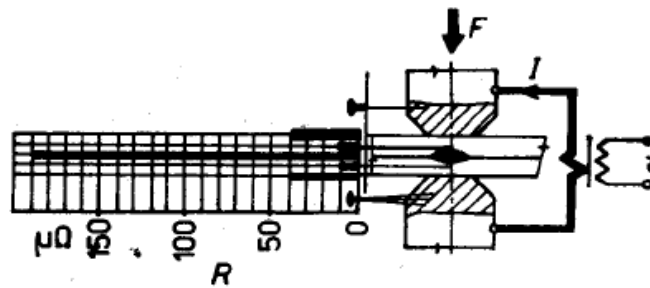
Svařový spoj se tvoří v místě ohřátém na svařovací teplotu elektrickým odporovým teplem za působení tlaku elektrod. Během procesu svařování se část materiálu dostává až do stavu natavení a v nejbližším okolí tohoto pásma do plastického stavu, nebo jen do plastického stavu při stykovém svařování tlakem. Teplo potřebné k nahřátí materiálu na svařovací teplotu (odporové teplo) vzniká průchodem proudu velké intenzity (až 100 000 A) a nízkého napětí (5 až 15 V) soustavou, kterou tvoří horní a dolní elektroda a svařované materiály [10]. Množství tepla vzniklého průchodem proudu je dáno Joulovým-Lenzovým zákonem

$$Q = R_C \cdot I^2 \cdot \tau , \quad (1)$$

kde Q je množství vzniklého tepla (J), R_C je celkový odpor soustavy (Ω), I je intenzita svařovacího proudu (A) a τ je svařovací čas – doba průchodu proudu (s).

Během odporového svařovacího procesu probíhají hlavně následující děje: vedení svařovacího proudu a vývoj Joulova-Lenzova tepla, rozvod tepla materiálem, ztráty tepla radiací, konvekcí a přestupem do měděných elektrod, deformace materiálu zahřátého na vyšší teploty.

Celkový elektrický (ohmický) odpor soustavy má několik složek: odpor elektrod, přechodové odpory ve styku elektroda – svařovaný materiál, vlastní odpor svařovaných materiálů a přechodový odpor ve styku povrchů svařovaných materiálů. Dominantní složka odporu je mezi svařovanými plechy oceli. Tam je také generováno největší teplo [31]. Každý z těchto odporů je funkcí teploty a hodnota přechodových odporů závisí výrazně na kvalitě povrchů plechů a elektrody (omačkání, nerovný povrch, znečištění a oxidace elektrody vede ke zvýšení odporu, koncentraci a zvýšení teploty v místě styku, a tím ke vzniku nežádoucích otlačků průměru elektrody na povrchu svařovaného materiálu) a na tlaku mezi elektrodami. Na obrázku 4-1 jsou uvedeny hodnoty odporu jednotlivých částí soustavy při bodovém svařování.



Obr. 4-1: Složky odporu svarového spoje při bodovém odporovém svařování [10]

Protože je teplotní pole ve svaru prostorově nehomogenní a mění se v závislosti na čase, je každý odpor funkcí času a místa a časově proměnný je i celkový odpor svarového spoje mezi elektrodami. Nejpodstatnější složku odporu tvoří na začátku svařovacího procesu přechodový odpor ve styku svařovaných materiálů, který rychlým ohřevem materiálu v těchto místech rychle zaniká. Po jeho zániku je další průběh svařovacího procesu udržován v chodu pomocí objemových zdrojů tvořených odporem zahřívaného materiálu, na kterých se vyvíjí převážná část tepla [9]. Vlivem počátečního velkého přechodového odporu a dalšího zvyšování teploty uvedeným postupem dojde v přechodové oblasti k rychlému ohřátí na svařovací teplotu a za působení tlaku ke vzniku bodového svaru.

4.2 Zkoušení jakosti bodových odporových svarů

Pro testování jakosti bodových svarů existuje několik vhodných metod zkoušení, které lze rozdělit na metody destrukční a nedestrukční. Četnost zkoušek je stanovena výrobou a oddělením plánování svařoven a odsouhlasena je oddělením kvality [11].

Mezi destrukční metody zkoušení patří zkouška sekáčem, zkouška loupáním a odvíjením na trn, tahová zkouška stříhem a zkouška vrcholového tahu na trhacím stroji a metalografická zkouška. V této práci byla pro hodnocení jakosti bodových svarů použita právě trhací zkouška stříhem a metalografická zkouška. Výsledky těchto zkoušek jsou prezentovány v kapitole materiálových analýz (kapitola č. 7).

Z nedestrukčních metod zkoušení (NDT) lze pro testování jakosti svarových bodů použít pohledovou zkoušku, klínovou zkoušku, ultrazvukovou zkoušku nebo tzv. adaptivní vizualizaci procesu (stoprocentní online kontrola procesu založená na korelaci procesních parametrů a geometrie bodových svarů).

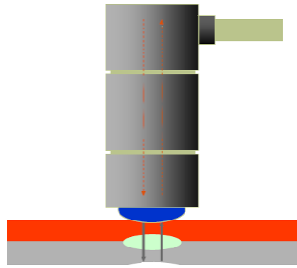
Ze zmíněných metod je možné pro zajištění procesu použít jednu metodu, nebo v případě NDT i více metod zkoušení najednou.

4.2.1 NDT ultrazvukové zkoušky

Ultrazvuková zkouška je vhodná pro sériové zkoušení bodových svarů dílů z vysokopevné oceli, protože u daného typu materiálu není možné užití klínové zkoušky sekáčem z důvodu praskání materiálu vysokopevných dílů.

Principem ultrazvukové zkoušky odporových bodových svarů je analýza ztracené energie během několikanásobného průchodu podélné ultrazvukové vlny materiálem svaru.

Standardní analýza je založená na vyhodnocení několika ozvěn. Útlum mezi dvěma echy (ozvěnami signálu) je odvislý od mikrostruktury svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Rozhraní různých struktur evokuje rozptyl signálu a útlum ech. Výskyt „mezi-ech“ je charakteristický pro vady typu kavit (vzduchových dutin nebo děr) uvnitř svarového kovu nebo malé svarové čocky (ve vztahu k průměru použité sondy).



Obr. 4-2: Princip testování bodových svarů ultrazvukem [12]

Podle obrazu získaných ech rozlišujeme několik typů vad u bodových odporových svarů. Dobrý svar má adekvátní útlum díky přeměněné mikrostruktuře svarového kovu. Oproti tomu spoj „studený“ takový útlum nemá a jeho echa jsou četná, s malým útlumem [12]. Malá svarová čočka nebo kavity uvnitř svarového kovu se poznají na základě přítomnosti zobrazených mezi-ech. Nespojené plechy (bez jakéhokoliv spojení) vyvodí hustě zobrazená echa (odezva pouze z prvního plechu menší tloušťky než by byl celý spoj).

5 Příprava experimentu

Cílem experimentu bylo zjištění závislostí mezi parametry bodového odporového svařování a účinku jejich nastavení na výslednou pevnost spoje vyhotoveného za okolních podmínek srovnatelných s výrobou karoserie vozu v automobilovém závodě.

Při vlastním experimentu byly bodově svařeny vzorky ze dvou různých materiálů – ocelové plechy odlišného chemického složení, diametrálně rozdílných mechanických vlastností, různých tloušťek a v neposlední řadě s odlišnou povrchovou úpravou. Jednalo se o heterogenní spoje mezi materiály vysokopevné oceli (MS) a nízkopevné feritické standardně používané karosářské oceli. Příklad chemického složení materiálu vysokopevné oceli je uveden v tabulce 5-1. Normativní údaje chemického složení nízkopevné oceli jsou uvedeny v tabulce 5-2.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	B
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0,25	1,27	0,26	0,015	0,001	0,14	0,01	0,01	0,035	0,02	0,0020

Tab. 5-1: Chemické složení materiálu BTR165 výrobní šarže 34/08

C	Mn	Si	P	S
%	%	%	%	%
≤ 0,08	≤ 0,80	≤ 0,50	≤ 0,10	≤ 0,025

Tab. 5-2: Chemické složení materiálu nízkopevné oceli (dle EN 10292, HX260PD)

Vedle toho byly svařeny i homogenní svary vzorků z vysokopevné oceli a analyzován byl i základní materiál této oceli.

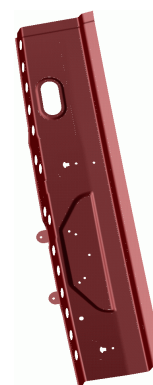
5.1 Vyhotovení vzorků

K vyhotovení vzorků, na kterých byl proveden experiment, byly získány díly z materiálu vysokopevné borem legované oceli martenzitické struktury, které jsou vyráběny technologií lisování za tepla. Jako protikusy ke svařování byly použity nízkopevné kontinuálně žárově pozinkované plechy vnitřního horního rámu karoserie. Svařovaná sestava je simulací skutečné sestavy konstrukce vozu.

Rozměry a místa odběru vzorků byly determinovány designem dílů B-sloupku. Pokud měl proces svařování vzorků odpovídat reálnému procesu bodového svařování ve výrobě automobilového závodu, musely být vzorky odebrány ze stojny (boční příruba) B-sloupku, tak jak je to znázorněno na snímku 5-1 a 5-2.

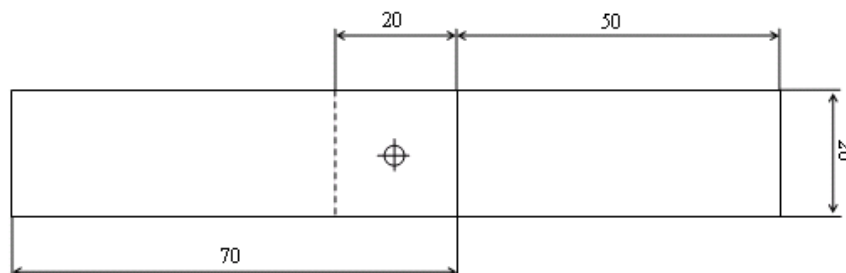


Obr. 5-1: Díly B-sloupku (horní – USIBOR 1500, dolní – BTR165)



Obr. 5-2: Díl protikusu (vnitřní horní díl rámu)

Protože počet dodaných dílů byl úzce omezen, bylo nutné volit rozměry vzorků tak, aby jejich množství bylo pro účel experimentu dostačující a přitom vlastnosti svarů odpovídaly reálným svarům karoserie (vliv rychlosti ochlazování ap.). Šířka vzorku byla přitom vymezena šířkou stojny podle daného designu dílu. Stojny mají takovou šířku, aby na ně mohly dosednout elektrody svářecích kleští a aby přitom nedocházelo během svařování k rozstříkům jádra svarové čocky do prostoru. Svařený vzorek (svařenec) se skládal ze dvou obdélníkových kusů plechu různého materiálu. Kusy plechu měly délku 70 mm a šířku 20 mm, přičemž byly přeplátovány v délce 20 mm. Tloušťka vzorků byla různá podle dílu, ze kterého byl kus získán.



Obr. 5-3: Rozměry svařeného vzorku (mm)

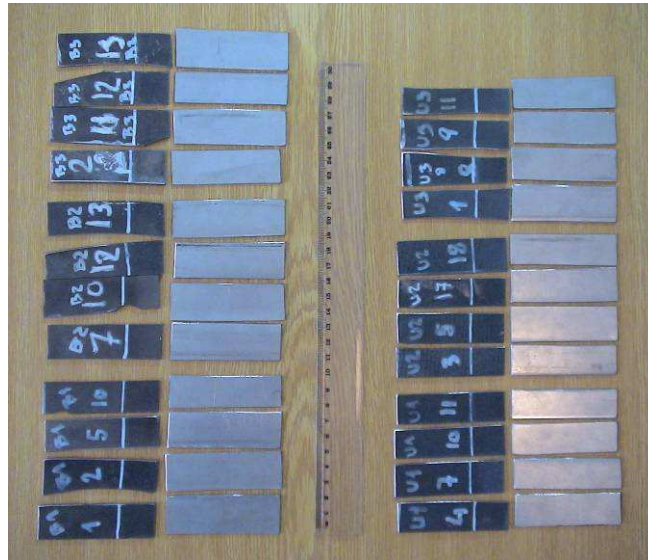
Použitý materiál vysokopevných plechů byl pro účely experimentu zvolen dvojího typu – od dvou různých dodavatelů. Materiál protikusů byl unifikovaný (jen jeden druh materiálu), aby bylo možné při svařování srovnat rozdílné vlastnosti obou vysokopevných materiálů.

Jelikož jsou díly B-sloupku dodávanými díly a v provozu automobilového závodu se zpravidla přímo nelisují, vznikl požadavek srovnání variability výroby u dodavatele a její vliv na kvalitu svarů. Z tohoto důvodu byly poptány od každého dodavatele celkem tři díly B-sloupku, každý z jiné výrobní šarže. Celkem bylo tedy pro tento experiment poptáno šest dílů B-sloupku.

Variabilita výroby byla posuzována nejen mezi výrobními šaržemi, ale také po profilu dílu B-sloupku, resp. vzorky byly odebrány nahodile z různých pozic na stojnách dílů.

Vzorky byly svařeny za různých parametrů. Některé byly určeny pro návrh experimentu metodou DOE, jiné pro výbrusy a metalografické analýzy pomocí světelné a elektronové mikroskopie.

Z dodaných dílů byly nejdříve pásovou pilou odděleny stojny a následně vyřezány kusy vzorků výše uvedených rozměrů se zřetelem na nežádoucí tepelné ovlivnění vnitřní struktury materiálu. Tyto přípravné práce pro svařování byly uskutečněny v laboratořích Dopravní fakulty Jana Pernera při Univerzitě Pardubice.



Obr. 5-4: Nařezané vzorky ke svařování

5.2 Použitá zařízení

Nařezané vzorky byly bodově svařeny. Použitá svářečka byla pneumatická o porovnávacím výkonu 20 kVA typu BP 20.12. Elektrody byly při procesu svařování vodou chlazené, tak jak je tomu i v provozu svařoven ve výrobě karoserií. Průměr použitých elektrod byl zvolen v souladu s platnými normami koncernu Volkswagen (dle tloušťek svařovaných plechů). Svářečka dovozovala regulaci parametrů proudu, času a svářecí síly, přičemž bylo možné vyvinout maximální svářecí proud 11,3 kA a maximální svářecí sílu 6,3 kN, což bylo pro vyhotovení vzorků dostačující. Vzorky byly svařeny ručně svářečem s dlouholetou praxí ve Svářečské škole v Lázních Bohdaneč.



Obr. 5-5: Svařené vzorky

Nejdůležitějším kritériem kvality svarů je jejich pevnost [13], a proto byla velká část svařených vzorků podrobena technologické tahové zkoušce ve stříhu se zřetelem na normy VW 011 05 a DIN EN ISO 14 273. Při této zkoušce byl simulován reálný směr namáhání spoje a roztrženo bylo 27 vzorků určených pro zkoumání vlivu parametrů svařování na pevnost spoje metodou DOE.



Obr. 5-6: Roztržené vzorky

K tahovým zkouškám byl použit 50 kN trhací stroj ZDP 50. Při trhání svařeného vzorku došlo ve všech případech k vytržení (resp. vylomení) svarového bodu z méně pevného ocelového plechu. Svarový bod zůstal celý na vysokopevném plechu a v nízkopevném plechu zůstala díra nebo jamka po obvodu svarové čochky. U takto vytrženého bodu byl určen průměr (d_p), jakožto průměrná hodnota ze dvou navzájem kolmých směrů měření posuvným měřítkem dle normy VW 011 05. Ve výrobě slouží veličina průměru bodu k nastavení požadované velikosti svarové čochky.

Specificky roztržené svarové body byly zkoumány fraktograficky elektronovým mikroskopem za účelem zjištění zdroje lomu a jeho příčin. Použitým mikroskopem byl elektronový rastrovací mikroskop Tescan Vega TS 5130 SB s energiově disperzním rentgenovým spektrometrem Quantax 200 od firmy Bruker.

Menší část svařených vzorků nebyla podrobena tahové zkoušce, nýbrž metalografické analýze. Příprava svařených vzorků pro metalografii spočívala v jemném řezu středem svarového bodu vodou chlazeným kotoučem, zalisování vzniklé poloviny svarového bodu do bakelitu a následném vybroušení, resp. vyleštění plochy řezu. Broušení bylo provedeno na brusných papírech a leštění na leštících plátnech v několika krocích podle zrnitosti od nejhrubších k nejjemnějším. Výbrus byl následně naleptán nitalem – cca 3%-ní kyselinou dusičnou (HNO_3) pro zobrazení vzniklých struktur uvnitř svaru. Leptání muselo proběhnout ve dvou fázích vlivem rozdílné korozní odolnosti obou zúčastněných materiálů oceli.



Obr. 5-7: Metalografické vzorky

Metalografické vzorky byly zkoumány světelnou a elektronovou mikroskopií. Byla měřena geometrie svarového bodu a svarové čochky, pozorován vliv teplotního cyklu technologie bodového odporového svařování na strukturu svarového kovu (čochky) a tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu. Byly zkoumány příčiny nalezených vad a byly určeny podíly vlivů jednotlivých parametrů svařování na charakter těchto vad.

Pro světelnou mikroskopii byl použit invertovaný mikroskop Zeiss Neophot 32 s kamerou připojenou na PC a stereomikroskop Olympus STM 701.

Mikrotvrdomost podle Vickerse byla měřena v liniích napříč bodovými svary tvrdoměrem Zwick/Roell ZHV 10.

Veškeré přípravné práce metalografie, práce na mikroskopech i měření mikrotvrdomosti byly uskutečněny v materiálových laboratořích DFJP v Pardubicích a v České Třebové.

Při vyhodnocení naměřených experimentálních dat byla použita řada software. Získaná data bylo nutné vyhodnotit statisticky. K tomu posloužil software Statsoft Statistica. K plánování a návrhu experimentu (DOE) byl použit software Minitab. Pro materiálové analýzy byl použit software AnalySIS Docu, Control Web 2000, Mouselink a ESPRIT. Šetření rizikovitosti vad (FMEA) bylo vyhodnoceno v software Palstat CAQ. V neposlední řadě byl pro běžné výpočty a tvorbu grafů velice užitečným software MS Excel.

5.3 Použité standardy

Kritéria pro hodnocení jakosti bodových odporových svarů byla čerpána především z platných norem koncernu Volkswagen, které pro účely této práce poskytla společnost Škoda Auto a.s.

Klíčová byla především norma VW 011 05 „Odporové bodové svařování – konstrukce, výpočty, zajištění procesu pro nepovrstvené a povrstvené plechy“ [13] a jí podružný zkušební předpis PV 6702 „Bodové svarové spoje – pevnostní zkoušky ocelových materiálů“ [10]. Dále byly pro vyhodnocování jakosti svarů použity normy: VW 50060-1 „Kaltgewalzte Dualphasenstähle“ [14], VW 50060-2 „Warmgewalzte Dualphasenstähle“ [15], VW 50060-3 „Kaltgewalzte Komplexphasenstähle“ [16] a VW 50060-4 „Warmgewalzte Komplex- und Martensitphasenstähle“ [17].

Koncernové normy VW jsou ve svých kvalitativních kritériích přísnější než jim nadřazené normy ISO kvůli speciálním požadavkům na zvýšenou kvalitu a bezpečnost výrobků pro automobilový průmysl.

Při plánování experimentu a při jeho vyhodnocení byl brán zřetel i na normy: DIN EN ISO 14 273 „Měření vzorků a provedení pro stříhovou tahovou zkoušku na svarových spojích provedených odporovým, švovým a bradavkovým svařováním s raženými bradavkami“ [18], DIN EN 10149 „Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen“ (části 1, 2 a 3) [19] a dokumentaci TL 4225 „Legierter Vergütungsstahl 22MnB5 unbeschichtet oder vorbeschichtet“ [20].

Norma VDA 4 [29] popisuje způsob použití metod DOE a FMEA v etapách výroby automobilu.

6 Aplikace metody DOE

DOE (Design of Experiments / metoda návrhu experimentu) je experimentální strategie, při které jsou najednou studovány účinky několika faktorů prostřednictvím jejich testování na různých úrovních [21].

Při experimentu jsou úmyslně měněny jedna nebo více procesních proměnných (faktory), aby bylo možné pozorovat význam vlivu těchto změn na jednu nebo více výsledných proměnných (odezvu). Návrh experimentu je efektivním postupem plánování experimentů, protože analýzou obdržených dat (ANOVA) můžeme získat platné a objektivní závěry.

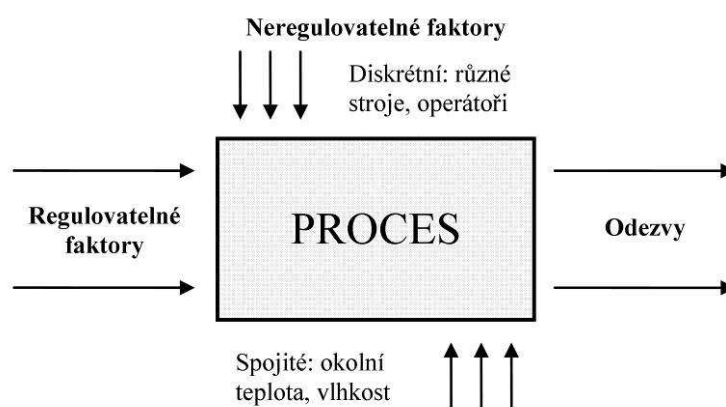
Výchozí statistická teorie DOE je založena na konceptu procesního modelování.

Metoda návrhu experimentu je doporučována standardy pro dodavatele automobilového průmyslu ISO/TS 16949 [22] a QS 9000.

Procesní modely

Obecně je vždy třeba začít s procesním modelem černé skříňky s několika diskrétními a spojitými vstupními faktory, které lze regulovat (experimentátor je může cílevědomě měnit), a s jednou nebo vícero měřitelnými odezvami. Výstupní odezvy jsou předpokládány spojitého charakteru. Experimentální data jsou použita pro odvození empirického modelu interakce výstupů a vstupů.

Běžně musí experiment zahrnout také neregulovatelné faktory, které mohou být diskrétní (např. různé stroje a operátoři) nebo spojitý (např. okolní teplota nebo vlhkost). Tuto skutečnost ilustruje obrázek 6-1.



Obr. 6-1: Schéma procesního modelu

Nejčastější modely uzpůsobené empirickým datům mají buď lineární nebo kvadratickou formu.

Použití DOE

Zde je uvedeno sedm alternativ použití DOE navozujících situace, v nichž může být efektivně využita metoda návrhu experimentu:

- výběr z alternativ (srovnávací experiment),
- zjištění klíčových faktorů ovlivňujících odezvu,
- modelování plochy odezvy (Response Surface)
 - snížení variability,
 - dosažení maximální, minimální nebo nominální hodnoty odezvy,

- dosažení robustnosti procesu (navzdory vlivům neregulovatelných faktorů),
 - hledání vhodného typu odezvy,
- regresní modelování.

Robustní návrh

Variabilita výstupní odezvy (např. charakteristiky jakosti) je zapříčiněna regulovatelnými i neregulovatelnými (šumovými) faktory. Za pomoci metody DOE je možné identifikovat faktory, které mají vliv na odezvu a tyto faktory lze nastavit (regulovat) tak, že se zlepší konzistence provedení experimentu. Avšak největší měrou se na variabilitě procesu podílejí tzv. šumové faktory. Minimalizaci vlivu šumových faktorů je možné provést správným nastavením regulovatelných faktorů. Požadovaný návrh experimentu tedy není daný výběrem hodnot regulovatelných faktorů za ideálních či standardních podmínek, nýbrž nalezením takového návrhu, který dává kompaktní provedení při vystavení procesu vlivům šumových faktorů. Při robustním návrhu není snaha o odstranění příčiny variability, nýbrž vliv šumových faktorů je snížen tak, že nastavení regulovatelných faktorů je vůči šumovým vlivům necitlivé.

Koncový zákazník požaduje produkt, který je robustní vůči variabilitě podmínek užívání, vůči stárnutí a opotřebení. Nedostatek robustnosti způsobuje degradaci funkce výrobku, čímž vzniká velká finanční ztráta z kvality potom, co je výrobek dán do užívání.

6.1 Metodika vlastního návrhu experimentu

6.1.1 Definice a charakteristika problému

Cílem experimentu je zjištění podílu vlivu jednotlivých regulovatelných faktorů, tj. svářečského proudu, času svařování a přítláčné síly elektrod, které jsou v praxi označovány jako parametry, na proces bodového odporového svařování karosářských ocelových plechů různých vlastností. Je třeba zjistit, jak velký účinek mají dílčí regulovatelné faktory na pevnost bodového svaru. Pro sériovou výrobu karoserií je nezbytné znát i robustnost nastavení daného procesu svařování a co nejvíce tak omezit vliv šumových faktorů, které přicházejí v úvahu při operacích svařování karosářských dílů z vysokopevné oceli.

Účinek každého z regulovatelných faktorů ale není u technologie bodového odporového svařování nezávislý. Změna v nastavení jednoho z faktorů současně vyžaduje úpravu a seřízení jiných faktorů. To je při experimentu nutno vzít do úvahy.

Variabilita výstupní charakteristiky procesu vlivem šumových faktorů je při stavbě karoserií automobilů nežádoucí a zásadně ovlivňuje spolehlivost celé konstrukce. Svařování v sériové výrobě karoserií je natolik komplexní, obsáhlou a různorodou problematikou, že není snadné zajistit stabilní kvalitu jednotlivých procesních výstupů.

Vysokopevné ocelové plechy jsou problematictější, co se týče svařitelnosti, oproti běžně používaným nízkopevným nízkouhlíkovým (feritickým) ocelovým plechům. Z toho důvodu je třeba dokonale pochopit chování těchto vysokopevných ocelí během procesu bodového odporového svařování.

Úkolem vlastního experimentu podle metody DOE je posoudit účinky jednotlivých faktorů na kvalitu heterogenních bodových svarů mezi díly B-sloupku z vysokopevné borem legované oceli a referenčním dílem protikusů vnitřního horního rámu z nízkouhlíkové oceli tloušťky 1,5 mm, který se při stavbě karoserií standardně používá a jehož materiál má mez pevnosti podstatně nižší než materiál dílu B-sloupku. Tyto heterogenní bodové svary mají na spolehlivost konstrukce velký dopad, protože jim typově odpovídá většina bodových svarů, kterými jsou spojovány díly B-sloupku. Představují tak pevnostní předěl mezi skeletem

z materiálu vysokopevné oceli a zbytkem karoserie z materiálu běžné nízkopevné snadno svařitelné oceli. Heterogenní materiály jsou rozdílné ve svých fyzikálních, chemických a mechanických vlastnostech [44].

6.1.2 Výběr faktorů a jejich úrovní

Faktory jsou nezávislé návrhové proměnné, které ovlivňují odezvu (např. charakteristiku jakosti). Při metodě návrhu experimentu se faktory symbolicky označují velkými písmeny (A, B, C atd.) a jejich úrovně se značí numericky dolními indexy – např. A_1 (faktor A na první úrovni), B_2 (faktor B na druhé úrovni) ap. Faktory mohou být spojité nebo diskrétní. U spojitých faktorů je možné ve vymezeném pracovním rozsahu nastavit úrovně na libovolnou hodnotu. Diskrétní faktory mají své úrovně nastaveny na konkrétní hodnoty nebo jejich status. Spojité regulovatelné faktory v této práci představují parametry, které jsou upravovány na svářecím stroji u procesu odporového bodového svařování při stavbě karoserií, tj. svářecí proud, čas svařování a přitlačná síla elektrod. Jejich mezní hodnoty (úrovně faktorů) vhodného pracovního rozsahu byly pro potřeby experimentu zjištěny z provozu reálné sériové výroby karoserií a byly ověřeny při iniciačním experimentu testování parametrů. Diskrétním zástupcem mezi použitými faktory experimentu byl druh materiálu ke svařování, resp. dodavatel dílu B-sloupku z vysokopevné oceli.

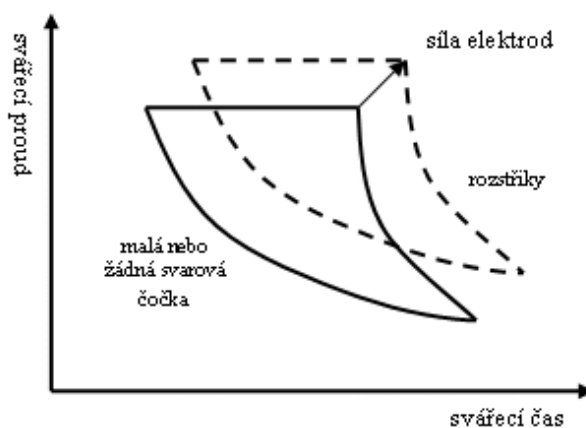
Pro studium vlivu faktorů na odezvu je nutné naplánovat experiment se dvěma nebo více úrovněmi faktorů. Počet úrovní je roven počtu variant faktoru, které je třeba zkoumat. Ve většině případů plánování experimentu jsou voleny pro každý faktor dvě úrovně. Počet aplikovaných faktorů a jejich úrovní přímo určuje rozsah experimentu, tj. počet jednotlivých pokusů/běhů experimentu, a tím i jeho pracnost, časovou a finanční náročnost. Rozsah vlastního experimentu byl vymezen množstvím vzorků, které bylo možné z celku dodaných dílů vyrobit.

Regulovatelné faktory experimentu

Regulovatelný faktor je návrhová proměnná, kterou je možné řídit, ovlivňuje odezvu a je začleněna do experimentu. Hodnotu regulovatelného faktoru je možné a zároveň žádoucí nastavit a udržovat.

Určení regulovatelných faktorů, které mají podstatný vliv na charakteristiku jakosti bodových odporových svarů, bylo realizováno na základě zkušeností z provozu sériové výroby karoserií. Hlavními regulovatelnými faktory jsou seřizované parametry svářecího stroje, tj. svářecí proud I_{sv} (kA), čas svařování T_{sv} (per), přitlačná síla elektrod F_{sv} (kN) a faktor svařovaného dílu B-sloupku z vysokopevné oceli od dvou různých dodavatelů.

Pracovní rozsah faktorů proudu, času a síly je ilustrován grafem 6-1.



Graf 6-1: Závislost faktorů proudu, času a síly elektrod [23]

Z uvedeného je patrné, že čím je nižší čas svařování (tvrdší svářecí režim), tím je vhodný rozsah parametru proudu širší. Pokud je při svařování vyvinuta vyšší síla elektrod, celá pracovní oblast proudu a času se posouvá k vyšším hodnotám.

Procesní parametry by měly být nastaveny tak, aby při destrukční tahové zkoušce došlo k lomu spoje mimo oblast svarové čočky [39].

Svářecí proud

Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících mechanické vlastnosti bodových odporových svarů je svářecí proud. Se vzrůstajícím proudem roste míra ovlivnění vnitřní struktury i vnějšího projevu svaru.

Množství proudu je řízeno dvěma činiteli – spínač odbočky transformátoru determinuje maximální množství dostupného proudu a regulátor určuje procento proudu, které je použito k výrobě svaru. Svářecí proud by měl být nastavován pokud možno co nejnižší [24, 25]. Při velkých proudech dochází mimo jiné i k rozstříkům jádra svarové čočky, což snižuje celkovou pevnost svarových bodů.

Při návrhu experimentu byl faktor proudu označen písmenem A a byly mu dány dvě úrovně: $A_1 = 7,4$ kA; $A_2 = 8,4$ kA. Rozsah těchto dvou úrovní vymezuje kvalitativně vyhovující bodový svar při standardním nastavení parametrů času a síly elektrod. Tyto hodnoty úrovní byly uznány za vhodné ze strany technologů sériové výroby karoserií a potvrzeny ověřovacím testem iniciačního experimentu před započítáním svařování jednotlivých běhů experimentu.

Označení bodu	I_{sv} (kA)	T_{sv} (per)	F_{sv} (kN)
3	6,4	17	3
4	7,4	17	3
5	9,3	17	3
6	8,4	17	3

Tab. 6-1: Iniciační test úrovní faktoru proudu – nastavení parametrů

Bod č. 3 působil jako poddimenzovaný – s malou svarovou čočkou mimo výrobní tolerance dané normou. Hodnota proudu byla aplikována u tohoto bodu příliš nízká. Naproti tomu bod s označením 5 se jevil jako předimenzovaný, protože u něj došlo k velkému vtisku a dokonce k rozstříku materiálu vysokopevného plechu, což je nežádoucím efektem. Od pohledu bylo patrné, že velikost svarového bodu roste s hodnotou proudu. Body 4 a 6 byly vizuálně v pořádku a lze tedy převzít jejich nastavení pro návrh vlastního experimentu.

Čas svařování

Na svářecím stroji je možné nastavit celkem pět druhů času dle posloupnosti jejich aplikace při svařování. Jsou to čas dosednutí elektrod (T_1), čas nárůstu jejich síly až na svářecí sílu (T_2), čas svařování ($T_3=T_{sv}$), čas kování (T_4) a čas přestávky (T_5). Pro kvalitu svarového bodu je nejdůležitějším čas svařování, který jediný byl při experimentu účelně řízen. Ostatní časy byly konstantně nastaveny na hodnoty $T_1 = 19$ per, $T_2 = 15$ per, $T_4 = 3$ per (1 perioda = 20 ms).

Rostoucí čas svařování způsobuje velkou tepelnou energii a zvětšení svarové čočky [26]. Když čas svařování trvá příliš dlouho, vzroste množství roztaveného svarového kovu natolik, že dojde k jeho rozstříku do okolí [24, 25].

Při návrhu vlastního experimentu byl čas svařování označen jako faktor B. Dvě úrovně času svařování byly stanoveny na hodnoty: $B_1 = 15$ per; $B_2 = 22$ per. Pracovní rozsah faktoru

času vymezený jeho úrovněmi se opět opíral o iniciační test, který předcházel celému experimentu.

Označení bodu	I_{sv} (kA)	T_{sv} (per)	F_{sv} (kN)
7	7,9	10	3
8	7,9	15	3
9	7,9	20	3
10	7,9	25	3

Tab. 6-2: Iniciační test úrovní faktoru času – nastavení parametrů

Na svarových bodech 7 až 10 bylo možné pozorovat, že s rostoucím časem roste velikost svarového bodu a šířka tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu kolem natavené oblasti svarového kovu. Všechny body vypadaly vizuálně jako kvalitativně vyhovující. Nicméně, po zvážení byla pro vlastní experiment horní úroveň času svařování o 2 periody zvýšena oproti praxi výroby karoserií.

Přítlačná síla elektrod

Účelem faktoru síly je, aby došlo vždy k dostatečnému sevření spojovaných dílů karoserií během procesu svařování a aby přitom nedocházelo k rozstříkům tavné lázně spoje do okolí. Při zvyšující se síle elektrod se snižuje množství dodané tepelné energie vlivem menších přechodových odporů mezi spojovanými materiály [31]. To znamená, že vyšší síla vyžaduje vyšší svářecí proud. Problém je, že velikost styčné plochy kontaktu elektrod s plechy se během svařování zvětšuje. Pro zachování stejných podmínek musí být postupně během procesu svařování síla elektrod navyšována. Jelikož je ale velmi obtížné měnit sílu ve stejném poměru, v jakém se mění styčné plochy kontaktu, bývá od začátku nastavena průměrná hodnota síly.

Některé prameny literatury uvádí, že právě přítlačná síla elektrod je pro svažitelnost bodového svaru nejdůležitějším faktorem [25, 38, 47].

Pro potřeby experimentu byl faktor síly elektrod označen písmenem C. Tento faktor byl posuzován na dvou úrovních: $C_1 = 2,2$ kN; $C_2 = 4,0$ kN.

Při iniciačním testu parametru přítlačné síly elektrod byly použity parametry uvedené v tab. 6-3:

Označení bodu	I_{sv} (kA)	T_{sv} (per)	F_{sv} (kN)
11	7,9	17	1,8
12	7,9	17	1,0
13	7,9	17	2,5
14	7,9	17	4,0
15	7,9	17	5,0

Tab. 6-3: Iniciační test úrovní faktoru síly elektrod – nastavení parametrů

Při vizuální kontrole nebyly mezi svařenými body zaznamenány žádné směrodatné vnější rozdíly. Úrovně faktoru síly elektrod tedy byly pro experiment určeny na základě zkušenosti svářecích technologů z praxe.

Dodavatel

Pro výrobu karoserií automobilů značky Škoda v současnosti dodávají díly B-sloupku z vysokopevné borem legované oceli firmy ArcelorMittal a Benteler. Oba dodavatelé dobře zvládají technologii lisování za tepla a jejich díly mají velmi podobné až identické vlastnosti. Materiály se významně neliší v chemickém složení ani ve vnitřní struktuře. Faktor dodavatele však v sobě zahrnuje rozdíly materiálů v povrchové úpravě a tloušťce plechu. Zatímco materiál BTR165 od firmy Benteler nemá mimo moření žádnou povrchovou úpravu a jeho tloušťka je 2,0 mm, materiál USIBOR 1500 od firmy ArcelorMittal nese povrchovou vrstvu na bázi Al-Si (o tloušťce cca 20 μm) a jeho celková tloušťka je 1,8 mm. Faktor dodavatele představuje soubor všech těchto rozdílů použitého materiálu během experimentu.

Povrchová vrstva dílu ve většině případů znamená dílčí obtíže při svařování. Speciální druh pokovení materiálu USIBOR 1500 má ale na jakost bodových svarů podle dokumentace dodavatele působit naopak pozitivně [27].

Diskrétní faktor dodavatele byl v experimentu označen písmenem D a jeho úrovně jsou jednoznačně dány: $D_1 = \text{BTR}$; $D_2 = \text{USI}$.

Šumové faktory experimentu

Šumové (neregulovatelné) faktory negativně ovlivňují odezvu a narušují funkce výstupu. Šumový faktor nelze v provozu nastavit ani udržovat na požadované hodnotě, ale je to možné provádět během řízeného experimentu.

Při testování se šumové faktory zpravidla nastavují na 2 úrovně. Hodnoty těchto úrovní jsou extrémními možnostmi jejich aplikace (nejvíce a nejméně).

Ve vlastním experimentu nebyly šumové faktory zkoumány individuálně, nýbrž souborově. Jednotlivé neregulovatelné faktory nebyly konkrétně identifikovány a jejich vliv nebyl kvantifikován přímo. Šumové faktory byly vzaty jako celek, který náhodně ovlivňuje charakteristiku jakosti (odezvu) bodového svaru. Šumové faktory byly zahrnuty do experimentu způsobem opakování tak, že každý jednotlivý pokus experimentu (každá kombinace regulovatelných faktorů) byl proveden celkem 3-krát.

Variabilita vlastností materiálu mezi výrobními šaržemi

V podmínkách hromadné výroby je variabilita v technologických procesech nevyhnutelná. Cílem každé výroby je stabilita. Jednotlivé výrobní šarže (dávky) se od sebe mohou více či méně odlišovat.

Šumový faktor variability základního materiálu dílu B-sloupku však může způsobit velké problémy při svařování, a tím může ovlivnit výslednou tuhost karoserie a bezpečnost lidí posádky automobilu při jízdě. Na změnu vlastností materiálu je třeba při stavbě karoserií ihned reagovat seřízením parametrů svařování tak, aby nebyla ohrožena výsledná charakteristika jakosti svarů – např. pevnost.

Variabilitu vlastností materiálu u dílů od dodavatele je nutné sledovat při vstupních kontrolách.

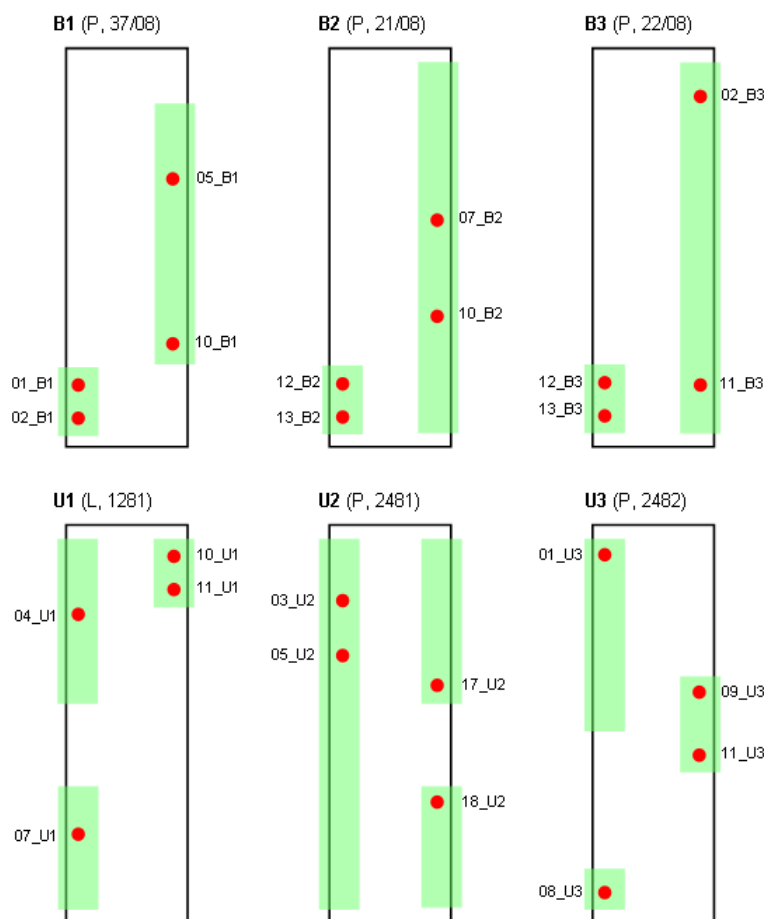
Pro zapojení vlivu tohoto faktoru do experimentu bylo poptáno několik kusů dílu B-sloupku od materiálu BTR165 a stejně tak od materiálu USIBOR 1500. Každý kus dílu přitom náležel k jiné výrobní šarži dodavatele. V každém ze tří opakování pokusu byl použit vzorek z jiné šarže.

Rozdíly mezi dodanými výrobními šaržemi bylo možné pozorovat například z protokolu objednané analýzy chemického složení materiálu vysokopevné oceli – viz přepis protokolu v příloze B.

Variabilita vlastností materiálu po profilu

Variabilita vlastností materiálu po profilu dílu je dalším šumovým faktorem, který může mít vliv na výslednou pevnost svařovaných vzorků. Pro zachycení efektu tohoto faktoru byly vzorky určené pro experiment náhodně vybírány z různých míst dvou postranních stojen dílu B-sloupku, určených pro dosednutí elektrod svařecích kleští. Důraz přitom byl kladen na to, aby byl počet vzorků z pravé stojny dílu stejný jako z levé stojny. Při svařování bylo znáhodněno také pořadí svařování jednotlivých vzorků. Možnosti odběru byly přitom determinovány designem dílu – tvarem a malou šířkou stojny v určitých místech profilu dílu.

Po profilu dílu B-sloupku byla po důkladném zvážení k odběru vzorků pro vlastní experiment metodou DOE vybrána místa dle následujícího schématu na obr. 6-2.



Obr. 6-2: Schéma náhodného odběru vzorků po profilu dílu B-sloupku

kde např. označení vzorku 05_B1 znamená, že se jedná o vyřezaný vzorek č. 5 z dílu výrobní šarže B1. Písmeno B představuje materiál BTR165. Zelené zóny přitom označují místa, kde byla stojna B-sloupku dostatečně široká a tedy vhodná pro vyhotovení vzorku. Červený bod označuje přesné místo odběru konkrétního vzorku na profilu dílu.

Nečistota a maz na povrchu dílů

Při procesu svařování dochází k tvorbě okují, opalu povrchu v okolí svaru vlivem vysokých teplot, rozstříkům svarového kovu a jiným nežádoucím účinkům, které znečišťují povrch svařené karoserie. Tyto efekty jsou nepřijatelné především pro následující operace lakování karoserií, kde způsobují vážné problémy. I ve svařovně jsou však nečistoty na povrchu svařovaných plechů zdrojem nekvality a zmenšené pevnosti svarů.

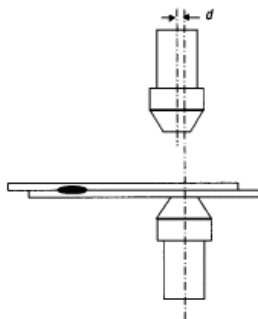
Velkou měrou se na znečištění povrchu plechů podílí mastnota, která se na svařované díly karoserií dostává z předchozích operací lisování. V procesu lisování je oleje třeba ke

zlepšení lisovatelnosti ocelových plechů v lisovacích nástrojích. Na mastném povrchu dílů však snáze ulpívají různé nečistoty, jejichž zdrojem jsou rozličné výrobní operace svařování, a i samotná mastnota se podílí na zvýšené tvorbě vad ve vnitřní struktuře svarů.

Pro potřeby simulace znečištění povrchu vzorku během experimentu byl z praxe získán olej s označením MULTIDRAW PL 61SE od dodavatele Zeller+Gmelin, který je přímo určen pro mazání lisovacích nástrojů. Šumový faktor oleje nebyl kvůli omezenému počtu vzorků do vlastního plánu experimentu zařazen. Olej byl aplikován na 3 kusy svařených vzorků určených k metalografickým rozborům vnitřní struktury svarového bodu. Na povrch vzorků bylo aplikováno daným postupem předepsané množství 2 g/m^2 oleje.

Axiální vychýlení elektrod svařecích kleští

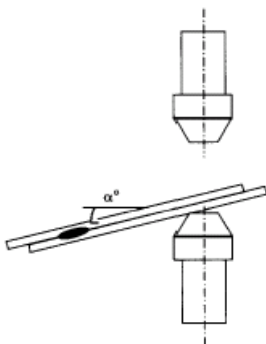
K axiálnímu vychýlení elektrod svařecích kleští dochází vlivem nevhodné údržby svařecího stroje. Výsledným efektem je, že osa horní elektrody se neshoduje s osou dolní elektrody. Následkem toho dochází zvýšenou měrou k rozstříkům svarového kovu svarové čochy do prostoru. Vzájemná vzdálenost os je d (viz obr. 6-3).



Obr. 6-3: Axiální vychýlení elektrod svařecích kleští [23]

Úhlové vychýlení elektrod svařecích kleští

K úhlovému vychýlení elektrod svařecích kleští dochází poměrně často při ručním svařování. U robotů je úhel dosednutí elektrod svařecích kleští korektně naprogramován. Pracovník svařovny je nucen s těžkými svařecími kleštěmi manipulovat dlouhé hodiny a mnohdy musí svařovat i na špatně dostupných místech. Pokud nemá u pracovní operace k dispozici patřičné šablony, může dojít k tomu, že bodově svařuje vždy pod trochu jiným úhlem (viz obr. 6-4).



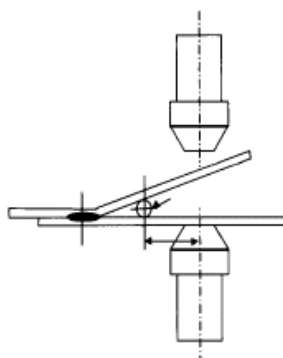
Obr. 6-4: Úhlové vychýlení elektrod svařecích kleští [23]

Pokud je úhel vychýlení elektrod opravdu velký dochází ke vzniku tzv. vylomených svarových bodů. Tento typ svarů je typický tím, že dochází k nahrnutí materiálu na jednu stranu svarového bodu.

Pevnost takového svarového bodu může být nižší díky častým rozstříkům nataveného materiálu čochy do prostoru.

Špatné dosednutí/slícování svařovaných dílů

Špatné slícování může vzniknout vlivem přítomnosti hrubších nečistot na styčných površích svařovaných dílů, nepřesnosti výlisků a nebo vlivem malé přitlačné síly elektrod při svařování (viz obr. 6-5).



Obr. 6-5: Špatné slícování svařovaných dílů [23]

Opotřebení dosedacích ploch elektrod

Antikorozní povlaky způsobují při procesu svařování nepříznivé navyšování přechodových odporů, což má za následek i nadměrné opotřebení kontaktních elektrod (čepiček). Elektrody jsou ve stykové oblasti tepelně a metalurgicky ovlivňované, čímž se snižuje jejich výkonnost a životnost.

Nejčastějšími příčinami opotřebení a malé životnosti svářecích elektrod (čepiček) je nesprávná volba nastavení parametrů svařování – nadměrný svářecí proud, čas svařování a přitlačná síla elektrod, antikorozní povrchové úpravy karosářských plechů [46] (př. v tab. 6-4), nedostatečné chlazení elektrod a znečištění povrchu svařovaných materiálů v oblasti kontaktního styku.

Díly karoserie povrchově neupravené	8 000 – 10 000 svarových bodů
Díly karoserie pozinkované: 7 – 20 μm	600 – 3 500 svar. bodů
Díly karoserie pozinkované + bonazinkované	400 – 800 svar. bodů

Tab. 6-4: Životnost elektrod vzhledem k povrchovým úpravám [28]

Zn se při svařování lepí na měděné elektrody. Oceli se Zn povrchovou úpravou vyžadují větší proud a čas svařování k dosažení dostatečného průměru svarové čočky [46].

Materiál USIBOR 1500 nese antikorozní ochrannou difúzní vrstvu složenou ze subvrstev hliníku, křemíku a železa a podle dokumentace výrobce má působit pozitivně na kvalitu bodového svaru. V kapitole materiálových analýz (kapitola č. 7) jsou uvedeny vlastní rozborů této povrchové vrstvy.

Vnitřní nehomogenity materiálu plechů

Vzhledem ke složitosti procesu lisování za tepla, může dojít k různým nehomogenitám ve vnitřní struktuře základního materiálu. Tyto nehomogenity mohou negativně ovlivnit svařitelnost postižených dílů.

Více informací ohledně jakosti základního materiálu dílů z vysokopevné oceli je prezentováno v kapitole materiálůvých analýz (7), která se problematikou vlivu parametrů výroby těchto materiálů na vlastní svařitelnost přímo zabývá. U zkoumaných materiálů BTR165 a USIBOR 1500 bylo nalezeno několik závažných lokálních vad, které mají potenciál významného vlivu na jakost svarů.

Interakce faktorů

Interakce faktorů představuje závislost jednoho faktoru na druhém. Účinek jednoho faktoru na odezvu závisí na seřízení druhého faktoru. Například interakce mezi faktory A a B se symbolicky značí $A \times B$.

Interakce mezi faktory se běžně vyskytují. Kterýkoli faktor může být v interakci s jiným faktorem. V této práci jsou použity interakce prvního řádu, protože je zde použita metoda DOE podle Taguchiho. Interakce vyšších řádů, např. $A \times B \times C \times D$, nebývají podle empirických zkušeností významné, a proto se zanedbávají [21]. V experimentech metodou DOE se doporučuje spíše orientace na faktory než na jejich interakce.

V tomto experimentu byly použity celkem 3 interakce mezi parametry proudu (A), času (B) a síly (C): $A \times B$, $A \times C$, $B \times C$. Interakce byly při návrhu experimentu použity z důvodu hlubšího poznání závislostí faktorů v procesu bodového odporového svařování dílů z vysokopevných ocelí. Použité interakce mají své místo v plánu experimentu předem určeno. Tato skutečnost bude konkrétně prezentována při konstrukci plánu experimentu.

6.1.3 Stanovení sledované odezvy

Odezva (charakteristika jakosti) je veličina, pomocí které se vyjadřují určité vlastnosti produktu nebo procesu. V experimentální terminologii představuje odezva závislou proměnnou, pomocí které jsou kvantifikovány výsledky experimentu.

Odezva je objektivním kritériem pro měření schopnosti dosáhnout cíle experimentu. Při výběru odezvy by měla být preferována měřitelná spojitá charakteristika, protože poskytuje mnohem více informací než pouhé atributy. Odezva by měla být vztažena k základní fyzikální podstatě problému.

Při návrhu experimentu je možné použít více než jednu odezvu. Pokud jsou k dispozici hodnoty více různých odezev, je nutné aplikovat specifický postup pro jejich sloučení do jediného celkového kritéria hodnocení (OEC) [21].

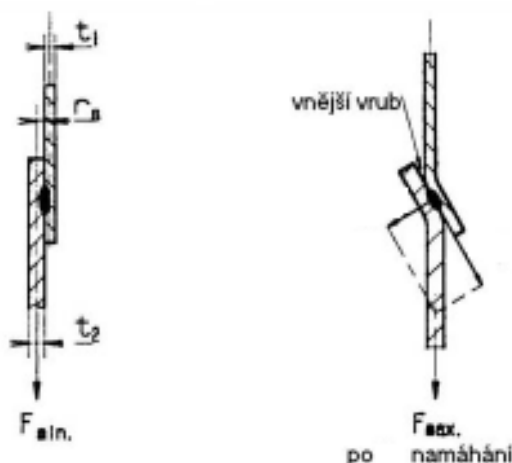
Podle opakování jednotlivých pokusů experimentu rozlišujeme experimenty bez opakování a experimenty s opakováním. Když jsou jednotlivé pokusy opakovány, měřením lze s jedním nastavením faktorů získat hned několik hodnot odezvy. Tyto hodnoty lze převést na jednu veličinu, vyjadřující poměr signál/šum (S/N). S/N umožňuje pohodlně pracovat se širokou škálou výsledků, podporuje linearitu, a proto je ideálním prostředkem pro měření robustnosti daných nastavení regulovatelných faktorů.

Jako charakteristiku jakosti lze s výhodou použít i způsobilost procesu. Indexy způsobilosti (C_p , C_{pk}) s oblibou používají k vyjádření variability specialisté kvality. Indexy způsobilosti souvisí i s kvantifikací rizik procesu v jednotkách ppm, ppb apod.

Podle smyslu odezvy jsou rozlišovány 3 typy. Typ S (Smaller is better) má cílovou hodnotu 0 a platí u něj pravidlo: „Čím menší, tím lepší.“ Typ B (Bigger is better) má cílovou hodnotu $+\infty$ a platí zde: „Čím větší, tím lepší.“ U typu N (Nominal is best) je cílovou hodnotou obvykle střed tolerančního pole.

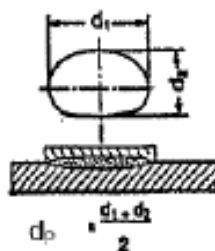
Pevnost bodových svarů

Obecně nejdůležitější charakteristikou jakosti u svarů je jejich pevnost. Při vlastním experimentu byl brán zřetel na pevnost svarů ve stříhu. Tento způsob namáhání bodových odporových svarů nejvíce odpovídá směru jejich reálného namáhání. Pevnost ve stříhu byla měřena při tahové zkoušce a z naměřených dat byla vyhodnocena maximální mez pevnosti F_{max} každého z bodově svařených vzorků. Střihová tažná síla aplikovaná na bodový svar vytváří moment ohybu (viz obr. 6-6), který roste při zvyšujícím se namáhání až do mezní hodnoty.



Obr. 6-6: Namáhání bodového svaru ve stříhu [13]

V podmínkách sériové výroby automobilového závodu však není pro náročnou přípravu vzorků pro laboratorní tahové zkoušky dostatek času. Jako ekvivalent F_{max} je v provozu sledována veličina průměru svarového bodu d_p . Mezi těmito veličinami existuje významná závislost (jsou korelované). Čím větší je průměr svarového bodu, tím větší je nutné vynaložit sílu k roztržení svařeného vzorku. Měření d_p je rychlé a nenáročné a lze jej provést po sekáčových zkouškách, které jsou v sérii běžně prováděny. Měřidlem pro určení d_p je obyčejné posuvné měřítko, které je univerzálnější, skladnější, mobilnější a především levnější než trhačí stroj potřebný pro tahové zkoušky. Hodnota průměru svarového bodu je aritmetickým průměrem dvou naměřených hodnot průměru bodu ve směrech na sebe kolmých v rovině svařování – viz obrázek 6-7.



Obr. 6-7: Průměr vytrženého bodu d_p [13]

Z výše uvedených důvodů bylo rozhodnuto, že vlastní demonstrace návrhu experimentu se bude opírat o data z měření veličiny d_p namísto veličiny F_{max} právě kvůli lepší aplikovatelnosti metodologie na podmínky provozu sériové výroby karoserií. Vzhledem k omezení v počtu vzorků a trvajícího požadavku na zjištění maximální tahové síly bylo měření d_p provedeno po měření F_{max} na stejných vzorcích.

Pro určení variability naměřených dat bylo v experimentu naplánováno opakování dílčích pokusů. Každý pokus byl zopakován při stejném nastavení parametrů celkem 3-krát. Výsledná robustnost nastavení jednotlivých parametrů svařování, byla popsána veličinou S/N

(poměr signál/šum) orientačně vzhledem k malému počtu opakování pokusů. Pro sériovou výrobu svařovny je vzhledem ke komplexnosti procesů svařování právě robustnost velmi důležitou veličinou.

6.1.4 Plán experimentu

Existuje celá řada používaných strategií / plánů experimentu. Zkoumání vlivu jednoho kvantitativního nebo kvalitativního faktoru na jednu nebo více odezev se nazývá jednofaktorový experiment. Faktor se nastavuje na dvě nebo více úrovní a zkoumá se na všech úrovních se stejnou četností. Jednofaktorový experiment vypovídá o působení tohoto faktoru na jednu nebo více odezev za pevně daných podmínek.

Zkoumání účinků více kvantitativních nebo kvalitativních faktorů na jednu nebo více odezev se věnuje úplný faktoriální experiment (anglicky Full Factorial Design). Každý faktor se nastavuje na dvě nebo více úrovní. Zkoumání se provádí pro všechny možné kombinace úrovní faktorů se stejnou četností pokusů. Úplný faktoriální experiment vypovídá o působení zkoumaných faktorů na odezvu a o interakcích mezi zkoumanými faktory [29].

Frakční faktoriální experiment oproti úplnému faktoriálnímu experimentu zkoumá pouze výběr z možných kombinací úrovní faktorů.

Experiment podle Taguchiho

Množství všech možných pokusů úplného faktoriálního experimentu (co pokus to jedinečná kombinace nastavení faktorů na určitých úrovních) lze vypočítat podle vzorce

$$N = n^k, \quad (2)$$

kde N je celkový počet pokusů experimentu, n je počet úrovní faktorů a k je počet faktorů experimentu. V podnikových ani školských podmínkách nelze provádět typově rozsáhlé experimenty s velkým počtem zkoumaných faktorů. Japonský vědec Genichi Taguchi proto sestavil soubor speciálních tabulek (tzv. ortogonálních soustav – př. v tab. 6-5), pomocí kterých lze provést pouze malou část z celkového počtu možných pokusů. Tak lze udělat nejmenší možný počet pokusů a získat z nich maximální množství informací o chování zkoumaného procesu.

pokus	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tab. 6-5: Ortogonální soustava L_8

Řádky soustavy představují podmínky pro jednotlivé pokusy a sloupce indikují možnost přiřazení faktoru. Sloupce v soustavě jsou ortogonální a vyvážené. Ve všech sloupcích je stejný počet jedniček a dvojek (úrovně faktorů). Rovněž dvojice sloupců jsou vyvážené – v každé dvojici sloupců je stejný počet dvojic (1,1), (1,2), (2,1) a (2,2).

Podle strategie úplného faktoriálního experimentu by bylo nutné pro zkoumání účinků 7 faktorů na 2 úrovních provést celkem 128 pokusů (případ vlastního experimentu), což by bylo časově i finančně nákladné. 8 pokusů frakčního experimentu je však únosných.

Vedle ortogonální soustavy L_8 (L – Eulerovy latinské čtverce, 8 = počet pokusů) existují také další soustavy pro dvě úrovně faktorů: L_4 (2^3), L_{12} (2^{11}), L_{16} (2^{15}), L_{32} (2^{31}), L_{64} (2^{63}), pro tři úrovně: L_9 (3^4), L_{27} (3^{13}), L_{81} (3^{40}), pro smíšené úrovně (některé faktory na 2 a jiné na 3 úrovních): L_{18} ($2^1, 3^7$), L_{36} ($2^3, 3^{13}$), L_{54} ($2^1, 3^{25}$), atd.

Vlastní plán experimentu

Pro vlastní experiment byla použita Taguchiho metoda návrhu experimentu a vzhledem k určitému množství vzorků a počtu přítomných regulovatelných faktorů byla zvolena ortogonální soustava L_8 . Sledovanými faktory byly proud, čas, přitlačná síla elektrod a dodavatel dílů B-sloupku z vysokopevné oceli (viz tab. 6-6). Vedle samotných faktorů byly do experimentu zahrnuty také 3 interakce faktorů: proud \times čas, proud \times síla, čas \times síla.

Faktor	1. úroveň faktoru	2. úroveň faktoru
A / svářecí proud (kA)	7,4	8,4
B / čas svařování (per)	15	22
C / přitlačná síla elektrod (kN)	2,2	4,0
D / dodavatel dílů B-sloupku	BTR	USI

Tab. 6-6: Hodnoty úrovní zvolených regulovatelných faktorů

Výstupními charakteristikami jakosti (odezvami) byly průměr svarového bodu a robustnost jakožto poměr signálu a šumu (regulovatelných a neregulovatelných faktorů) experimentu. Pro výpočet robustnosti bylo nutné každý pokus (jedinečnou kombinaci faktorů) opakovat. Jednotlivé pokusy byly opakovány 3-krát. U charakteristiky jakosti průměru svarového bodu bylo třeba počítat s aritmetickým průměrem tří naměřených hodnot odezvy dílčích pokusů.

Pro každé opakování experimentu byla zvolena jedna ze 3 dodaných šarží materiálu, aby bylo možné oddělit odezvy jednotlivých kombinací regulovatelných faktorů při různých šaržích a porovnat přitom jejich variabilitu.

Pokus	A proud (kA)	B čas (per)	int. AxB	C síla (kN)	int. AxC	int. BxC	D doda- vatel	Y1 \emptyset bodu, S/N	Y2 \emptyset bodu, S/N	Y3 \emptyset bodu, S/N
1	7,4	15	1	2,2	1	1	BTR			
2	7,4	15	1	4,0	2	2	USI			
3	7,4	22	2	2,2	1	2	USI			
4	7,4	22	2	4,0	2	1	BTR			
5	8,4	15	2	2,2	2	1	USI			
6	8,4	15	2	4,0	1	2	BTR			
7	8,4	22	1	2,2	2	2	BTR			
8	8,4	22	1	4,0	1	1	USI			

Tab. 6-7: Plán vlastního experimentu

Přítomné interakce jednotlivých faktorů mají v tabulce přesně vyhrazený sloupec a jejich nastavení je tak pro experiment dané. Sloupec, ve kterém má být umístěna plánovaná interakce, lze určit z tzv. lineárních grafů, které zkonstruoval Taguchi a které je možné najít v dostupné literatuře.

6.1.5 Realizace experimentu

Dodržení plánu experimentu při jeho realizaci je nutné pečlivě sledovat. Příprava vzorků ke svařování spočívala v jejich vyřezání z dodaných dílů B-sloupku. Při řezání bylo nutné dbát na nízké tepelné ovlivnění základního materiálu plechu. Vysoké tepelné ovlivnění by mělo za následek popuštění materiálu a změnu jeho původní struktury. To by mohlo nakonec nepříznivě ovlivnit naměřená data experimentu.

Svařování vzorků

Svařování vzorků bylo provedeno ve Svářečské škole v Lázních Bohdaneč. Pracovníkem, který svařoval vzorky, byl svářecí instruktor. Instruktor při svařování vzorků dostával přesné pokyny nastavení svářecích parametrů dle vypracovaného plánu experimentu a do rukou dostával vzorky, které byly přichystány v určeném pořadí.

Svařování jednotlivých vzorků bylo v rámci výrobních šarží znáhodněno, aby byl z realizace experimentu vyloučen činitel lidského faktoru seřizovače (mohlo by dojít k cílenému usnadnění svařovacích postupů v nastavování parametrů apod.). Znáhodnění postupu svařování jednotlivých vzorků zapojuje do experimentu další ze šumových faktorů – nepřesnosti při nastavení svářecího stroje seřizovačem.

Pořadí svařování vzorků experimentu je uvedeno v tabulce 6-8.

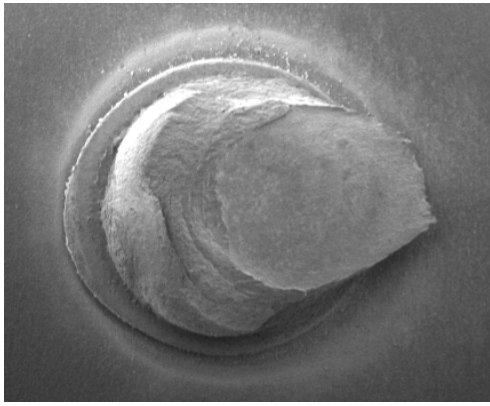
Pokus	Nastavení faktorů	Pořadí svařování - vzorky šarže 1		Pořadí svařování - vzorky šarže 2		Pořadí svařování - vzorky šarže 3	
1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	1.	01_B1	23.	12_B2	12.	12_B3
2	A ₁ B ₁ C ₂ D ₂	13.	04_U1	18.	03_U2	22.	01_U3
3	A ₁ B ₂ C ₁ D ₂	7.	07_U1	16.	05_U2	17.	08_U3
4	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁	19.	02_B1	8.	13_B2	9.	13_B3
5	A ₁ B ₁ C ₁ D ₂	20.	10_U1	15.	17_U2	14.	09_U3
6	A ₁ B ₁ C ₂ D ₁	24.	05_B1	6.	07_B2	11.	02_B3
7	A ₁ B ₂ C ₁ D ₁	5.	10_B1	4.	10_B2	3.	11_B3
8	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	21.	11_U1	2.	18_U2	10.	11_U3

Tab. 6-8: Náhodné pořadí svařování jednotlivých vzorků

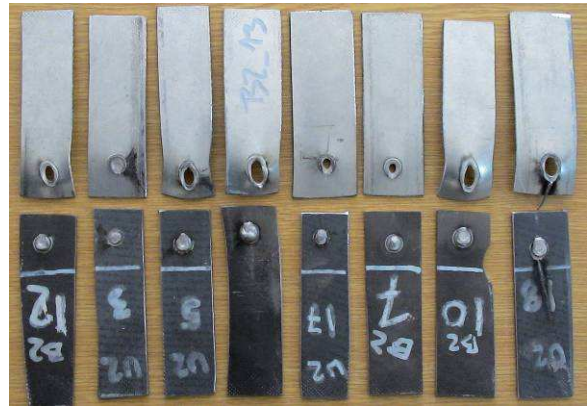
Měření

Po svaření byly vzorky zkoušeny při tahové zkoušce stříhem. Pořadí měření vzorků bylo opět znáhodněno. Výstupem tahové zkoušky byly hodnoty maximální tahové síly F_{max} potřebné k přetržení (k lomu) svarových bodů.

Způsobem (módem) lomu bylo pozvolné odtrhávání svarového bodu z nízkopevného plechu v oblasti kolem svaru (vylovení bodu) – viz obr. 6-8 a 6-9.



Obr. 6-8: Mód lomu svarových bodů při tahové zkoušce stříhem (zv. cca 10x)



Obr. 6-9: Roztržená série vzorků

Po naměření hodnot F_{max} byly vytržené body, které všechny ulpěly na vysokopevném plechu vzorku, změřeny co do jejich průměru. Měření průměru bodu bylo provedeno posuvným měřítkem podle metodiky VW 011 05, jehož výsledky zachycuje níže uvedená tabulka 6-9.

Pokus	Nastavení faktorů	F_{max} (kN) d_P (mm)		F_{max} (kN) d_P (mm)		F_{max} (kN) d_P (mm)	
		– vzorky šarže 1		– vzorky šarže 2		– vzorky šarže 3	
1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	11,10	6,13	10,17	6,20	9,94	5,67
2	A ₁ B ₁ C ₂ D ₂	8,16	4,15	8,04	4,27	7,58	3,99
3	A ₁ B ₂ C ₁ D ₂	10,71	7,01	10,26	6,91	10,97	6,46
4	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁	10,23	5,58	10,63	6,86	10,83	6,37
5	A ₂ B ₁ C ₁ D ₂	9,93	5,00	10,45	5,11	9,60	5,07
6	A ₂ B ₁ C ₂ D ₁	10,06	5,03	10,02	5,01	9,60	5,44
7	A ₂ B ₂ C ₁ D ₁	11,40	7,50	10,36	6,96	10,53	6,83
8	A ₂ B ₂ C ₂ D ₂	10,94	7,59	10,51	6,17	9,69	6,93

Tab. 6-9: Naměřená data experimentu (F_{max} d_P)

Nejistotu měření, která byla patrná především při práci s posuvným měřítkem, lze považovat za další významný šumový faktor experimentu.

6.1.6 Zpracování dat (ANOVA)

Kapitola zpracování naměřených dat pojednává o analýze výsledků vlastního experimentu. Byla provedena kompletní ANOVA (analýza rozptylu) průměrů odporových bodových svarů za účelem zjištění vlivu jednotlivých faktorů na odezvu jejich pevnosti. Následně byla provedena také analýza robustnosti nastavení faktorů a jejich vlivů na charakteristiku S/N (poměr signál / šum).

ANOVA reprezentuje standardní statistickou metodu, díky níž lze provést podrobnou analýzu rozptylu výsledků pokusů. Rozptyl naměřených hodnot odezvy pochází od změn úrovní faktorů při jednotlivých pokusech a od jiných vlivů, mezi něž lze započítat také chyby měření, při nastavování faktorů, působení šumových faktorů a faktorů, které nebyly zařazeny do experimentu (tzv. experimentální chyba – reziduální rozptyl).

Analyza naměřených dat průměrů svarových bodů

V první fázi byl k analýze určen experiment se čtyřmi faktory, třemi interakcemi faktorů a jednou odezvou. Charakteristiku jakosti představuje průměr bodového svaru (d_p), který je u každé kombinace parametrů vyjádřený jako aritmetický průměr z naměřených hodnot třech výrobních šarží. Jedná se o charakteristiku typu B, tj. čím větší, tím lepší. Nasvědčuje tomu i fakt, že podle koncernových standardů existují pouze spodní toleranční meze průměrů svarových bodů.

Plán a výsledky měření vlastního experimentu jsou uvedeny v tabulce 6-10.

Pokus	A	B	Int. AxB	C	Int. AxC	Int. BxC	D	Y (mm)
1	1	1	1	1	1	1	1	6,00
2	1	1	1	2	2	2	2	4,14
3	1	2	2	1	1	2	2	6,79
4	1	2	2	2	2	1	1	6,27
5	2	1	2	1	2	1	2	5,06
6	2	1	2	2	1	2	1	5,16
7	2	2	1	1	2	2	1	7,10
8	2	2	1	2	1	1	2	6,90

Tab. 6-10: Návrh experimentu a výsledky měření průměrů svarových bodů

Podle metody DOE bylo nejdříve třeba vypočítat optimální kombinaci faktorů bez interakcí a průměrné a hlavní účinky jednotlivých faktorů a jejich interakcí.

Průměrný účinek faktoru B na 1. úrovni (\bar{B}_1) lze vypočítat podle vztahů

$$B_1 = (y_1 + y_2 + y_5 + y_6) \quad (3)$$

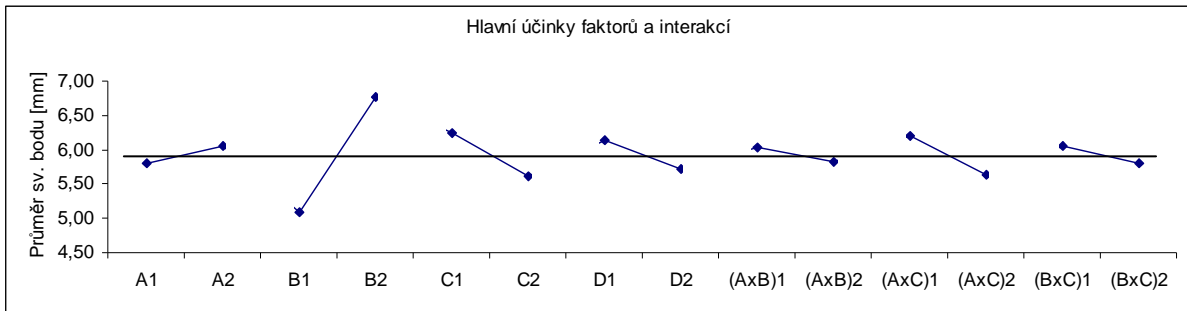
$$\bar{B}_1 = \frac{(y_1 + y_2 + y_5 + y_6)}{4} \quad (4)$$

Hlavní účinek daného faktoru je roven rozdílu průměrných účinků faktoru na jednotlivých úrovních.

Analogicky lze spočítat průměrné a hlavní účinky u všech faktorů a interakcí – viz tab. 6-11.

Sloupec	Faktor / interakce	Úroveň 1 – prům. účinek	Úroveň 2 – prům. účinek	Hlavní účinek
1	A	5,80	6,05	0,26
2	B	5,09	6,76	1,67
3	int. AxB	6,03	5,82	-0,21
4	C	6,23	5,61	-0,62
5	int. AxC	6,21	5,64	-0,57
6	int. BxC	6,05	5,80	-0,26
7	D	6,13	5,72	-0,41

Tab. 6-11: Průměrné a hlavní účinky faktorů a interakcí (d_p)

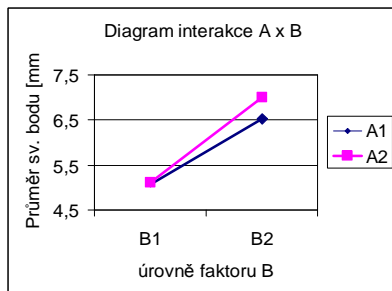


Graf 6-2: Hlavní účinky faktorů a interakcí (d_p)

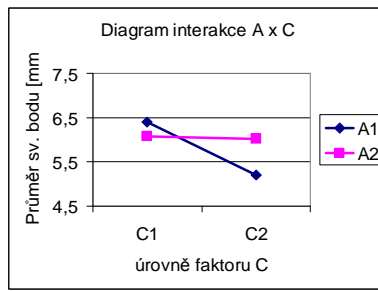
Protože experimentální odezva je typu B, optimální kombinace nastavení faktorů bez interakcí je $A_2B_2C_1D_1$. Tato kombinace je vlastně nastavením parametrů při pokusu číslo 7, kde byly z naplánovaných osmi pokusů naměřeny nejvyšší hodnoty průměru svarového bodu i nejvyšší pevnosti bodových svarů.

Z grafu hlavních účinků (graf 6-2) je vidět, že největší účinek na pevnost má faktor času a musí být tedy řízen velmi citlivě.

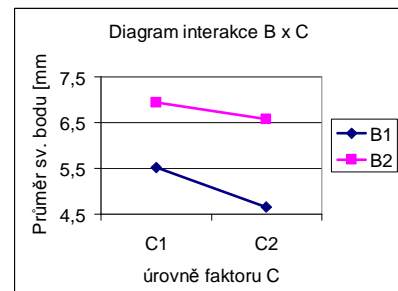
Při posouzení významnosti interakcí faktorů z jejich grafů (viz grafy 6-3, 6-4 a 6-5) byla pro experiment vyhodnocena jako důležitá pouze interakce $A \times C$ (viz graf 6-4). Faktor proudu a faktor síly elektrod jsou v silné interakci, což znamená, že přenastavení parametru proudu na svářecím stroji by mělo vždy doplnit i seřízení parametru přítláčné síly elektrod, aby byla zachována konzistence provedení svaru. Resp., z grafu 6-4 je patrné, že při nízké hodnotě proudu záleží mnohem více na velikosti přítláčné síly, než při vyšším proudu. Ostatní interakce faktorů byly při experimentu málo významné.



Graf 6-3: Interakce $A \times B$ (d_p)



Graf 6-4: Interakce $A \times C$ (d_p)



Graf 6-5: Interakce $B \times C$ (d_p)

Po uvažování významnosti zúčastněných interakcí a jejich kvalitativní analýze bylo nutné změnit optimální kombinaci nastavení faktorů na $A_1B_2C_1D_1$ vzhledem k významu a chování interakce $A \times C$. (Této kombinaci faktorů neodpovídá žádný realizovaný pokus plánu experimentu.)

V daném pracovním rozsahu je tedy za účelem vyšší pevnosti svarových bodů výhodné nastavovat čas na vyšší úroveň, hodnotu přítláčné síly elektrod na nižší úroveň a hodnotu proudu na nižší úroveň. Co se týče volby materiálu, za daných podmínek lépe charakteristice jakosti vyhověl materiál BTR165.

Pro určení procentuálního podílu faktorů a jejich interakcí za použití ANOVA byly použity následující veličiny a jejich výpočty. Jsou seřazeny dle logické posloupnosti.

Celkový součet hodnot odezev

$$T = \sum_{i=1}^n y_i \quad (5)$$

Korekční faktor

$$C.F. = \frac{T^2}{n} \quad (6)$$

Celkový součet čtverců odezev

$$S_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - C.F. \quad (7)$$

Součet čtverců pro faktory a interakce

$$S_A = \frac{A_1^2}{N_{A_1}} + \frac{A_2^2}{N_{A_2}} - C.F. \quad (8)$$

Součet čtverců pro chybu experimentu

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D + S_{AxB} + S_{AxC} + S_{BxC}) \quad (9)$$

kde N_{A_i} je celkový počet pokusů s faktorem A_i a A_i je celkový součet výsledků (y_i) pro A_i .

Celkový počet stupňů volnosti

$$f_T = n - 1 \quad (10)$$

Stupně volnosti pro faktory

$$f_A = \text{poč.}_\text{úrovní}_\text{faktorů} - 1 \quad (11)$$

Stupně volnosti pro interakce

$$f_{AxB} = f_A \cdot f_B \quad (12)$$

Stupně volnosti pro chybu

$$f_e = f_T - (f_A + f_B + f_C + f_D + f_{AxB} + f_{AxC} + f_{BxC}) \quad (13)$$

Průměrný čtverec – rozptyl

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} \quad (14)$$

Procentuální podíl

$$P_A = \frac{S_A}{S_T} \cdot 100 \quad (15)$$

Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) experimentu jsou uvedeny v tabulce 6-12.

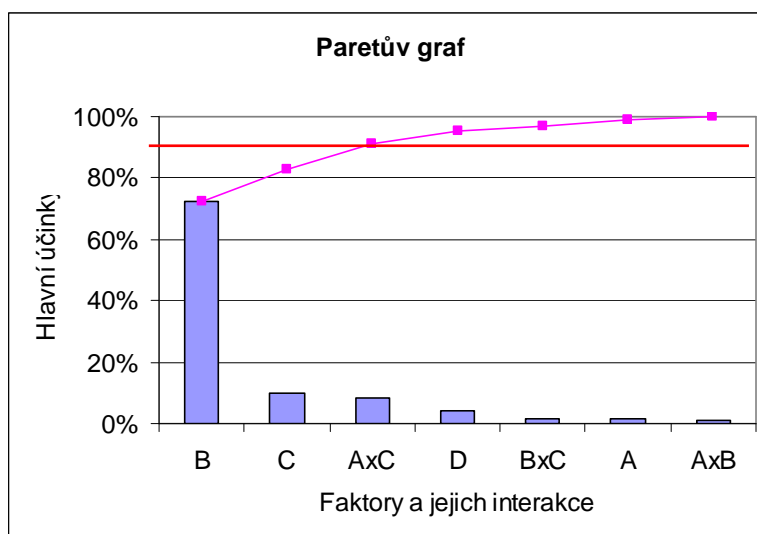
Faktor / interakce	f	S	V	F	S'	P
A	1	0,13	0,13			1,68%
B	1	5,61	5,61			72,63%
C	1	0,77	0,77			9,96%
D	1	0,34	0,34			4,37%
Int. AxB	1	0,09	0,09			1,18%
Int. AxC	1	0,65	0,65			8,44%
Int. BxC	1	0,13	0,13			1,73%
Chyba	0					0,00%
Celkem	7	7,72				100,00%

Tab. 6-12: ANOVA před sloučením nevýznamných faktorů a interakcí (d_p)

Velikost chyby není možné určit, protože počet stupňů volnosti chyby je 0. Podíl chyby je velice důležitý pro zjištění, zda byl experiment správně navržen a zda v něm byly postihnuté všechny významné faktory a interakce. K ověření statistického významu jednotlivých faktorů je třeba spočítat hodnoty F a pro výpočet přesných procentuálních podílů musí být určen i čistý součet čtverců S' . Bez dostatečného počtu stupňů volnosti pro chybu nelze tyto výpočty provést, a proto je nutné sloučit bezvýznamné faktory s veličinou chyby.

Při rozhodování o sloučení daných faktorů hraje standardně roli procentuální podíl P a pomáhá i určit si tzv. F -kritérium. Při slučování se postupuje od nejméně významného faktoru vzestupně, až je počet stupňů volnosti chyby roven přibližně jedné polovině celkového počtu stupňů volnosti.

Jako kritérium pro sloučení faktorů je možné použít také Paretův graf příčin a následků. Pro experiment byla určena hranice významnosti 90 %.



Graf 6-6: Paretův graf hlavních účinků (d_p)

Na základě malé významnosti interakcí AxB, BxC a faktorů A a D bylo určeno, že budou v další fázi analýzy rozptylu sloučeny s chybou. Další postup výpočtů byl následující.

Součet čtverců pro chybu

$$S_e = S_A + S_D + S_{AxB} + S_{BxC} \quad (16)$$

Stupně volnosti pro chybu

$$f_e = f_A + f_D + f_{AxB} + f_{BxC} \quad (17)$$

Rozptyl způsobený chybou

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} \quad (18)$$

F -kritéria pro významné faktory

$$F_B = \frac{V_B}{V_e} \quad (19)$$

Čistý součet čtverců pro významné faktory

$$S'_B = S_B - V_e \cdot f_B \quad (20)$$

Procentuální podíl významných faktorů a interakcí

$$P_B = \frac{S'_B}{S_T} \cdot 100 \quad (21)$$

Procentuální podíl chyby

$$P_e = 100\% - (P_B + P_C + P_{AxC}) \quad (22)$$

Spočítané hodnoty po sloučení lze opět vložit do tabulky analýzy rozptylu (viz tabulka 6-13).

Faktor / interakce	<i>f</i>	<i>S</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>S'</i>	<i>P</i>
A	(1)	(0,13)	sloučeno	-	-	-
B	1	5,61	5,61	32,40	5,43	70,39%
C	1	0,77	0,77	4,44	0,60	7,72%
D	(1)	(0,34)	sloučeno	-	-	-
Int. AxB	(1)	(0,09)	sloučeno	-	-	-
Int. AxC	1	0,65	0,65	3,77	0,48	6,20%
Int. BxC	(1)	(0,13)	sloučeno	-	-	-
Chyba	4	0,69	0,17			15,69%
Celkem	7	8,19				100,00%

Tab. 6-13: ANOVA po sloučení nevýznamných faktorů a interakcí (d_p)

Procentuální podíl chyby experimentu je vyšší než procentuální podíl nejméně významného faktoru interakce AxC, ale je mnohonásobně nižší než procentuální podíl nejvýznamnějšího faktoru (času). Velikost podílu chyby byla přičtena účinku sloučených faktorů a celkovému významu jednotlivých šumových faktorů experimentu.

Intervaly spolehlivosti *C.I.* představují variabilitu odhadované hodnoty hlavního účinku faktoru nebo výsledku za optimálních podmínek při zvoleném koeficientu spolehlivosti vztahenému k hodnotě *F*. *C.I.* se počítají po sloučení a jen pro faktory a interakce, které nebyly sloučeny, podle vzorce

$$C.I. = \pm \sqrt{F(1, f_2) \cdot \frac{V_e}{N_e}} \quad (23)$$

kde f_2 jsou stupně volnosti pro chybu a N_e je efektivní počet opakování.

Hlavní účinek faktoru B na úrovni B_2 bude $6,76 \text{ mm} \pm 0,58 \text{ mm}$ při koeficientu spolehlivosti 0,95 (95 případů ze 100 provedených pokusů). Pokud tedy bude parametr času nastaven na hodnotu 22 period a ostatní parametry budou jakkoli v rámci vstupních pracovních podmínek, bude výsledný průměr svarového bodu nejméně $6,41 \text{ mm}$ (s pravděpodobností 0,95), což je oproti kritériu $d_p > 4,3 \text{ mm}$ podle VW 011 05 s dostatečnou rezervou.

Hodnotu optimální charakteristiky jakosti (Y_{OPT}) je možné spočítat pouze pomocí faktorů, které jsou podle výše uvedené ANOVA významné, tj. B, C a interakce AxC. Optimální nastavení pro interakci AxC je přitom A_1C_1 . Celková optimální kombinace po sloučení faktorů je $A_1B_2C_1$.

$$Y_{OPT} = \bar{T} + (\overline{A_1C_1} - \bar{T}) + (\overline{B_2} - \bar{T}) \quad (24)$$

Při optimálním nastavení významných faktorů se bude charakteristika jakosti pohybovat v rozmezí hodnot $7,23 \text{ mm} \pm 0,82 \text{ mm}$ při koeficientu spolehlivosti 0,95.

Závěrem je třeba ověřit správnost provedené analýzy. Byly provedeny ověřovací testy, které měly za úkol potvrdit odhadovaný interval spolehlivosti průměru bodového svaru při optimálním nastavení významných faktorů experimentu. Pro potřebu ověření analýzy byly svařeny 3 další vzorky s nastavením faktorů $A_1B_2C_1$. Žádná ze tří naměřených hodnot průměrů bodů nepadla do oblasti mimo vypočtený interval spolehlivosti a jejich aritmetický průměr byl roven 7,06 mm.

Výše uvedené výsledky analýzy lze tedy doporučit pro sériovou výrobu svařování heterogenních bodových odporových svarů daných dílů B-sloupku z vysokopevné oceli v kombinaci s díly ze standardní karosářské nízkopevné oceli.

Regresní model

Pomocí statistického software byla provedena lineární regresní analýza průměru svarového bodu ve vztahu k regulovatelným faktorům svářecího proudu, času svařování a přitlačné síly elektrod (vzhledem ke svému nespojitému charakteru nebyl použit faktor volby vysokopevného materiálu). Na základě analýzy byly pomocí metody nejmenších čtverců vypočteny odhady jednotlivých koeficientů a získána následující výběrová regresní funkce

$$d_p = 0,55 + 0,255 \cdot I_{sv} + 0,239 \cdot T_{sv} - 0,344 \cdot F_{sv}, \quad (25)$$

kde d_p je průměr svarového bodu (mm), I_{sv} je svářecí proud (kA), T_{sv} je čas svařování (per) a F_{sv} je přitlačná síla elektrod (kN). Uvedená rovnice je platná uvnitř pracovního rozsahu procesu bodového svařování daného úrovněmi regulovatelných parametrů procesu.

Uvedený regresní model má p-hodnotu = 0,044, která je menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Hypotéza H_0 o nezávislosti veličin dle uvedené funkce se při dané hladině α zamítá. Podrobná data provedené regresní analýzy jsou uvedena v příloze E.

Analýza robustnosti nastavení parametrů

Opakováním experimentu bylo získáno více výsledků každého pokusu. Výsledky bylo třeba transformovat do jedné hodnoty. Výše byla provedena analýza dat pomocí aritmetického průměru. Průměr však nepopisuje rozložení dat a jeho rozlišovací schopnost je malá. Výsledky experimentu s opakováním je třeba kvantifikovat veličinou, která v sobě zahrnuje jak průměr, tak směrodatnou odchylku. Veličinou, ve které je obsažen průměr i směrodatná odchylka je střední kvadratická odchylka (*MSD*).

Střední kvadratickou odchylku lze pro charakteristiku jakosti typu B (čím větší, tím lepší) vypočítat podle vztahu

$$MSD = \frac{\left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right)}{n}. \quad (26)$$

MSD je střední kvadratickou odchylkou od cílové hodnoty charakteristiky a její hodnota by měla být pokud možno co nejnižší. Transformací *MSD* lze získat obecnou definici poměru signál/šum (*S/N*), který je měřítkem robustnosti.

$$S / N = (-10) \cdot \log(MSD) \quad (27)$$

U poměru *S/N* je žádoucí co možná nejvyšší hodnota. Jeho jednotkami jsou decibely (dB). Zvýšení poměru *S/N* o 3 dB znamená dvojnásobné zlepšení robustnosti.

Po transformaci výsledků opakování pokusů na novou charakteristiku jakosti v podobě poměru signál / šum, která u jednotlivých kombinací faktorů kvantifikuje robustnost jejich nastavení (odolnost vůči vnějším vlivům šumových faktorů), byla pro analýzu rozptylu získána data uvedená v tabulce 6-14.

Pokus	A	B	Int. AxB	C	Int. AxC	Int. BxC	D	Y (dB)
1	1	1	1	1	1	1	1	15,54
2	1	1	1	2	2	2	2	12,32
3	1	2	2	1	1	2	2	16,62
4	1	2	2	2	2	1	1	15,85
5	2	1	2	1	2	1	2	14,08
6	2	1	2	2	1	2	1	14,23
7	2	2	1	1	2	2	1	17,00
8	2	2	1	2	1	1	2	16,68

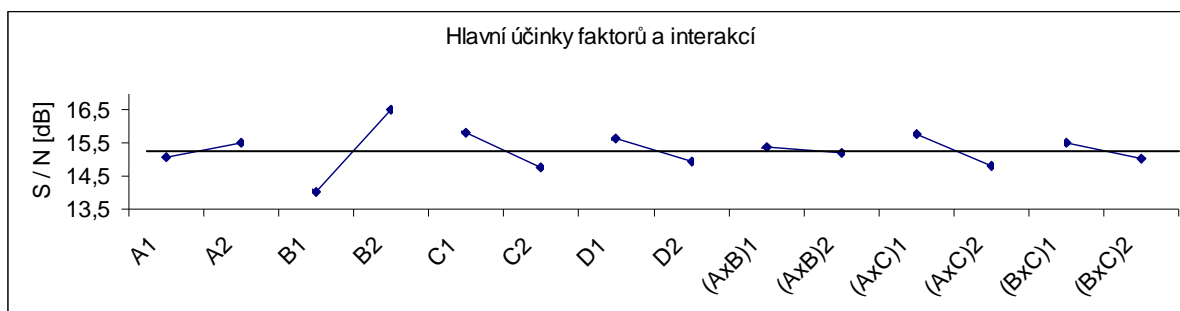
Tab. 6-14: Návrh experimentu a výsledky poměru S/N

Další postup ANOVA byl s výše uvedeným postupem, kde byl sledovanou charakteristikou jakosti aritmetický průměr, totožný.

Hodnoty průměrných a hlavních účinků jednotlivých faktorů a interakcí na robustnost jsou uvedeny v tabulce 6-15 a grafu 6-7.

Sloupec	Faktor / interakce	Úroveň 1 – prům. účinek	Úroveň 2 – prům. účinek	Hlavní účinek
1	A	15,08	15,50	0,42
2	B	14,04	16,54	2,49
3	int. AxB	15,38	15,19	-0,19
4	C	15,81	14,77	-1,04
5	int. AxC	15,77	14,81	-0,96
6	int. BxC	15,53	15,04	-0,49
7	D	15,65	14,92	-0,73

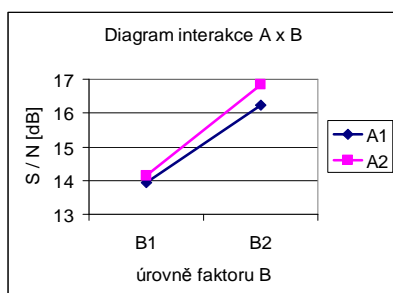
Tab. 6-15: Průměrné a hlavní účinky faktorů a interakcí (S/N)



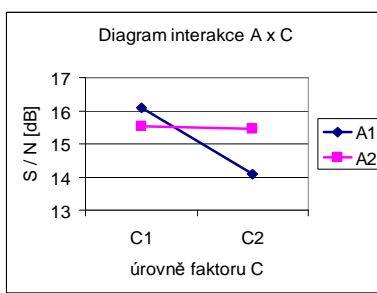
Graf 6-7: Hlavní účinky faktorů a interakcí (S/N)

Jelikož je taktéž u poměru signál/šum požadovaná co možná nejvyšší hodnota, ideální kombinací faktorů bez uvažování interakcí je i v tomto případě nastavení $A_2B_2C_1D_1$.

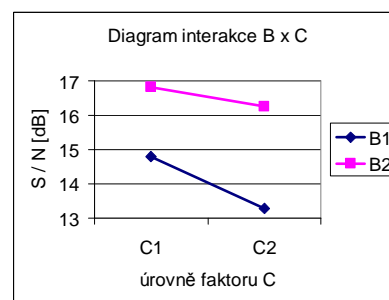
Z pozorovaných interakcí faktorů se i u robustnosti projevila interakce AxC (viz graf 6-9) jako jediná významná (viz grafy 6-8, 6-9 a 6-10).



Graf 6-8: Interakce AxB (S/N)



Graf 6-9: Interakce AxC (S/N)



Graf 6-10: Interakce BxC (S/N)

Významnost a chování interakce AxC, které je patrné z grafu 6-9, rozhodli o konečné úpravě optimální kombinace faktorů na $A_1B_2C_1D_1$.

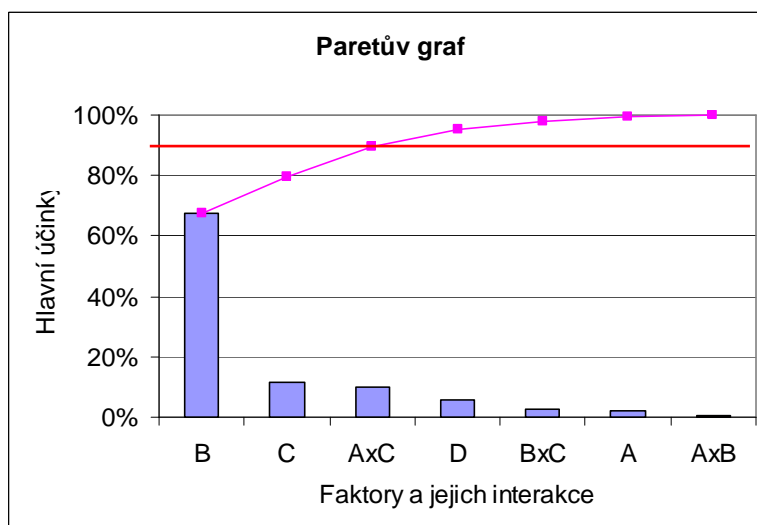
Pro zajištění robustnosti procesu bodového svařování je tedy vhodné udržovat hodnotu parametru času svařování vyšší, přítlačnou sílu elektrod nižší, hodnotu proudu nižší a z dostupných materiálů B-sloupku je za daných podmínek lepší použít materiál BTR165.

Hodnoty ANOVA poměru S/N se oproti hodnotám ANOVA d_p mírně odlišují, jak je patrné z tabulky 6-16 před sloučením nevýznamných faktorů a z tabulky 6-17 po jejich sloučení.

Faktor / interakce	f	S	V	F	S'	P
A	1	0,35	0,35			1,88%
B	1	12,42	12,42			67,62%
C	1	2,16	2,16			11,74%
D	1	1,07	1,07			5,82%
A x B	1	0,07	0,07			0,39%
A x C	1	1,83	1,83			9,94%
B x C	1	0,48	0,48			2,61%
Chyba	0					0,00%
Celkem	7	18,37				100,00%

Tab. 6-16: ANOVA před sloučením nevýznamných faktorů a interakcí (S/N)

Při rozhodování o slučování nevýznamných faktorů pomohl Paretův graf příčin a následků – viz graf 6-11.



Graf 6-11: Paretův graf hlavních účinků (S/N)

Po sloučení faktorů s nízkým procentuálním podílem svých účinků na charakteristiku robustnosti zůstaly pro další analýzu významné faktory času svařování, přítláčné síly elektrod a interakce proudu a síly elektrod.

Faktor / interakce	f	S	V	F	S'	P
A	(1)	(0,35)	sloučeno	-	-	-
B	1	12,42	12,42	25,26	11,93	64,94%
C	1	2,16	2,16	4,39	1,66	9,06%
D	(1)	(1,07)	sloučeno	-	-	-
A x B	(1)	(0,07)	sloučeno	-	-	-
A x C	1	1,83	1,83	3,71	1,33	7,26%
B x C	(1)	(0,48)	sloučeno	-	-	-
Chyba	4	1,97	0,49			18,73%
Celkem	7	19,92				100,00%

Tab. 6-17: ANOVA po sloučení nevýznamných faktorů a interakcí (S/N)

Při výpočtech robustnosti došlo ke zvýšení podílu účinku chyby (soubor méně významných a šumových faktorů) na úkor nejdůležitějšího faktoru času oproti analýze rozptylu d_p .

Bylo vypočteno, že při koeficientu spolehlivosti 0,95 se bude pohybovat hodnota hlavního účinku faktoru B (času svařování) na úrovni B_2 na odezvu poměru S/N v mezích $16,54 \pm 0,97$ dB.

Optimální provedení svaru z hlediska robustnosti nastavení regulovatelných faktorů ($A_1B_2C_1$), které se podílí na procesu bodového svařování, je $17,32 \pm 1,38$ dB při koeficientu spolehlivosti 0,95 (se započtením chování interakcí).

Ověřovací experiment a výpočet poměru S/N ze 3 naměřených hodnot průměrů svarových bodů při výše zmíněném nastavení faktorů vykázal robustnost 16,97 dB, což je hodnota, která spadá do uvedeného intervalu spolehlivosti.

Uvedené hodnocení robustnosti je vzhledem k relativně malému počtu opakování jednotlivých pokusů orientační.

Kombinaci faktorů $A_1B_2C_1$ je možné do sériové výroby doporučit nejen z hlediska pevnosti bodových svarů ale také robustnosti nastavení procesu bodového odporového svařování.

6.1.7 Závěry a doporučení

Z obou uvedených analýz vzešly obdobné výsledky pro závěry z experimentu metodou DOE. Na velikost průměru bodového svaru mají vliv stejné faktory a interakce faktorů jako na robustnost řízení celého procesu odporového bodového svařování dvou aplikovaných heterogenních materiálů různých mechanických vlastností.

Lze konstatovat, že čím větší je průměr svarového bodu, tím větší je robustnost nastavení regulovatelných parametrů, za kterých byl tento bod svařen; resp. čím je větší průměr svarového bodu, tím větší je odolnost řízení procesu svařování vůči vlivům šumových (neregulovatelných) faktorů. Dosažení většího průměru svarové čočky je spojeno s menší variabilitou vlivů faktorů během procesu svařování.

Nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje výstupní charakteristiky jakosti bodového svaru (pevnost a robustnost), je parametr času svařování. V daném pracovním rozsahu, vymezeném úrovněmi faktorů, má čas svařování přibližně 70%-ní účinek na odezvu. Tento faktor je v procesu bodového odporového svařování daných materiálů dominantní. Vyšší

pevnosti svaru a robustnosti procesu je dosaženo při jeho vyšší úrovni. Dá se říci, že pokud je parametr času na svařecím stroji nastaven na vyšší úroveň ($B_2 = 22$ per), s pravděpodobností 95 % nemůže vzniknout bodový svar menší než 6,4 mm v průměru, což je oproti kritériím normy VW 011 05 s dostatečnou rezervou. Se svařecím časem roste průměr svarového bodu a tím i jeho pevnost.

Druhým nejvýznamnějším faktorem v tomto procesu svařování je přítláčná síla elektrod. Při jejím zvýšení se snižují průchodové odpory mezi svařovanými materiály a mezi elektrodou a materiálem. To způsobuje, že při svařování vzniká méně tepelné energie a tím pádem i méně nataveného kovu v lázni svarové čočky. Čím menší přítláčná síla je elektrodami při svařování vynaložena, tím větší svarová čočka vznikne (potažmo i průměr svarového bodu). Přítláčná síla elektrod má na charakteristiky jakosti—velikost průměru svarového bodu a robustnost procesu bodového odporového svařování—účinek přibližně 10%-ní.

Přítláčná síla elektrod je významným faktorem také v interakci se svařecím proudem. Z grafů jejich interakce 6-4 a 6-9 je patrné, že při nízké hodnotě síly má faktor proudu poměrně významný vliv, zatímco při vysoké úrovni síly ne. Při nízké hladině síly (v experimentu $C_1 = 2,2$ kN) dosahuje nízká úroveň proudu (v experimentu $A_1 = 7,4$ kA) vyšší pevnosti bodového svaru než vysoká úroveň proudu.

Přitom ale pro faktor svařecího proudu platí, že s jeho zvyšováním je dosaženo vyššího průměru svarového bodu a tím i pevnosti. Faktor proudu je méně významným při svém izolovaném účinku na charakteristiku jakosti spoje. To ale platí pouze v jeho pracovním rozsahu, vymezeném úrovněmi $A_1 = 7,4$ kA a $A_2 = 8,4$ kA. Mimo tuto meziúrovňovou oblast vykazuje faktor proudu rapidní negativní účinky na kvalitu svaru, jak bylo zjištěno při iniciačním experimentu testování parametrů.

Co se týče faktoru materiálu, lepší hodnoty pevnosti a větší robustnost při řízení procesu vykazoval materiál BTR165 od firmy Benteler. Rozdíl účinků obou materiálů na charakteristiky jakosti byl ale malý (cca 5 %). Materiál BTR165 měl větší tloušťku a především neměl žádnou antikorozi povrchovou vrstvou oproti materiálu USIBOR 1500 od firmy ArcelorMittal.

Povrchová vrstva na bázi Al-Si způsobovala při bodovém svařování rozstříky a ty jsou především pro další výrobní procesy lakování svařené karoserie nepřijatelné. Výrobce uvádí, že nahodilé rozstříky se mohou objevit zvláště při aplikaci nových elektrod dokud nedojde k vytvoření ochranného filmu z antikorozi vrstvy materiálu USIBOR 1500 na jejich povrchu [27].

Materiál USIBOR 1500 je lépe chráněn proti korozi, což má z dlouhodobého hlediska pro koncového zákazníka příznivý dopad. Při výběru materiálu B-sloupku je tedy na zvážení manažerů výroby, zda se přikloní spíše k robustnímu řízení vlastního procesu svařování, a nebo se zaměří na požadavky zákazníků ohledně korozi odolnosti karoserií. Nutno však podotknout, že díl B-sloupku není povrchovým dílem, resp. je vnitřním dílem výztuhy karoserie.

Faktory, které byly podle metody DOE vyhodnoceny jako málo významné (podílem svého vlivu méně než 5 %) pro měřenou charakteristiku jakosti, lze řídit (regulovat) ekonomicky nebo se zřetelem na bezpečnost či jiné provozní aspekty výroby.

Ve výrobě karoserií při stavbě automobilů se většinou doporučuje tvrdý režim svařování, což znamená nastavení parametrů vyšších proudů a krátkých časů svařování. Měkký režim znamená menší proudy a delší časy. Důsledkem tvrdého režimu vzniká jemnozrnnější struktura svaru, nižší vnitřní pnutí materiálu a menší deformace v okolí svaru.

Při vlastním návrhu experimentu (DOE) měl však pro danou aplikaci materiálů pozitivní vliv na odezvu pevnosti svaru a robustnosti řízení procesu režim měkký.

7 Materiálové analýzy

K posouzení interakce parametrů výroby dílů B-sloupku z vysokopevné borem legované oceli a parametrů technologie bodového odporového svařování byl pomocí různých metod materiálových analýz zkoumán nejprve samotný základní materiál vysokopevné oceli, který byl následně svařen pro posouzení svařitelnosti a jakosti odporových bodových svarů. Mezi sebou byly svařovány jak materiály stejné (homogenní svarové spoje, př. BTR-BTR), tak i různé (heterogenní svarové spoje, př. BTR-standardní feritická ocel). Na zvolených charakteristikách jakosti byl testován vliv jednotlivých parametrů materiálu nebo procesu svařování.

Analýza základního materiálu referenčního dílu protikusů nebyla pro vlastní práci nutná, protože byly pro srovnání sledovány spíše vlastnosti vysokopevné oceli a materiál nízkopevné karosářské oceli je k tomuto účelu dostatečně homogenní. Jedná se o běžný materiál hlubokotažné oceli feritické struktury, který je za studena tvářen válcováním.

7.1 Analýzy základního materiálu vysokopevné oceli

K testování samotných materiálů BTR165 a USIBOR 1500 byla použita následující metodika a způsoby zkoušení:

- Statická únosnost materiálu při namáhání tahem.
- Fraktografická analýza lomových ploch po statické zkoušce
 - pro stanovení módu lomu v reakci na jakost oceli v dané oblasti,
 - pro identifikaci případných defektních částí lomové plochy.
- Metalografické analýzy
 - vzorků, odebraných z oblastí blízkých odběru vzorků pro statické zkoušky; pro zjištění odpovídajících strukturních charakteristik,
 - vzorků po tahové zkoušce, vykazujících defektní lomové chování.
- Chemické mikroanalýzy
 - pro identifikaci sekundárních fází v návaznosti na výsledky metalografických a fraktografických rozborů,
 - pro rozlišení subvrstev povrchové úpravy materiálu USIBOR.
- Měření tvrdosti metodou mikrotvrdosti HVm
 - pro kvantitativní vyjádření zjištěných strukturních efektů.

Materiálové analýzy byly přednostně zaměřeny na vybrané parametry, u kterých je předpoklad vlivu na svařitelnost jednotlivých částí profilu. Způsob odběru vzorků pro analýzy základního materiálu vysokopevné oceli je uveden v příloze A.

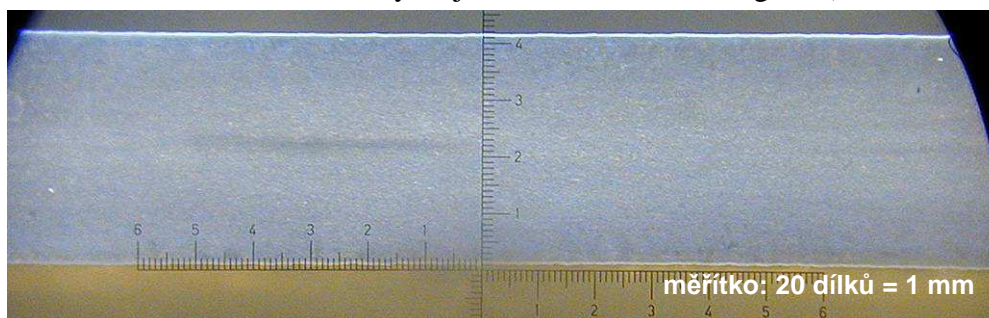
Chemické složení výrobních šarží základního materiálu dílů B-sloupku, které byly použity v této práci, je uvedeno v příloze B. Chemická analýza byla poptána u firmy Žďas, a.s. Výsledky rozborů ukázaly, že jednotlivé výrobní šarže mají jen zanedbatelné rozdíly chemického složení ve vztahu k návaznému procesu bodového odporového svařování.

Malá změna v chemickém složení materiálů znamená proporcionálně velkou změnu v mikrostruktuře materiálu [37].

7.1.1 Strukturní heterogenita materiálu BTR165

U materiálu BTR165 byla zjištěna strukturní heterogenita po tloušťce plechu – viz makroskopický snímek na obr. 7-1 (mikrostruktura uvedena na obr. 7-2). Výskyt, resp. rozsah strukturně heterogenních vrstev byl vyhodnocen v oblastech odpovídajících odběru tří vzorků;

z hodnocení vyplývá nerovnoměrný rozsah v různých částech profilu (konkrétně u vzorku BTR 25-08-2 v dané rovině metalografického výbrusu byla zjištěna homogenní struktura, u vzorků BTR 25-08-1 a BTR 25-08-3 byla zjištěna evidentní heterogenita).

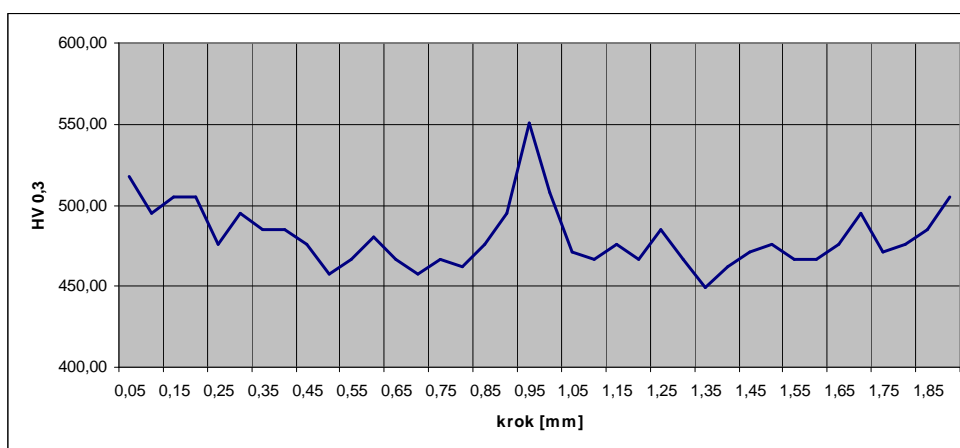


Obr. 7-1: Makrostruktura materiálu BTR165 – vz. BTR 25-08-1



Obr. 7-2: Mikrostruktura materiálu BTR165 – vz. BTR 25-08-3

Uvedený efekt lze spojovat s nerovnoměrnou distribucí uhlíku (nelze prokázat EDX analýzou). V přímém vlivu na pevnostní rozdíly a možný vliv na svařitelnost bylo provedeno srovnávací vyhodnocení tvrdosti v linii kolmo k povrchu po celé tloušťce plechu.



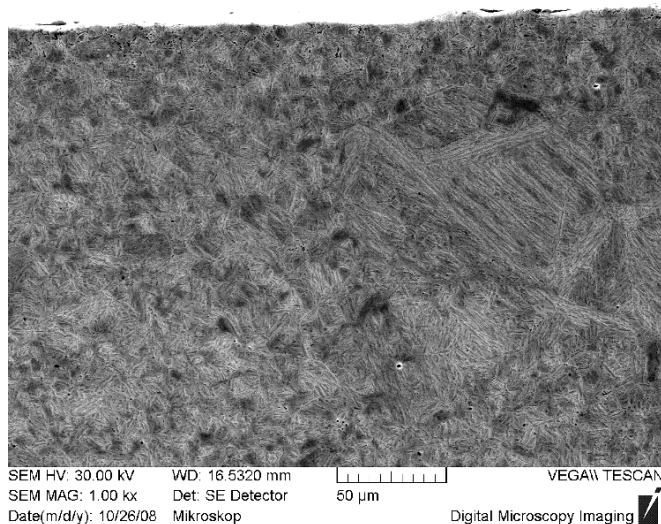
Graf 7-1: Gradient lokálních rozdílů tvrdosti po tloušťce plechu z materiálu BTR165 – vz. BTR 25-08-3

Výsledky měření tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu vzorku prezentuje graf 7-1. Použitá metoda umožňuje kvantitativní vyjádření zjištěného efektu v potřebném měřítku; výsledky měření mikrotvrdosti nelze přímo asociovat s pevností v odpovídajícím mikroobjemu. Zjištěny byly rozdíly cca 80 jednotek HV0,3 bez podstatných rozdílů

v intenzitě zpevnění, popř. tloušťce vrstvy o vyšší tvrdosti u jednotlivých hodnocených vzorků.

U vzorků z materiálu USIBOR 1500 nebyl výskyt diskutované heterogenity zjištěn.

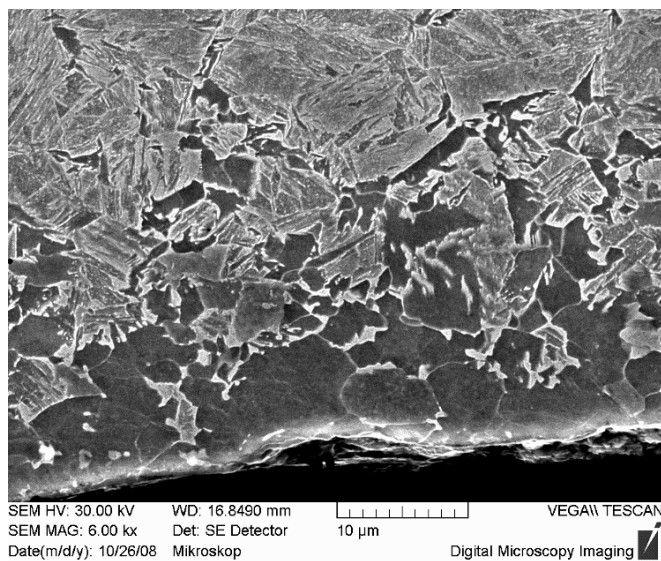
Jako další strukturní heterogenita byly pozorovány rozdíly ve stavbě sekundárního austenitického zrna. Tento efekt lze na základě provedených rozborů označit za izolovaný, bez zjištěné závislosti na části profilu. Situaci dokumentuje obr. 7-3.



Obr. 7-3: Lokální zhrubnutí austenitického zrna – vz. BTR 25-08-2

7.1.2 Oduhličení povrchové vrstvy plechu z materiálu BTR165

U materiálu BTR165 bylo metalograficky zjištěno nerovnoměrné oduhličení povrchu částečně spojené se zhrubnutím struktury. Uvedený efekt nevykazoval systematické rozdíly v hodnocených částech profilu; rozdíly v tloušťce a zároveň intenzitě oduhličení (se zvyšujícím se podílem strukturně volného feritu) byly zjištěny v šířce řádově několika milimetrů po ploše plechu, popř. na obou stranách plechu v hodnocené části metalografického výbrusu – viz obr. 7-4.



Obr. 7-4: Oduhličení povrchové vrstvy – vz. BTR 25-08-2

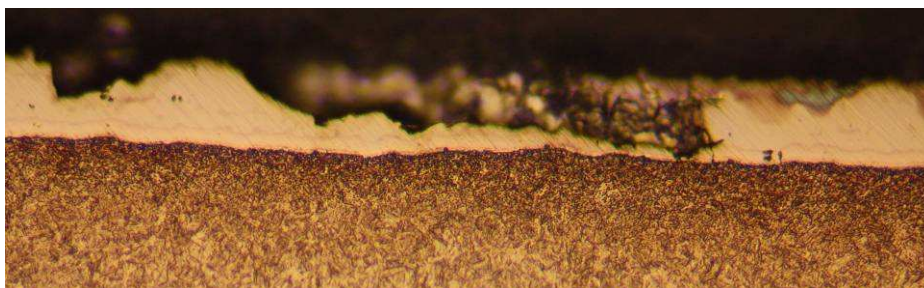
7.1.3 Jakost povrchové vrstvy materiálu USIBOR 1500

Kompaktnost jednotlivých subvrstev

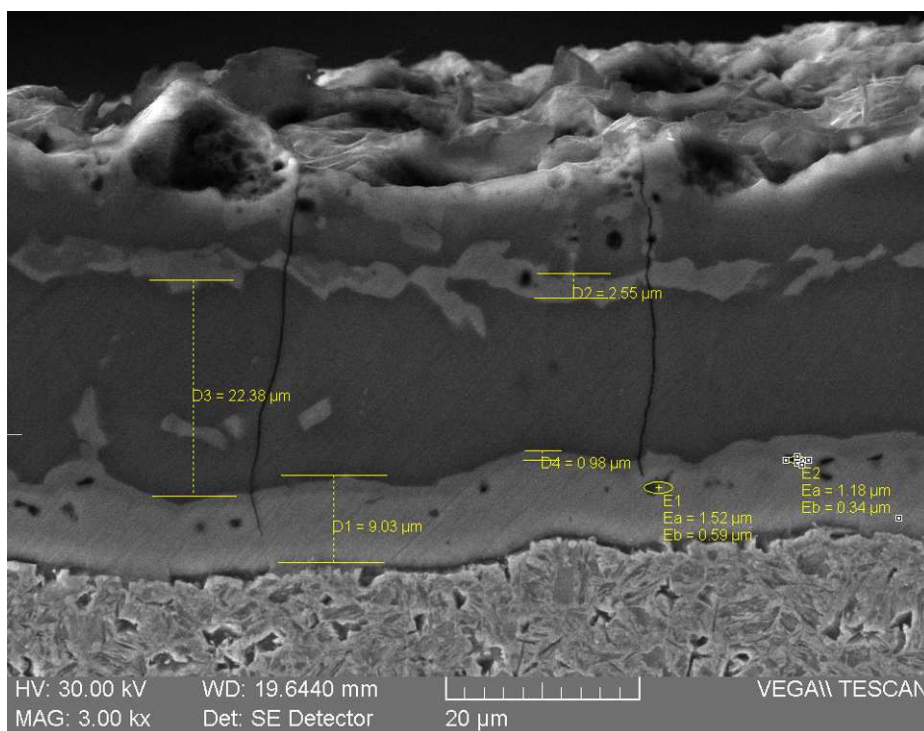
U posuzování kompaktnosti vrstvy v jednotlivých částech profilu (obr. 7-5) nelze vyloučit vliv dodatečného mechanického poškození (např. během přepravy dílů). Proto byly pro možnost hodnocení vlivu jakosti vrstvy na evidované rozdíly svažitelnosti v rámci navržené metodiky provedeny analýzy vnitřní stavby vrstvy v parametrech

- tloušťky subvrstev (obr. 7-5 a 7-6),
- chemického složení subvrstev s rozdílným poměrem Al/Fe (graf 7-2);

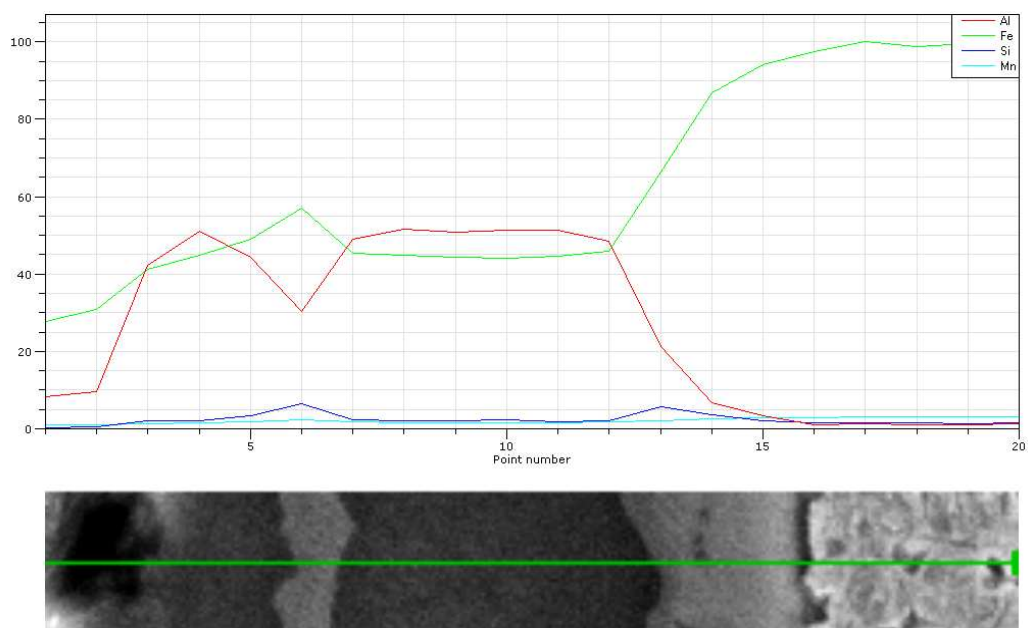
v obou případech v přímé závislosti na postupu (tepelném režimu) aplikované povrchové úpravy.



Obr. 7-5: Lokální poškození povrchové vrstvy – vz. USI 24-81-1



Obr. 7-6: Měření tlouštěk subvrstev – vz. USI 24-81-1



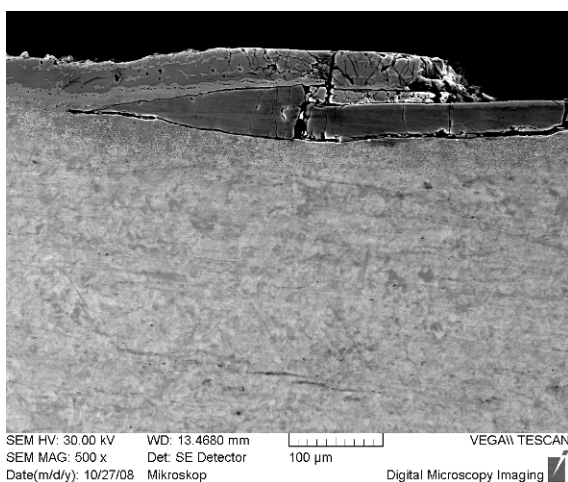
Graf 7-2: Charakteristická stavba subvrstev – vz. USI 24-81-1

Ve vnitřní stavbě povrchové vrstvy materiálu USIBOR 1500 nebyly zjištěny jednoznačně rozdíly v závislosti na části profilu; lze ale předpokládat lokální vliv na svařitelnost, především ve vztahu k oxidaci povrchu a tloušťce a kompaktnosti subvrstvy obohacené Si. Tyto vlivy je nutné posuzovat jednotlivě v přímé reakci na svarový cyklus.

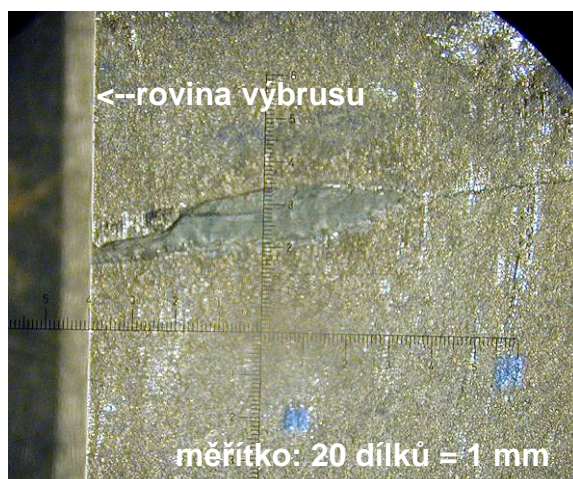
Deklarované výsledky prezentují charakteristické hodnoty uvedených parametrů a představují tak podklad pro možnost následujícího hodnocení ve vztahu k rozptylu únosnosti svarových spojů.

Vady povrchové úpravy

V části hodnoceného profilu z materiálu USIBOR 1500, odpovídající vzorku USI 24-81-1, byla zjištěna specifická nehomogenita povrchové vrstvy – viz obr. 7-7. Rozsah vady v hodnocené části profilu je dokumentován na makroskopickém snímku povrchu – obr. 7-8.



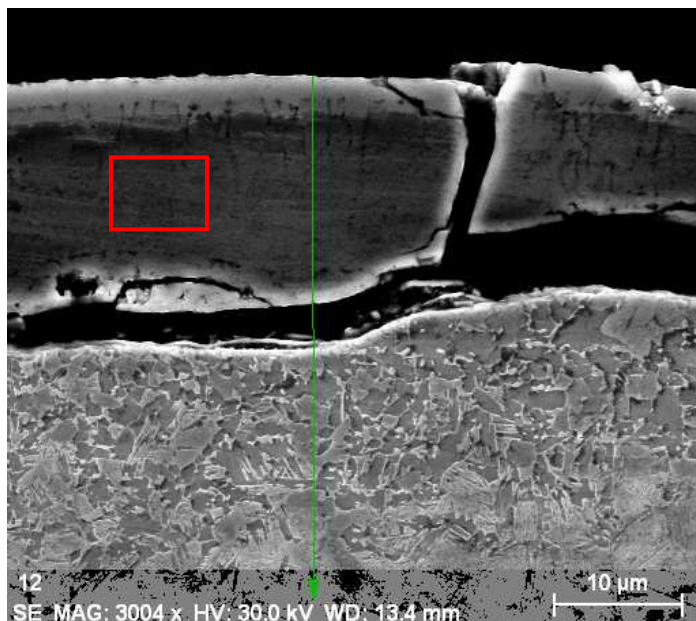
Obr. 7-7: Vada povrchové úpravy – vz. USI 24-81-1



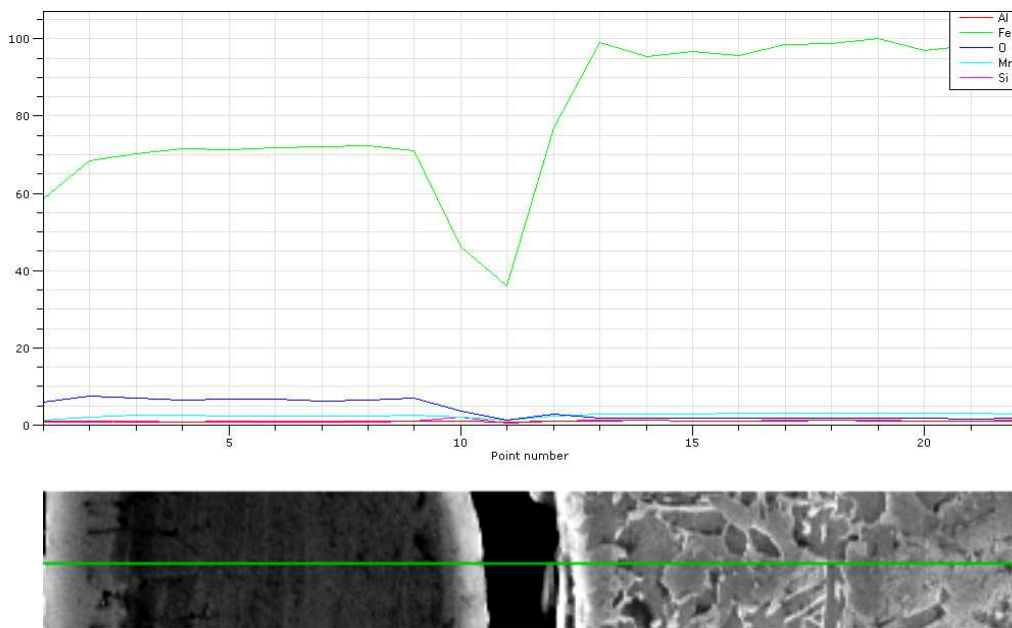
Obr. 7-8: Makroskopický povrchový vzhled vady – vz. USI 24-81-1

Identifikace vady byla provedena chemickou mikroanalýzou. Liniové analýzy byly provedeny v části, kde došlo k částečnému překrytí poškození následující povrchovou vrstvou vs. v oblasti s absencí povrchové vrstvy. Výsledky poukazují na vznik „mezivrstvy“ na bázi

oxidů železa, která lokálně omezila kvalitu povrchové vrstvy na bázi hliníku vytvářené danou technologií (viz obr. 7-9). Zjištěná oxidace vedla k dekohezi vrstvy, následně došlo k souvisejícímu poškození struktury povrchu – oduhlíčení, které v charakteru i rozsahu strukturního vlivu místně odpovídá charakteristice povrchové vrstvy materiálu BTR.

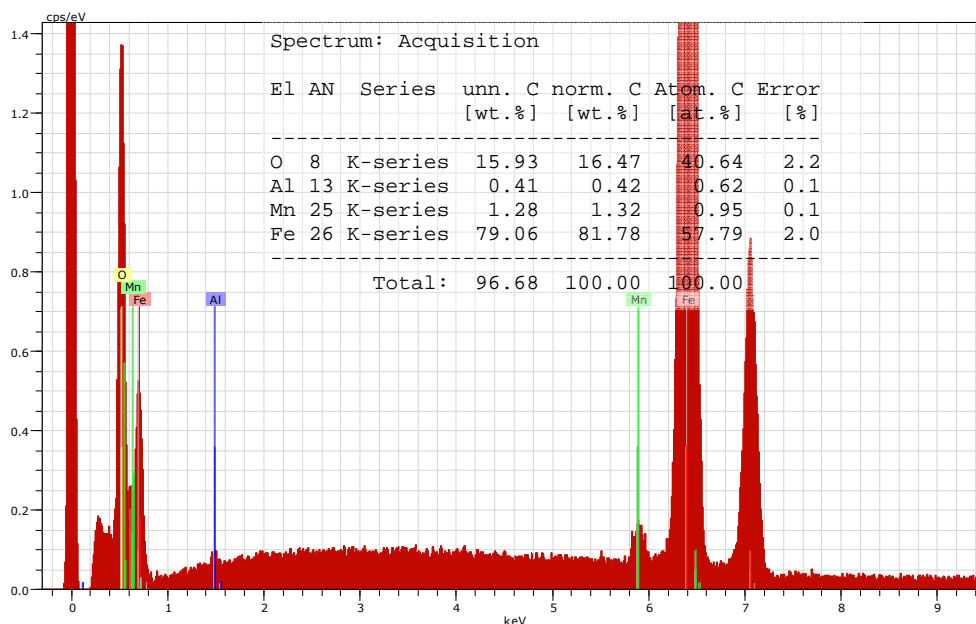


Obr. 7-9: Linie a oblast EDX analýzy oxidické „mezivrstvy“ – vz. USI 24-81-2



Graf 7-3: Liniová EDX analýza oxidické „mezivrstvy“ – vz. USI 24-81-2

Pro korektní kvantitativní analýzu byly liniové rozbory (graf 7-3) doplněny o plošnou analýzu oxidické „mezivrstvy“ (viz spektrum grafu 7-4 – analyzovaná mikroploška 20x20 μm). U zjištěného poškození lze vzhledem k povaze vrstvy i souvisejícím vlivu na kvalitu volného povrchu materiálu předpokládat podstatný vliv na svařitelnost takto zasažené části profilu.



Graf 7-4: Plošná EDX analýza oxidické „mezivrstvy“ – vz. USI 24-81-2

7.1.4 Statické lomové chování aplikovaných ocelí

Ve vybraných částech profilu byly provedeny fraktografické rozborů lomových ploch po statické tahové zkoušce. Předmětem hodnocení byla identifikace

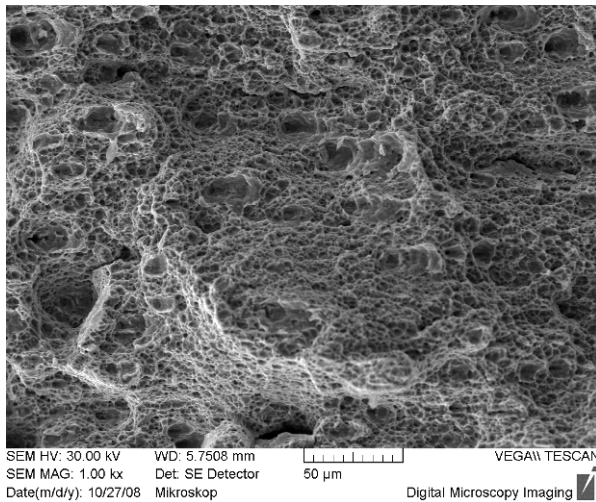
- módu lomu, resp. lokálních rozdílů v návaznosti na výskyt vnitřních imperfekcí materiálu,
- defektních částí lomových ploch v souvislosti se strukturální charakteristikou odpovídajících objemů oceli.

Výše uvedená hodnocení vycházela z fraktografických analýz lomových ploch. Metalografické výbrusy byly vyhotoveny v řezech kolmo na příslušnou lomovou plochu, rovnoběžně s osou vzorků pro tahové zkoušky.

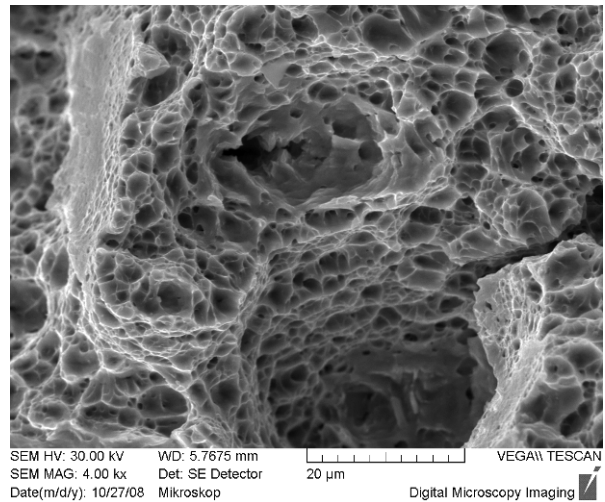
Z hlediska průběhu lomu došlo k typickému omezení rozsáhlé smykové deformace na jednu smykovou rovinu makroskopického skluzu. U sady vzorků, hodnocené v dané etapě řešení, došlo částečně k iniciaci smykové deformace v sekundárním skluzovém systému. (U materiálu USIBOR 1500 je efekt zviditelněn poškozením povrchové vrstvy. Konkrétně došlo k dekohezi mezivrstvy s nižší plasticitou vlivem produkce dislokací směrem k povrchu).

Uvedený efekt obecně svědčí o absenci částic sekundárních fází u předmětného strukturálního typu oceli a zejména o vysoké čistotě testovaného materiálu.

Z hlediska módu lomu byl u obou aplikovaných materiálů zjištěn výlučně mechanismus tvárného porušení s typickou stavbou stříhových můstků oddělujících velice jemné iniciační kavity (viz vybrané mikrofraktografické snímky na obr. 7-10 a 7-11). Pouze izolovaně se projevil vliv inkluzí, konkrétně ve zhrubnutí stavby lomové plochy; rovněž v případě prezenze křehkých inkluzí (př. TiN – obr. 7-11) nedošlo ke změně módu nebo orientace lomu.



Obr. 7-10: Výlučně tvárný mód lomu – vz. USI 24-81-O4

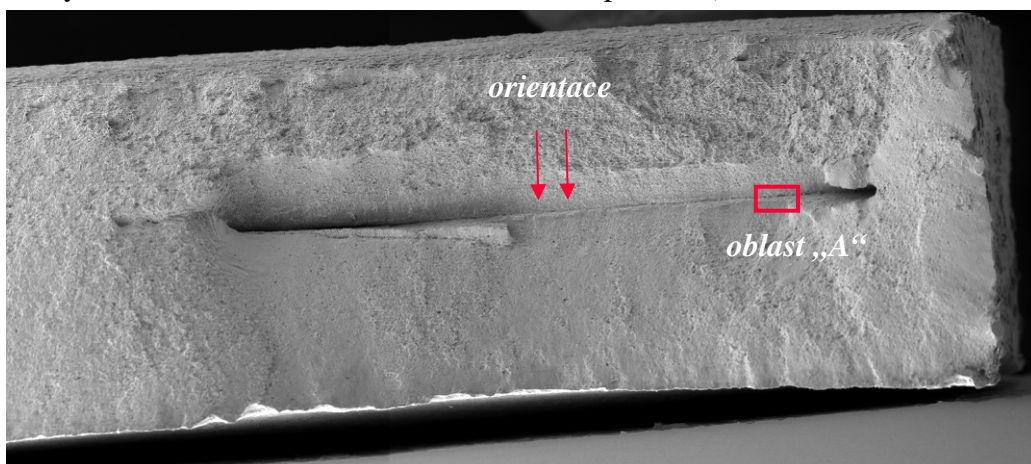


Obr. 7-11: Vliv inkluzí – vz. USI 24-81-O3

7.1.5 Analýzy defektního lomu materiálu USIBOR 1500

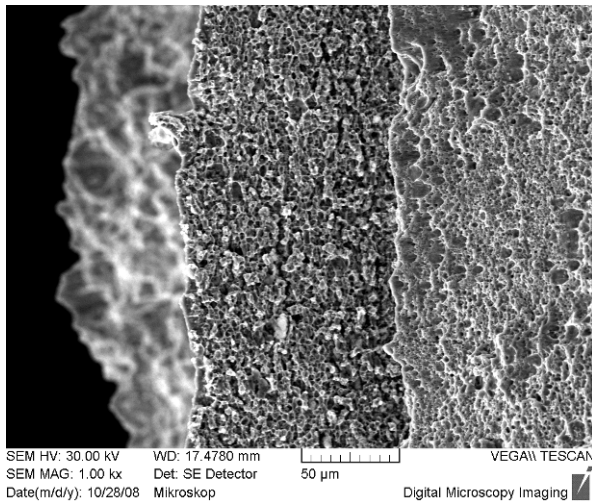
U vzorku BTR 25-08-Y1 byl zjištěn částečně defektní lom – viz přehledový snímek makromorfologie lomové plochy č. 7-12.

Byla zjištěna výrazná delaminace materiálu ve středovém pásmu tloušťky plechu. Defektní lom měl opět tvárný mód porušení, spojený se změnou orientace stříhovových můstků – obr. 7-13, lokálně rovněž iniciací sekundárních trhlin kolmo na lomovou plochu (iniciace efektu, který se v rovině lomu rozvinul do celkového porušení).

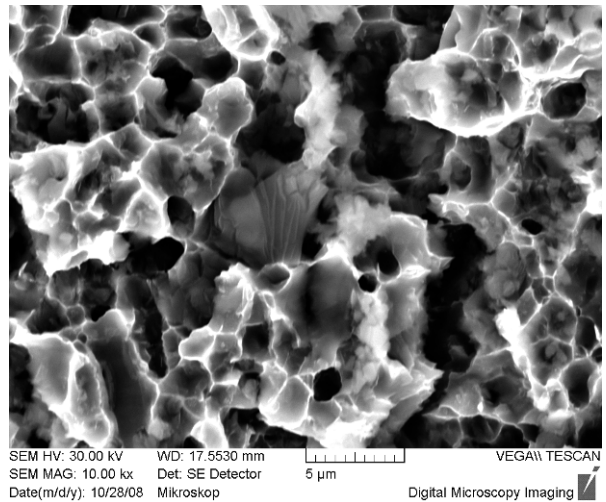


Obr. 7-12: Makroskopický vzhled lomové plochy v části defektního lomu – vz. BTR 25-08-Y1

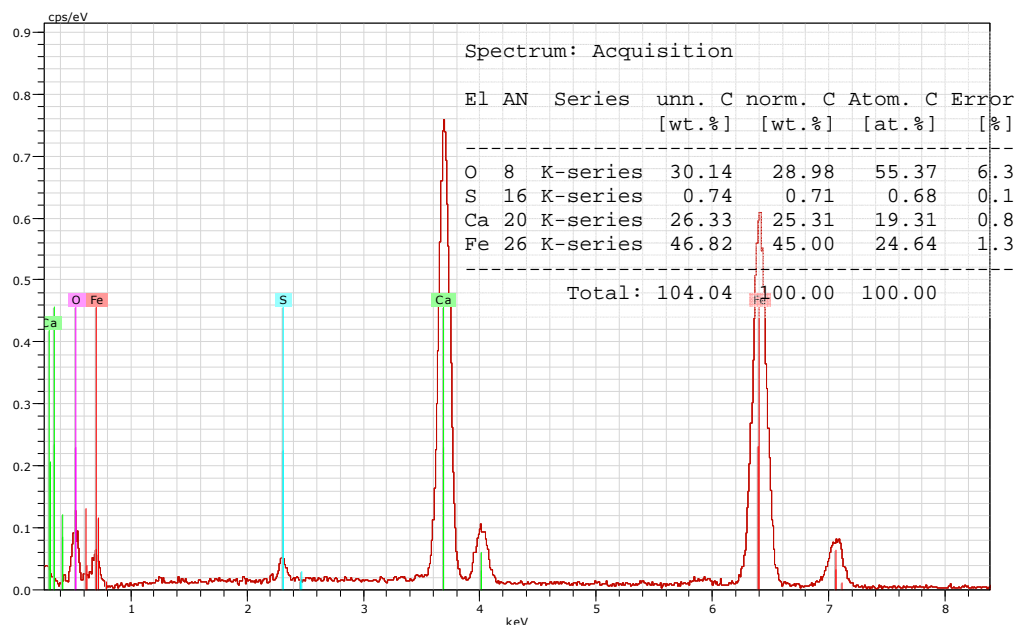
Morfologie defektní části lomové plochy je dokumentována v detailu na obr. 7-14. Ve zde vyznačené orientaci (na snímku 7-12) byly provedeny chemické mikroanalýzy částic vyskytujících se na lomové ploše.



Obr. 7-13: Defektní část lomové plochy – vz. BTR 25-08-Y1 (orientace dle obr. 7-12)



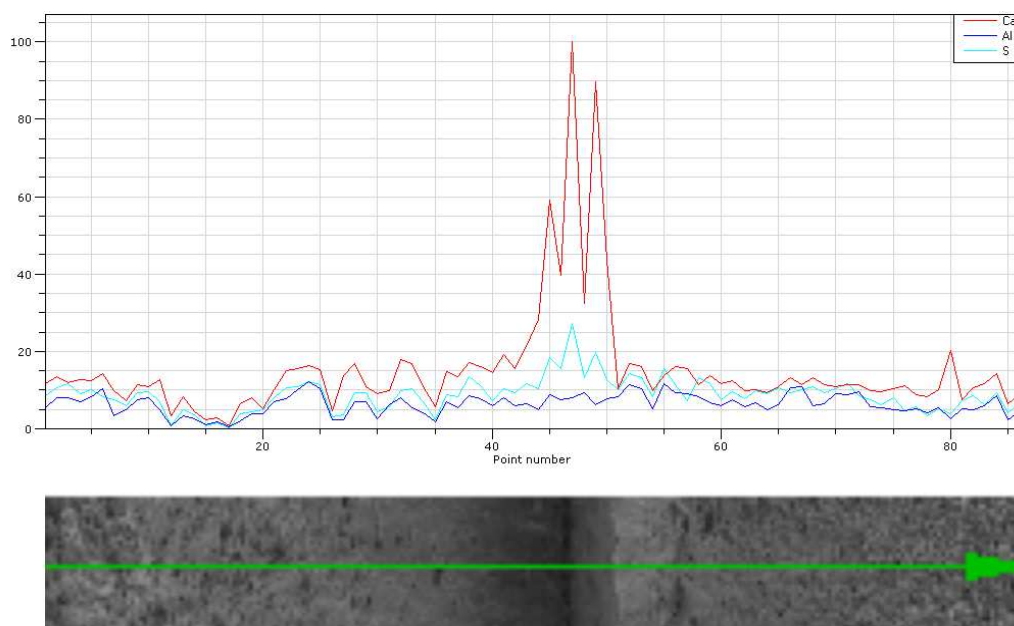
Obr. 7-14: Detail defektní části lomové plochy – vz. BTR 25-08-Y1



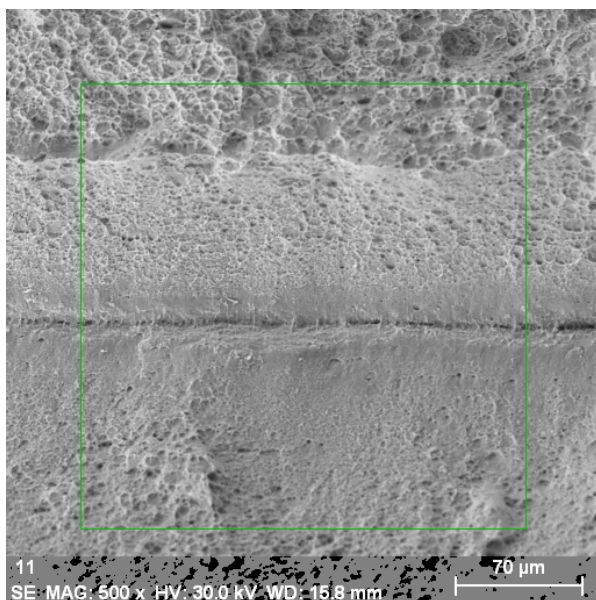
Graf 7-5: Chemická EDX analýza detailu z obr. 7-14

Výsledky prokazují především přítomnost Ca, S a vedle toho zastoupení dalších prvků s vysokou afinitou ke kyslíku. Z uvedeného vyplývá, že výskyt odpovídajících inkluzí, zejména sulfidů, vede ke vzniku mikrospojností ve směru válcování plechu, které se statickým tahovým zatížením rozvinuly do předčasného lomu orientovaného kolmo k ose zatížení.

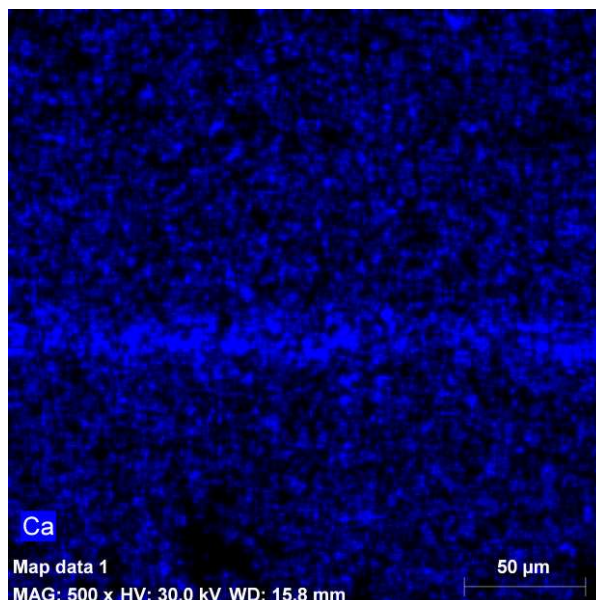
Tyto výsledky potvrzuje vybraná liniová analýza, která efektivně vystihuje odpovídající poměr Ca vs. S v rovině delaminace plechu (graf 7-6). Výskyt Ca v diskutované vrstvě byl rovněž zmapován plošně ve srovnání s okolními oblastmi lomové plochy – viz mapping obr. 7-15 a 7-16.



Graf 7-6: Pásmo delaminace oceli – oblast „A“ z obr. 7-12



Obr. 7-15: Pásmo delaminace oceli – oblast „A“ z obr. 7-12



Obr. 7-16: Mapping pásma delaminace oceli – oblast „A“ z obr. 7-12

Plošná mikroanalýza byla následně provedena v oblasti zjištěných kavit v rovině delaminace plechu – výběr uvádí výsledek analýzy plochy 10x5 μm. Výsledky potvrzují závěry na konto zdroje defektního lomu, zjištěné v návaznosti na fraktografii.

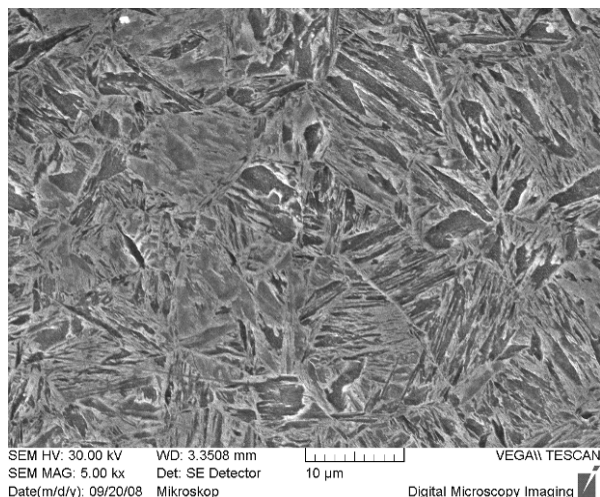
Vápník se do zkoumaného materiálu pravděpodobně dostal jako dezoxidační činidlo během etapy lití.

Vzhledem k rozhodující tendenci materiálu ke tvárnému módu lomu, vedly identifikované velice jemné sekundární částice k nízkoenergetické tvárné separaci, která lokálně podstatně snížila únosnost materiálu. U diskutované vady je v případě kolize takto poškozené vrstvy s tepelným (popř. napěťovým) polem svarového cyklu, předpoklad podstatného vlivu na kvalitu spoje (konkrétně vlivem prezenze nízkotavitelných inkluzí).

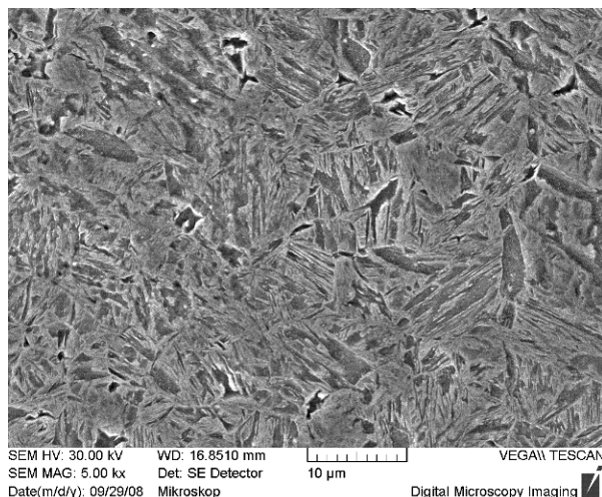
7.1.6 Strukturní charakteristika ocelí

U obou typů předmětných ocelí byla vyhotovena fotodokumentace charakteristické mikrostruktury v jednotlivých částech profilu, která byla hodnocena v návaznosti na výsledky testování statické únosnosti. (Výběr z fotodokumentace viz obr. 7-17 a 7-18.)

Chemické složení předurčuje danému materiálu martenzitickou strukturu. Během provedených analýz byla u všech vzorků pozorována struktura martenzitu téměř ze 100 % tak, jak deklaruje výrobce materiálu [27].



Obr. 7-17: Charakteristická mikrostruktura materiálu USIBOR 1500 – vz. USI 24-81-3



Obr. 7-18: Charakteristická mikrostruktura materiálu BTR165 – vz. BTR 25-08-2

7.1.7 Shrnutí výsledků analýz základních materiálů

Prezentované výsledky představují výběr zkoušek provedených v rámci hodnocení možného vlivu rozptylu materiálových charakteristik na svařitelnost předmětných vysokopevnostních materiálů.

V dané etapě prací byly provedeny materiálové analýzy vybraných šarží po celém profilu dílu B-sloupku tak, aby umožnily specifikaci parametrů jakosti daných typů ocelí v možném vztahu ke svařitelnosti. V rámci prezentovaného výběru byly hodnoceny vybrané parametry, které vypovídají o lokálních rozdílech v jakosti ocelí; pozorované efekty byly identifikovány pro navazující etapy rozborů svarových spojů.

Výsledky testování statické pevnosti prokázaly rozdíly v závislosti na části profilu u materiálu BTR165 (cca 290 MPa); u materiálu USIBOR 1500 byly zjištěny rozdíly výrazně nižší (cca 120 MPa při vyloučení hodnot pod zjištěným vlivem vad), a to bez evidence závislosti na pozici v testovaném profilu [48].

Lze konstatovat, že u zjištěných materiálových efektů, u kterých je předpoklad negativního vlivu na svařitelnost (zejména vnitřní heterogenita materiálu BTR165 a vady povrchové úpravy materiálu USIBOR 1500), nebyla pozorována „systematická“ závislost na části profilu. Z hlediska pevnostních rozdílů je podstatný rozdíl ve výsledcích u testované dvojice materiálů, konkrétně pozitivnější výsledky u materiálu USIBOR 1500, kde byla zjištěna snížená citlivost na změny geometrie po profilu výlisku.

7.2 Materiálové analýzy heterogenních svarových spojů

K rozboru vlastností heterogenních bodových svarů bylo použito několik druhů testování.

U svařených vzorků byly zkoumány mechanické vlastnosti při tahových zkouškách ve stříhu a byla zkoumána i jejich tvrdost pomocí testů mikrotvrdosti jednotlivých oblastí svaru podle Vickerse.

K pozorování následků přeměny fyzikální struktury materiálu vlivem teplotního cyklu bodového odporového svařování byla použita metalografie.

Fraktografie byla užita při zkoumání lomových ploch, které vznikly vlivem namáhání svarového spoje při tahové zkoušce stříhem.

7.2.1 Pevnostní zkoušky

Pevnost bodových odporových svarů je zpravidla zkoušena stříhem, protože je možné zkoušku uskutečnit na běžném trhacím stroji bez použití dalších přípravků. Stříhové napětí vzniká působením paralelních opačně působících sil, ležících v rovině stříhu, když tyto zatěžující síly nevyvozují ani moment v ohybu, ani moment v krutu. Čistého smyku je ale těžké prakticky dosáhnout. V průběhu stříhu vzorků z tvárných materiálů dochází k přemístění působiště stříhových sil o hodnotu x , čímž vzniká přídatný ohyb od dvojice sil s momentem

$$M_o = F \cdot x , \quad (28)$$

kde F je tažná síla trhacího stroje a x je vzdálenost rovnoběžných os svařených částí vzorku.

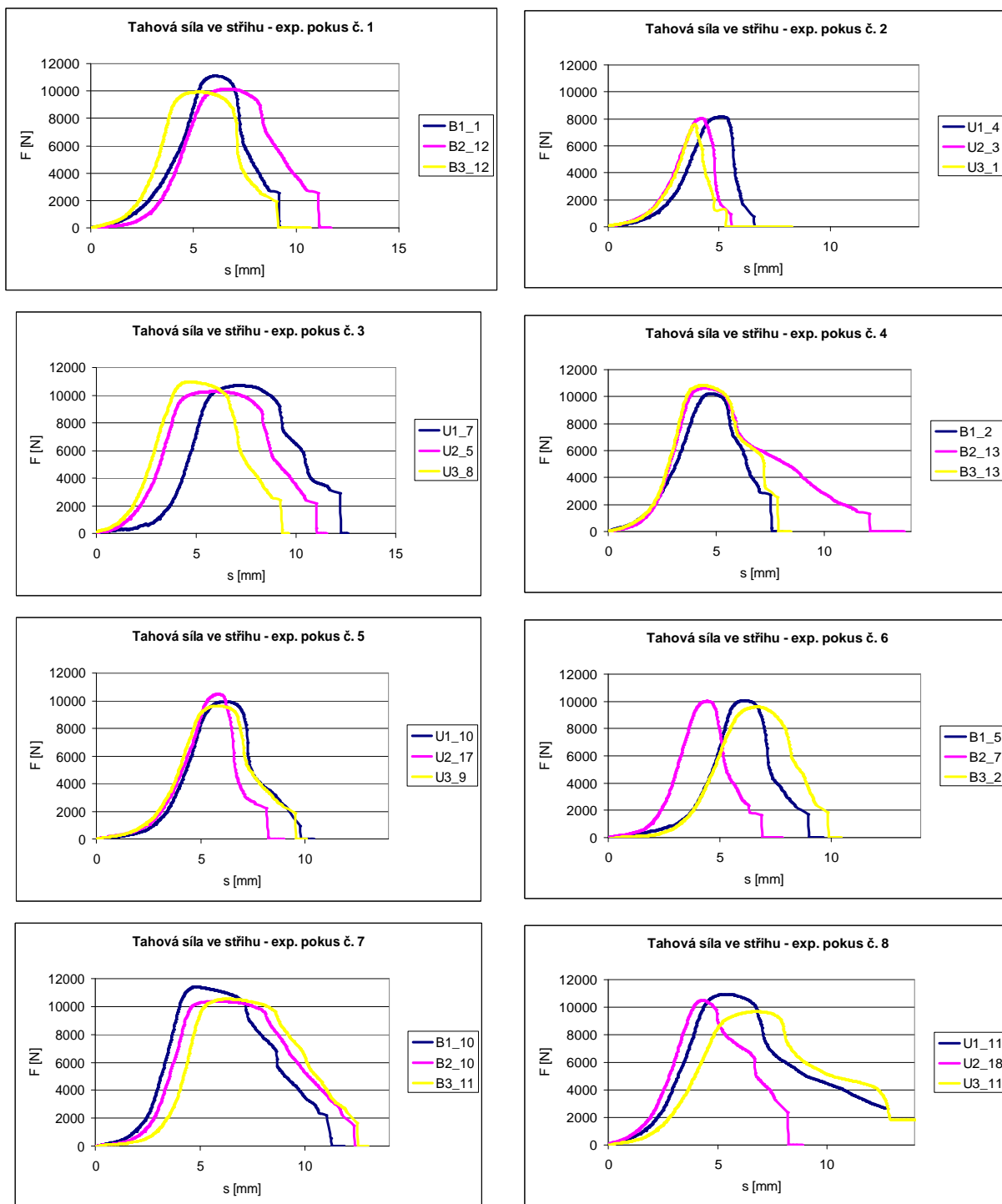
Na snímku 7-19 je ukázka průběhu namáhání vzorku při vlastním experimentu.



Obr. 7-19: Tahová zkouška stříhem u bodového odporového svaru

U tahových zkoušek byly při jednotlivých nastaveních parametrů svařování (stejných jako u metody DOE) naměřeny charakteristiky průběhu závislosti tažné síly na posuvu čelistí trhacího stroje.

Jednotlivé pevnostní charakteristiky heterogenních bodových svarů z provedených tahových zkoušek jsou znázorněny v grafu 7-7.



Graf 7-7: Tahové zkoušky ve střihu při nastavení dle pokusů metody DOE (3x8)

Z jednotlivých grafů je patrné, že nejmenší mezní síly F_{max} bylo dosaženo při nastavení parametrů svařování 2. pokusu experimentu. Při tomto nastavení byly hodnoty proudu a času svařování nastaveny na nízkou úroveň ($I_{sv} = 7,4$ kA; $T_{sv} = 15$ per) a hodnota přítláčné síly elektrod byla na své vysoké úrovni ($F_{sv} = 4,0$ kN). Naopak při pokusu č. 7, tj. při vysokých úrovních proudu a času svařování ($I_{sv} = 8,4$ kA; $T_{sv} = 22$ per) a při nízké úrovni síly elektrod ($F_{sv} = 2,2$ kN), bylo dosaženo nejvyšších hodnot F_{max} ze všech pokusů experimentu. Mimo pokus č. 2 byly u všech pokusů naměřeny hodnoty F_{max} mezi 10÷11 kN.

Minimální tahová síla střihem (F_{min}) je při daných tloušťkách plechů stanovena normou VW 011 05 na hodnotu 5,1 kN. Její velikost je odvislá od tloušťky tenšího ze

svarovaných plechů ($t = 1,5$ mm). Tuto hodnotu splnily všechny testované vzorky svařené při různých nastaveních svářecích parametrů, které byly zkoumány při návrhu experimentu (DOE). Zmíněná norma předepisuje také minimální průměr svarového bodu $d_{Pmin} = 4,9$ mm a průměru svarové čočky $d_{Lmin} = 4,3$ mm. Pokus č. 2 nesplnil kritérium normy pro hodnotu d_{Pmin} a později při metalografických pozorováních ani d_{Lmin} .

Pro srovnání naměřených dat mezních tahových stříhových sil (F_{max}) a průměrů svarových bodů (d_P) jednotlivých svařených vzorků experimentu je nutné podívat se konkrétně do tabulky 7-1.

Pokus	F_{max} (Y_1) [kN]	F_{max} (Y_2) [kN]	F_{max} (Y_3) [kN]	F_{max} (průměr) [kN]	d_P (Y_1) [mm]	d_P (Y_2) [mm]	d_P (Y_3) [mm]	d_P (průměr) [mm]
1	11,11	10,17	9,94	10,40	6,1	6,2	5,7	6,0
2	8,16	8,04	7,58	7,93	4,2	4,3	4,0	4,1
3	10,71	10,26	10,97	10,65	7,0	6,9	6,5	6,8
4	10,23	10,63	10,83	10,56	5,6	6,9	6,4	6,3
5	9,93	10,45	9,60	9,99	5,0	5,1	5,1	5,1
6	10,06	10,02	9,60	9,89	5,0	5,0	5,4	5,2
7	11,40	10,36	10,53	10,76	7,5	7,0	6,8	7,1
8	10,94	10,51	9,69	10,38	7,6	6,2	6,9	6,9

Tab. 7-1: Naměřená data F_{max} a d_P

Zkoušky pevnosti jsou z hlediska kvality svarů karoserie automobilu klíčové. Bodové odporové svary jsou nejčastější technologií spojování tenkých plechů při stavbě vozu. Je tomu tak především pro nízké pořizovací a provozní náklady této technologie a její vhodnost k automatizaci v sériové výrobě. Pevnost odporových bodových svarů má podstatný vliv na pasivní bezpečnost posádky automobilu při nárazu. Stříhové namáhání bodových svarů odpovídá reálným situacím (směrům) namáhání při provozu automobilu.

U dané kombinace svařovaných materiálů byla pevnost celého svaru daná pevností základního materiálu méně pevného nízkouhlíkového plechu. K lomům docházelo po obvodu svarové čočky v materiálu tohoto plechu. Svarová čočka byla u všech testovaných vzorků „vyloupnuta“ (vylomena) z materiálu nízkopevného plechu a ulpěla na plechu vysokopevném.

Korelace d_P a F_{max}

Naměřená data F_{max} a d_P u jednotlivých pokusů byla podrobena korelační analýze za účelem zjištění těsnosti jejich vzájemného ovlivňování [49]. Jsou-li veličiny závislé, je třeba jejich závislost kvantitativně vyjádřit. K vyjádření míry závislosti je používán korelační koeficient (ρ). Výběrový korelační koeficient r lze vypočítat podle vzorce

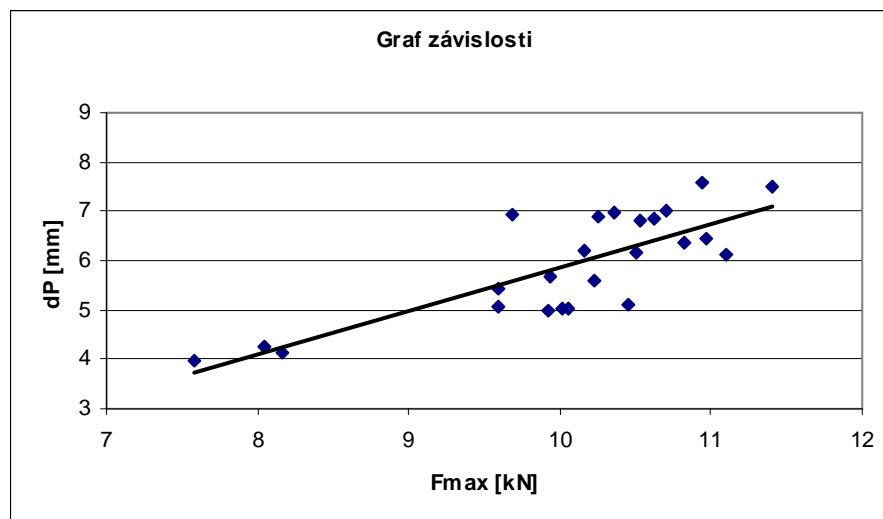
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (29)$$

Zda jsou veličiny F_{max} a d_P korelované či nikoliv lze zjistit testováním hypotézy $H_0: \rho = 0$ (mezi F_{max} a d_P neexistuje závislost) proti alternativní hypotéze $H_1: \rho \neq 0$ (mezi F_{max} a d_P existuje významná závislost).

Z měření veličin F_{max} a d_P (počet měření $n = 24$) byl zjištěn výběrový koeficient korelace $r = 0,794$. Při hladině významnosti $\alpha = 0,01$ bylo ze statistických tabulek zjištěno, že

kritická hodnota korelačního koeficientu při daném počtu měření je $r_{\alpha} = 0,515$. Na základě těchto skutečností ($r > r_{\alpha}$) je v uvedeném případě nutno zamítnout hypotézu H_0 .

K tomu, že veličiny F_{max} a d_P jsou korelované, došel i Wei Li et al. [23]. Mezi veličinami, které popisují pevnost svarových bodů, existuje silná závislost – viz graf 7-8. Veličina d_P je tedy vhodným ekvivalentem veličiny F_{max} .



Graf 7-8: Závislost veličin F_{max} a d_P

7.2.2 Fraktografie

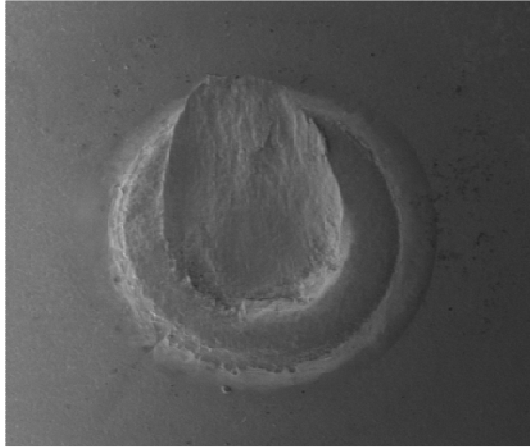
Dříve uvedená destrukční mechanická zkouška tahem poskytuje tři druhy informací:

- kvantifikované mechanické vlastnosti spoje,
- grafický záznam o průběhu zatížení a
- fraktografické údaje o jeho lomu [30].

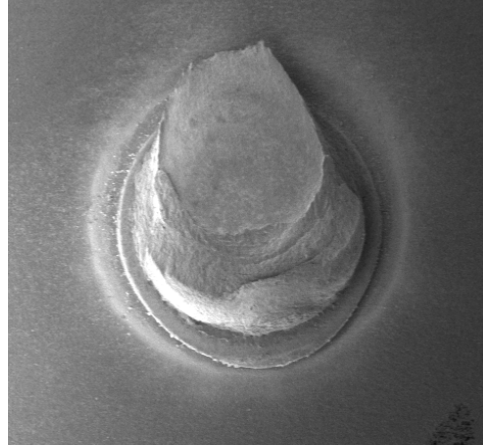
Analýza lomu – fraktografie vhodně doplňuje údaje o mechanických vlastnostech materiálu spoje. Fraktografie se provádí většinou tehdy, když je třeba získat informace o metalurgických a strukturních činitelích, které ovlivnily proces porušení. Jsou to například čistota, krystalizace, velikost zrna apod.

Fraktografický rozbor povrchu lomu umožňuje zjistit kritická místa, která se porušením na povrchu lomu odhalily, a umožňuje vysvětlit příčinu porušení. Předností fraktografie oproti metalografické analýze je, že fraktografie umožňuje zjistit kinetiku porušení, protože vzhled a tvar lomu prozrazuje konečnou fázi lomového procesu. Lomový proces je funkcí fyzikálního stavu materiálu (chemického složení a struktury) a podmínek namáhání.

Fraktografický rozbor byl při experimentu proveden u dvou roztržených vzorků, na které bylo aplikováno nastavení parametrů metodou DOE (přesné označení dle předchozí kapitoly). První vzorek D2 byl bodově svařen z hlediska pevnosti při nejméně vyhovujících parametrech. Druhý zkoumaný vzorek D7 naopak vykázal při tahové zkoušce ze všech svařených vzorků nejvyšší pevnost. Vzniklé módy lomu byly výsledkem namáhání svarového bodu při tahové zkoušce stříhem. Při takovémto namáhání dochází u bodových svarů k vylomení svarové čočky z materiálu méně pevného feritického plechu.



Obr. 7-20: Jamka po vylomení svarového bodu – vzorek D2, zv. cca 10x

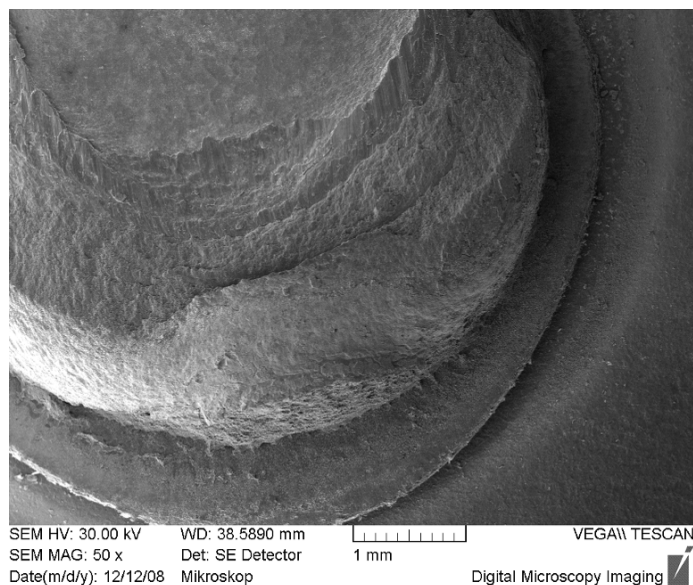


Obr. 7-21: Vylomený svarový bod - D7, zv. cca 10x

Když lomová trhlina probíhá napříč svarovou čočkou, dochází jen k malým útlumům energie při crash-testech [37], proto je obecně upřednostňován mód lomu mimo oblast svarové čocky tak, jak tomu bylo i při vlastním experimentu.

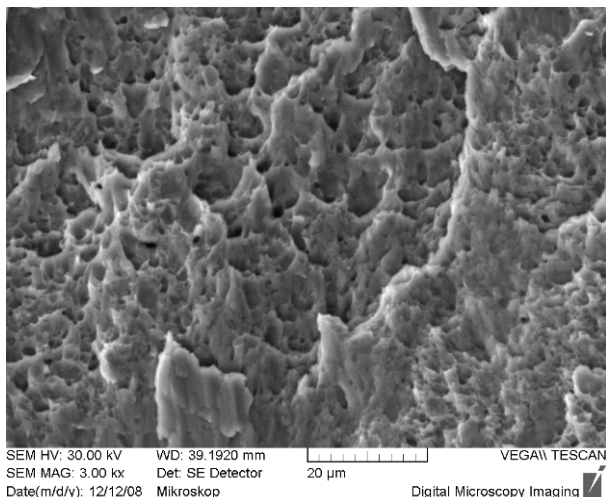
Ze snímku 7-20 je patrné, že u vzorku D2 nedošlo k vytržení svarového bodu po celé tloušťce profilu feritického plechu. Naproti tomu u vzorku D7 byl svarový bod vytržen až k povrchu plechu (obr. 7-21). Struktura svarové čocky má větší pevnost než struktura základního materiálu feritického plechu. U vzorku D2 vznikla rozměrově menší svarová čocka než u vzorku D7. Mezi svarovou čockou a povrchem plechu zůstala silnější vrstva tepelně neovlivněného základního materiálu, a proto u vzorku D2 nedošlo k úplnému odtržení bodu v celém profilu nízkopevného plechu jako tomu bylo u ostatních testovaných svarových bodů. U ostatních bodů došlo k tepelnému ovlivnění základního materiálu z velké části profilu vždy téměř až k povrchu plechu.

Z obr. 7-22 jsou patrné jednotlivé stupně lomu. Tyto stupně jsou dány různou strukturou oblastí svaru dle míry vlivu tepelného cyklu během procesu svařování a následného ochlazování. Jak bylo zjištěno během metalografických zkoušek, tepelně ovlivněná oblast nízkopevného plechu je tvořena převážně hrubým zrnem acikulárního feritu. Oblast základního materiálu je tvořena polyedrickým zrnem feritu jemnější struktury.

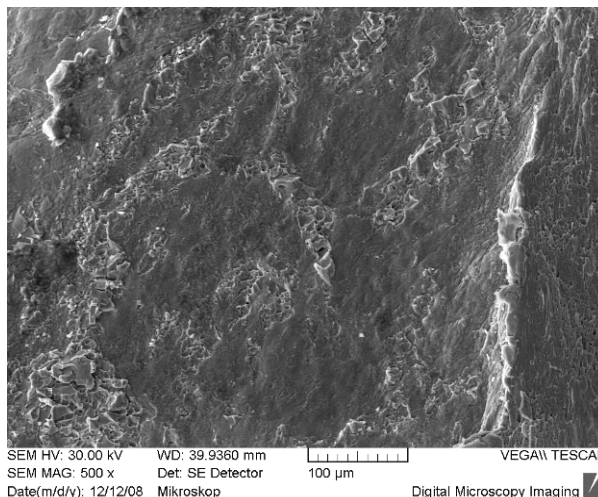


Obr. 7-22: Lom v oblastech vně svarové čocky v několika stupních – vz. D7

Mód lomu při vytržení heterogenního svarového bodu byl výlučně tvárný (obr. 7-23), podle rozsahu plastické deformace, která provázela šíření lomové trhliny, houževnatý. Při porušení materiálu se uplatňuje smyk při kombinovaném účinku velkého počtu skluzových systémů (obr. 7-24). Oddělení proběhlo smykem v řadě mikrolokalit. Výsledkem je, že na lomu je možné pozorovat jamky s vytaženými okraji skloněnými pod úhlem 30 až 45° k ose tahu [30]. Jamky jsou protažené vlivem účasti ohybové složky při namáhání tahem, což zapříčinilo postupné tvárné tahové roztržení materiálu.



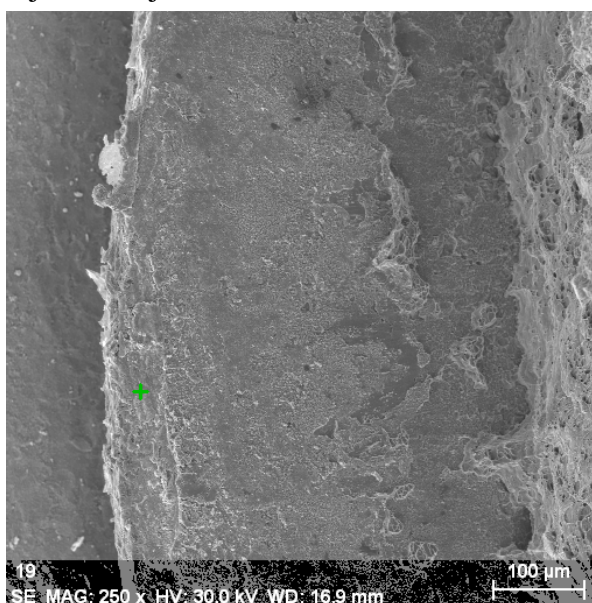
Obr. 7-23: Tvárná charakteristika lomové plochy materiálu nízkopevné oceli – vz. D2



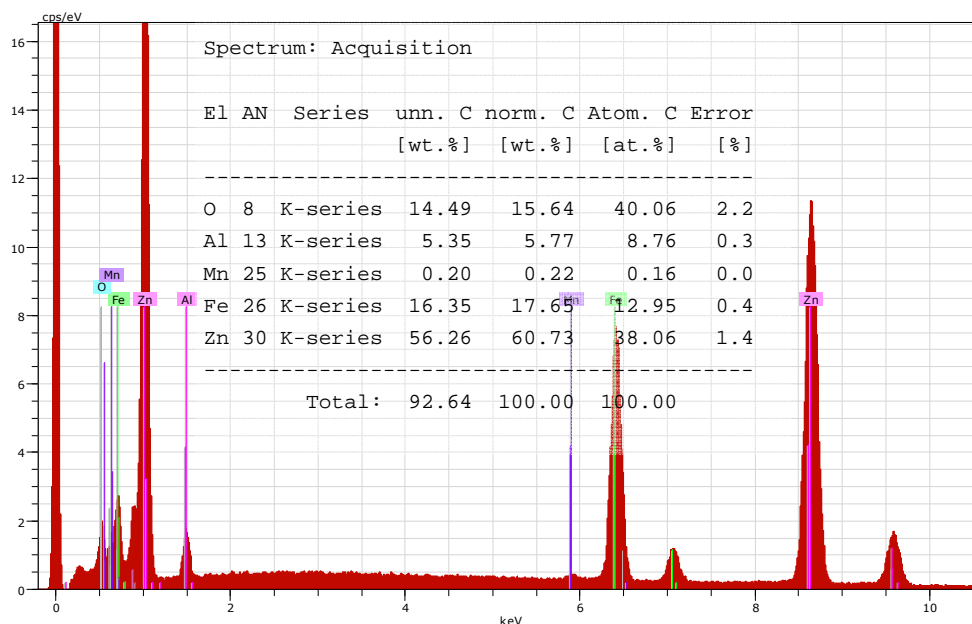
Obr. 7-24: Skluzové systémy na lomové ploše materiálu nízkopevné oceli – vz. D2

Roztržení vzorků probíhalo vysokoenergeticky; při šíření lomové trhliny byla vynaložena poměrně velká práce k překonání odporu materiálu proti šíření trhliny. Lom měl stabilní charakter.

Pomocí chemické spektrální analýzy bylo zjištěno, že na povrchu vysokopevného plechu v pásmu tepelně ovlivněné oblasti (TOO) zůstalo množství Zn z povrchové úpravy nízkopevného plechu (obr. 7-25 a graf 7-9). Směrem k hranici TOO-ZM koncentrace Zn roste, což potvrzuje jev popsany v [31], že nespálený Zn během procesu bodového svařování migruje ze středu svaru k jeho okraji.



Obr. 7-25: Bod zkoumání chemického složení hranice TOO-ZM na povrchu vysokopevného plechu



Graf 7-9: Chemická EDX analýza hranice TOO-ZM na povrchu vysokopevného pelchu materiálu USIBOR 1500

7.2.3 Zkoušky tvrdosti

Testování tvrdosti bylo použito pro zjištění mechanických vlastností materiálu – vyjádřených odporem proti deformaci povrchu.

Tento odpor byla výsledkem více činitelů. Mezi nejdůležitější z nich patřili:

- substruktura kovu definovaná druhem atomové vazby, typem krystalové mřížky a mřížkovými poruchami (vakance, dislokace, intersticie ap.),
- mikrostruktura kovu definovaná především velikostí zrna, stupněm morfologické nerovnoměrnosti a nerovnovážnosti struktury, množstvím a tvarem příměsí vyloučených ve struktuře zkoušeného kovového materiálu,
- vnitřní napětí v kovu vyvolané tvářením za studena, nerovnoměrným ochlazováním, fázovými přeměnami apod.,
- teplota zkoušeného kovu, která výrazně ovlivňuje jeho pružné, plastické a pevnostní vlastnosti a tím i hodnotu naměřené tvrdosti.

Při vlastním zkoušení byla použita metoda podle Vickerse – zkouška mikrotvrdoměří povrchu výbrusu příčného řezu středem svarového bodu. Vzhledem ke struktuře vysokopevného materiálu byla použita stupnice HV0,5. Při měření byla pozorována přechodová linie z natavené oblasti svarového kovu (čočky, SK) přes tepelně ovlivněnou oblast (TOO) do základního materiálu (ZM) nízkopevného feritického ocelového plechu.

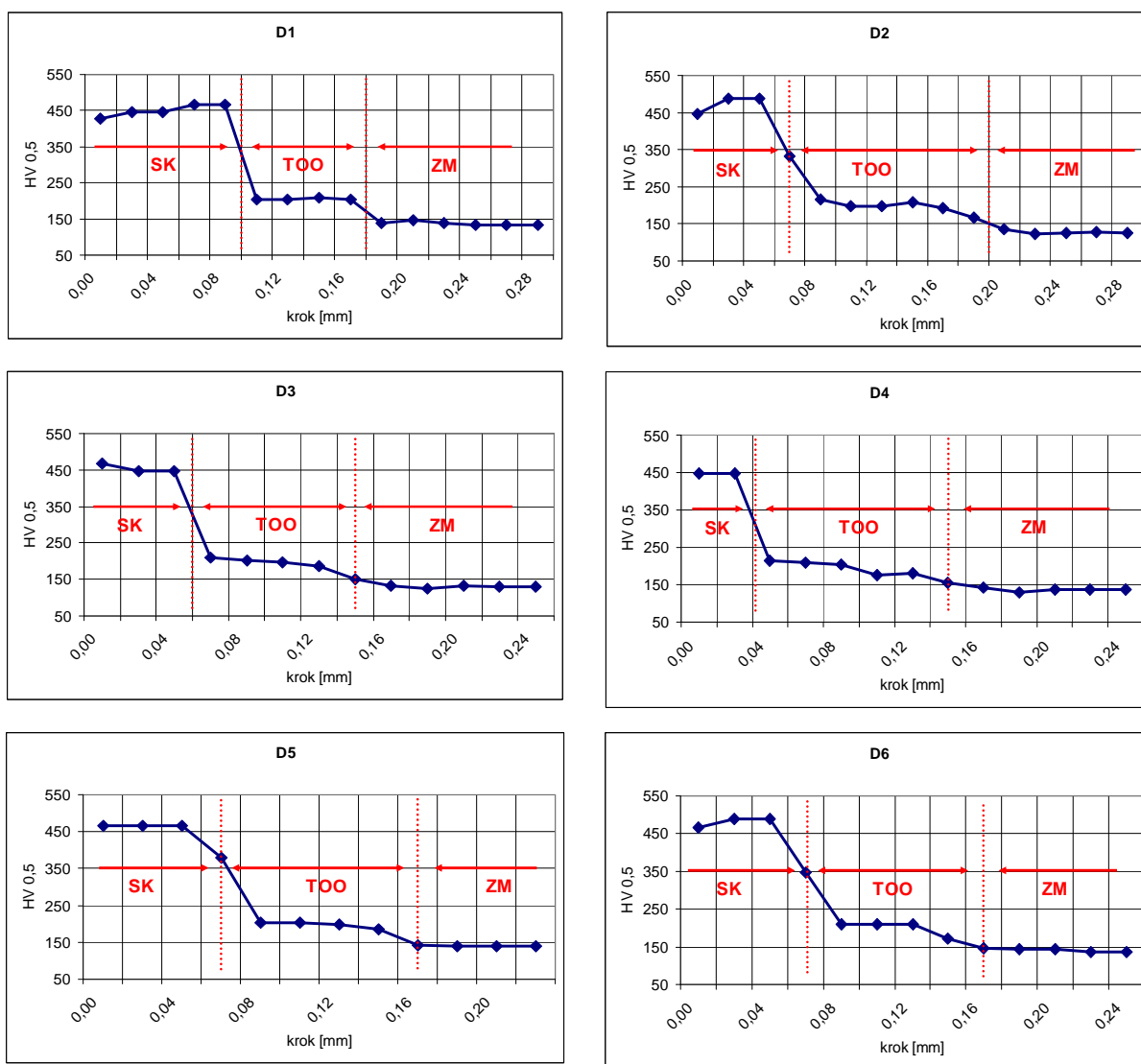


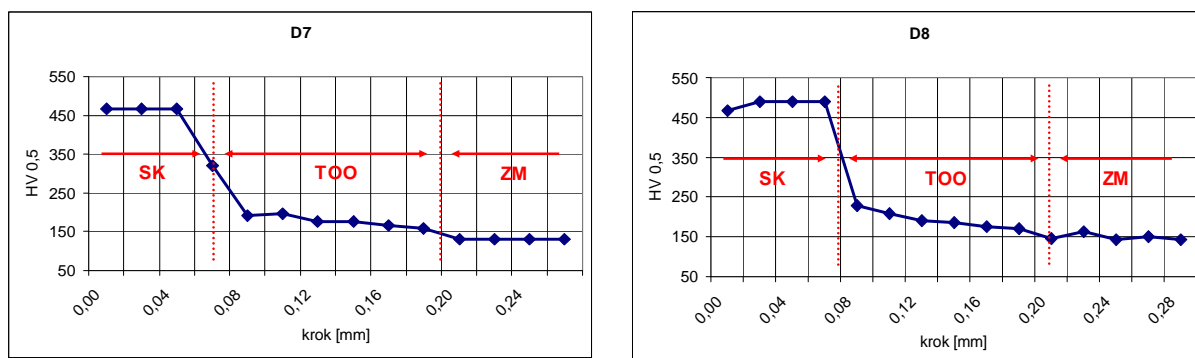
Obr. 7-26: Směr měření linie mikrotvrdoměří heterogenního svarového bodu

Tato zkouška byla velice výhodná, protože při ní došlo k ovlivnění jen velmi malého objemu metalografického vzorku. Nutno podotknout, že ze zjištěných výsledků mikrotvrdoměří nelze usuzovat na proporcionální výsledky pevnosti jednotlivých oblastí spoje.

Naměřená data u jednotlivých oblastí svaru mezi jednotlivými vzorky příliš nelišila. Natavená oblast svarového kovu dosahovala tvrdosti cca 450 HV_{0,5} a základní materiál feritického ocelového plechu cca 140 HV_{0,5}. Základní materiál vysokopevného martenzitického plechu měl tvrdost asi 500 HV_{0,5}. Naměřené hodnoty tvrdosti tepelně ovlivněných oblastí jednotlivých svarů u nízkopevného plechu se pohybovaly v rozmezí 160 ÷ 210 HV_{0,5}. Rozličná tvrdost jednotlivých oblastí svaru byla zapříčiněna rozdílnými strukturami a velikostí zrna. Zatímco struktura svarového kovu byla martenzitická (vysoká tvrdost), základní materiál nízkouhlíkového ocelového plechu měl strukturu feritickou (nízká tvrdost). Struktura tepelně ovlivněné oblasti mezi SK a ZM byla tvořena převážně hrubozrnným acikulárním feritem.

Grafy mikrotvrdosti oblastí svarů jednotlivých vzorků svařených dle nastavení parametrů DOE jsou uvedeny v grafu 7-10.





Graf 7-10: Zkoušky mikrotvrdomosti HV0,5 dle pokusů DOE

Vlivem prudké změny mechanických vlastností na hranici ztavení (SK) došlo k vytvoření vrubu. Způsobu šíření lomové trhliny skrze TOO spoje v těsné blízkosti SK napomohl také sílicí ohybový moment během namáhání svařeného vzorku tahem.

Měření mikrotvrdomosti vysvětlují charakter porušení vzorků při tahových zkouškách. Houževnatý základní materiál i materiál tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje se během tahové zkoušky více a snáze protahoval než křehčí materiál svarového kovu matertenzitické struktury. Komplikovaný rozklad působících sil při stříhovém namáhání bodového svaru zapříčinil, že došlo k vylomení svarové čočky z méně pevného feritického plechu.

Mikrostruktura jednotlivých oblastí spoje podle linie mikrotvrdomosti je zobrazena v příloze D.

7.2.4 Metalografie

Metalografie byla použita k vyhodnocení vlivu změn teploty a podmínek ochlazování při tuhnutí svarového kovu bodového svaru. Přitom byl pozorován vliv časového činitele (setrvání na jisté teplotě, rychlosti ochlazování a zahřívání), změny objemové, napětí, vnitřní energie, změny fyzikálních, mechanických a chemických vlastností.

U odporového bodového svařování je kov mezi spojovanými díly zahřátý vlivem tepla způsobeného přechodovým odporem za současně působící přitlačné síly elektrody až k roztavení. Velikost, tvar a poloha roztaveného materiálu závisí na časové a prostorové souhře a množství tepla vytvářeného a vydávaného v zóně svařování a jejím okolí. Díky přitlačné síle elektrod se spojí svařované díly při ztuhnutí taveniny.

Metalograficky byly u odporových bodových svarů rozlišeny 3 oblasti (zóny) materiálu:

1. Oblast svarového kovu (SK), které se u bodových svarů říká svarová čočka, je oblastí, ve které dojde k natavení a promíchání materiálů dvou svařovaných ocelových plechů vlivem dodaného tepla. Průměr čočky d_L je průměr oblasti SK naměřený na výbrusu ve spojovací rovině spoje.
2. Základní materiál (ZM) je oblastí, jejíž struktura nedoznala rozpoznatelné změny vlivem tepelné energie vložené při bodovém svařování. Základní materiály, které se zásadně neodlišují z hlediska svého chemického složení a způsobilosti k bodovému svařování, jsou označovány jako homogenní (druhově shodné, stejnorodé) materiály. Základní materiály, které se z hlediska chemického složení a způsobilosti k bodovému svařování odlišují, jsou označovány jako heterogenní (nestejnorodé) [13].
3. Oblast nenataveného základního materiálu v těsné blízkosti SK, ve které proběhly strukturální změny vlivem tepelné energie vložené při bodovém svařování, se

nazývá tepelně ovlivněná oblast svaru (TOO). V TOO dochází zpravidla ke změnám ve struktuře, velikosti a tvaru zrna oproti oblasti ZM.

Při vlastním experimentu bylo vytvořeno několik vzorků pro zkoumání různých činitelů, které mají významný vliv na mikrostrukturu heterogenních bodových odporových svarů. Bylo zkoumáno celkem 17 vzorků bodových svarů:

- Různým kombinacím svářecích parametrů bylo podrobena 8 vzorků bodových svarů (podle návrhu experimentu metodou DOE),
- 6 bodových svarů vzniklo vlivem extrémních hodnot parametrů proudu, času svařování a přítláčné síly elektrod při iniciačním testu parametrů,
- 3 vzorky byly vyhotoveny za účelem pozorování vlivu nečistot na kvalitu svarového spoje.

Při metalografických zkoumáních byl brán zřetel především na způsoby závad, které byly po svaření obsaženy v oblastech svarového kovu a tepelného ovlivnění základního materiálu. K tomuto účelu byly použity metody světelné a elektronové mikroskopie.

Metalografie vzorků dle metody DOE

Pro účel metalografického zkoumání byly vyhotoveny výbrusy bodových svarů, které byly svařeny za předem určených parametrů proudu, času a přítláčné síly elektrod. Do zkoumání byl zapojen také faktor typu dílu z vysokopevného materiálu oceli dodávaného od dvou různých dodavatelů. Celkem bylo takto rozřezáno 8 svarových bodů v rovině orientované kolmo k povrchu plechu středem svarového bodu a připraveno 8 metalografických výbrusů k pozorování pod mikroskopem. Leptání vzorků bylo problematické vzhledem k heterogenitě použitých materiálů. Vysokopevný materiál byl náchylnější ke korozi a tedy leptán s vyšší intenzitou a rychlostí než nízkouhlikový feritický materiál dílu protikusy. Leptání bylo proto provedeno ve dvou fázích. Nejdříve byla zkoumána struktura svarové čočky (SK) a základního materiálu vysokopevného plechu a po dalším naleptání vzorku i ZM méněpevného feritického plechu.

Makroskopická pozorování

Během pozorování při makro- zvětšení byla posuzována geometrie svarového spoje, která byla měřena pomocí kritérií bodového svaru předepsaných ke kontrole normou VW 011 05. Těmito kritérii jsou především průměr svarové čočky d_L a hloubka vtlačení elektrod do materiálu plechu. Dále byly vyhodnocovány vady uvnitř struktury svarového kovu a trhliny v různých oblastech spoje.

Vzorky dle metody DOE (označeny D) byly svařeny dle parametrů uvedených v tabulce 7-2.

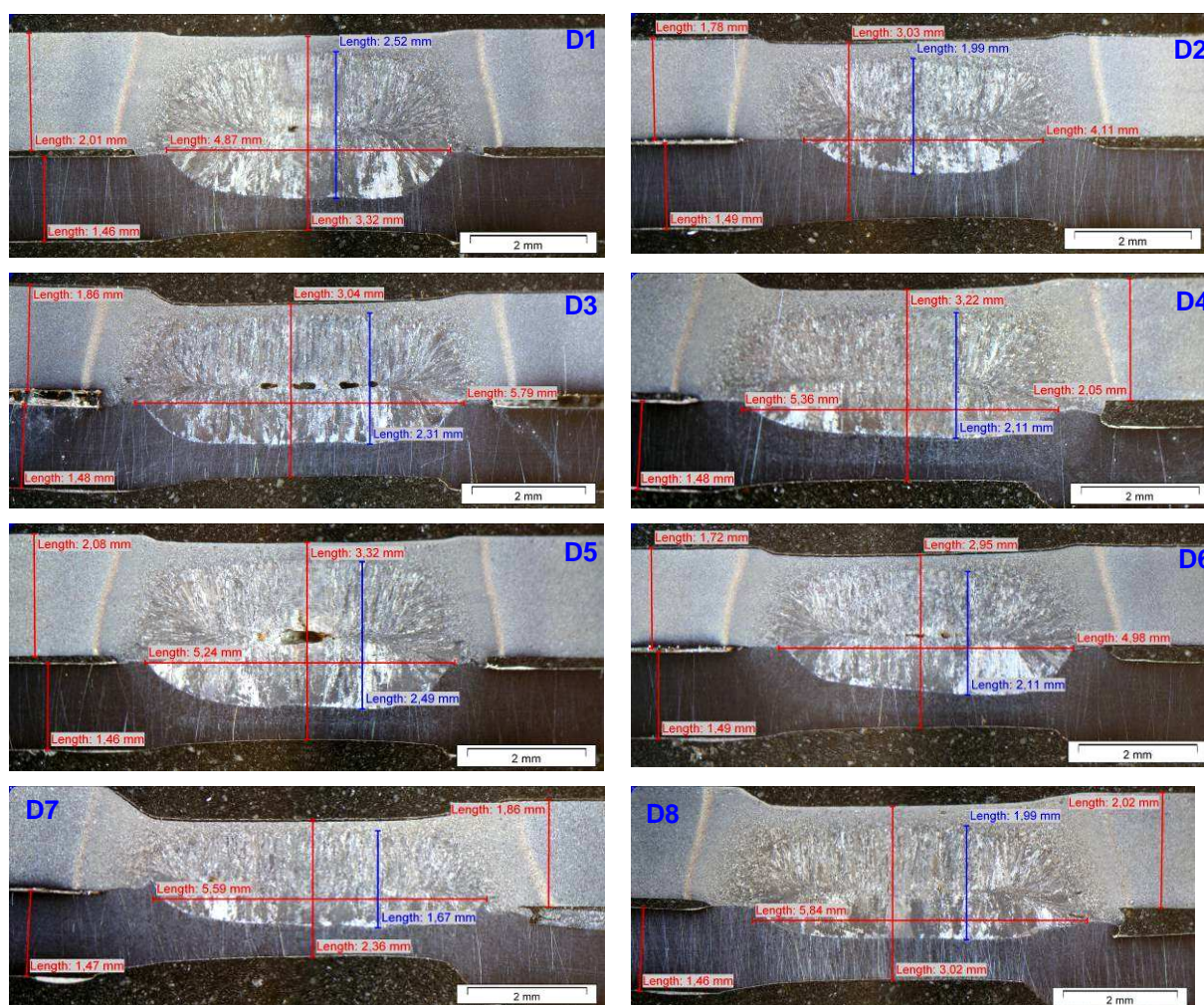
Pokus	A Svářecí proud [kA]	B Čas svař. [per]	C Síla elektrod [kN]	D Dodavatel materiálu	Označení vzorku
1	7,4	15	2,2	BTR	D1 (09_B2)
2	7,4	15	4,0	USI	D2 (12_U2)
3	7,4	22	2,2	USI	D3 (10_U2)
4	7,4	22	4,0	BTR	D4 (08_B2)
5	8,4	15	2,2	BTR	D5 (07_B1)

6	8,4	15	4,0	USI	D6 (09_U1)
7	8,4	22	2,2	USI	D7 (06_U3)
8	8,4	22	4,0	BTR	D8 (09_B2)

Tab. 7-2: Hodnoty parametrů u svařování jednotlivých vzorků (D)

Na stereomikroskopu byly pořízeny makrosnímky jednotlivých bodových svarů, na kterých byla měřena geometrie svaru. Při různých úrovních nastavení parametrů docházelo ke změnám jednotlivých geometrických atributů svaru. Na svarových bodech byly měřeny hodnoty průměru svarové čočky d_L a hloubka vtlačení elektrod (zúžení profilu plechů v místě spoje před a po svařování).

Vzhled jednotlivých spojů svařených při různých svařecích parametrech a jejich geometrie jsou uvedeny na snímcích 7-27.



Obr. 7-27: Makrosnímky bodových svarů vzorků D1 až D8

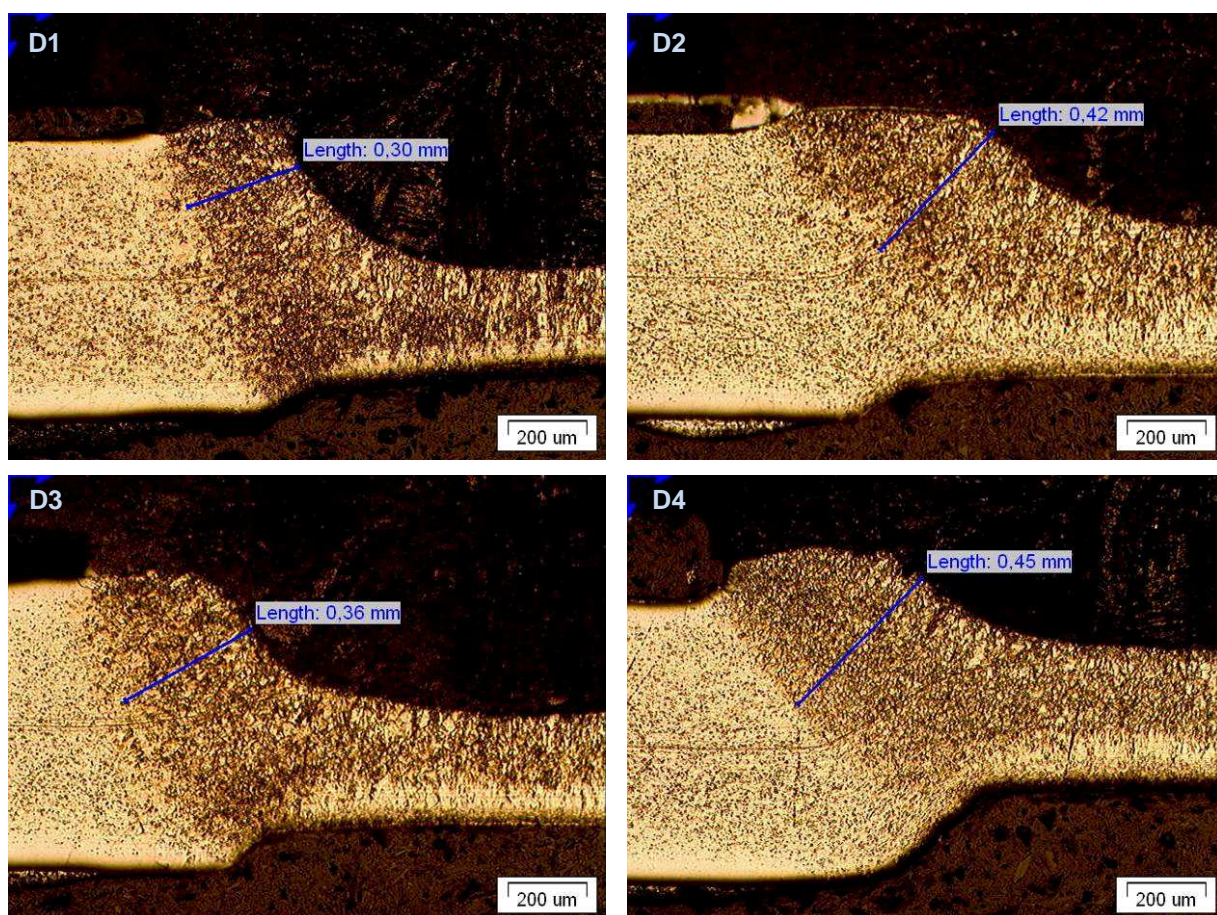
Z výše uvedených snímků je patrné, že nejmenší svarová čočka vznikla při nastavení parametrů svařování vzorku D2. Tomuto vzorku odpovídá nastavení proudu na nižší úroveň 7,4 kA, nastavení času také na nižší úroveň 15 period a nastavení přítlačné síly elektrod na vyšší úroveň 4,0 kN. U vzorku D2 bylo naměřeno $d_L = 4,11$ mm, což je hodnota menší než udává kritérium normy VW 011 05. Norma udává $d_{Lmin} = 4,30$ mm. Naproti tomu vzorek D8, který byl svařen při opačných úrovních proudu a času ($I_{sv} = 8,4$ kA, $T_{sv} = 22$ per, $F_{sv} = 4,0$ kN), doznal ze všech vzorků největší šířky svarové čočky $d_L = 5,84$ mm.

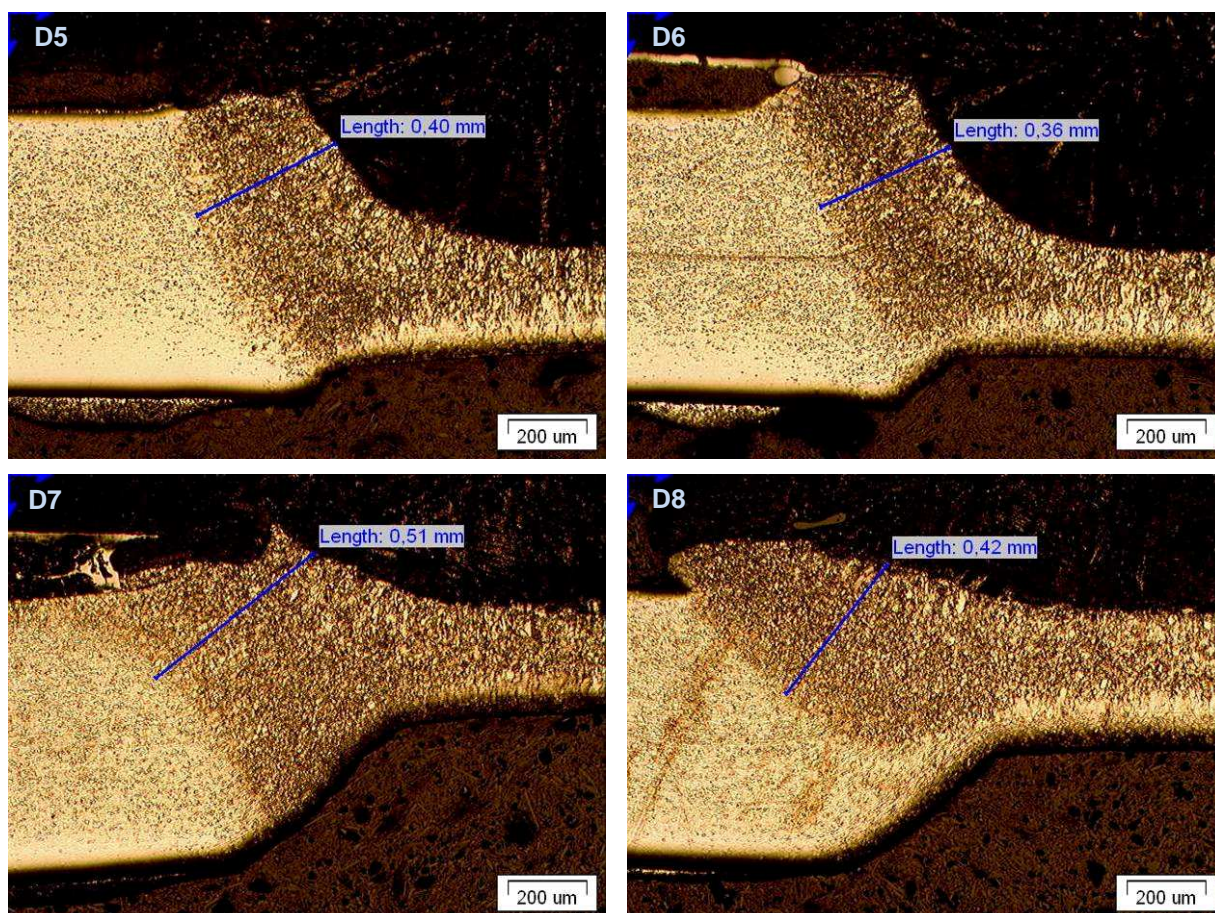
Kritérium maximální hloubky vtlačení elektrod se udává v procentech. Znamená zúžení profilu v rovině spoje oproti profilu svařovaných plechů mimo svar daném tloušťkou svařovaných plechů. Nejmenšího vtisku elektrod bylo docíleno nastavením parametrů svařování vzorků D1 a D5. Naopak největšího zúžení profilu plechů bylo dosaženo při svařování vzorku D7. K velkým vtiskům elektrod docházelo obecně u spojů s vyššími úrovněmi nastavení svářecího času a proudu.

Na výše uvedených snímcích je také patrný rozdíl v geometrii svarové čochky (poměr tloušťky a šířky) při tvrdším a měkčím režimu bodového odporového svařování. U heterogenních bodových svarů dochází k asymetrii oblasti SK vlivem rozdílných odporů a termokapacit svařovaných materiálů [39].

Po opětovném intenzivnějším naleptání výše uvedených vzorků vynikla také struktura feritického zrna nízkopevné oceli a bylo v něm možné sledovat změny ve struktuře tepelně ovlivněné oblasti. Bylo také možné měřit šířku pásma tepelného ovlivnění nízkopevného plechu ve vzdálenosti od hranice ztavení svarového kovu směrem k neovlivněnému základnímu materiálu.

Při metalografických pozorováních bylo nutné se zaměřit především na oblast struktury feritického materiálu nízkopevného plechu v těsné blízkosti svarové čochky, protože při tahových zkouškách došlo k šíření lomové trhliny právě v této oblasti spoje – viz obr. 7-28.





Obr. 7-28: TOO nízkopevného ocelového plechu vzorků D1 až D8

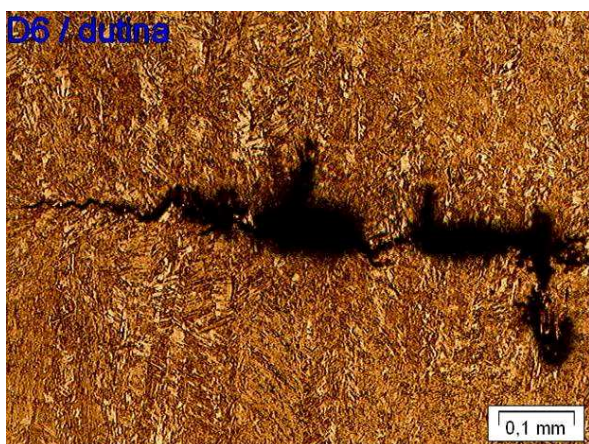
Z výše uvedených snímků je patrné, že v TOO feritického materiálu došlo ke zhrubnutí zrna feritu oproti základnímu materiálu plechu vlivem pozvolného ochlazovacího cyklu. Podle velikosti tepelného ovlivnění základního materiálu lze usuzovat na množství tepelné energie, která vznikla na základě odporu rozhraní obou spojovaných materiálů při průchodu elektrického proudu. Teplota a míra ochlazování je inverzně proporcionální k šířce TOO [39].

U některých vzorků došlo k tepelnému ovlivnění základního materiálu feritického plechu až k povrchu, kde dosedly elektrody svařecího stroje. Takovým případem byl svařovací cyklus aplikovaný na vzorek D7. Oproti tomu u vzorku D2, kde vznikla nejmenší svarová čočka, došlo také k nejmenšímu tepelnému ovlivnění základního materiálu nízkopevného plechu.

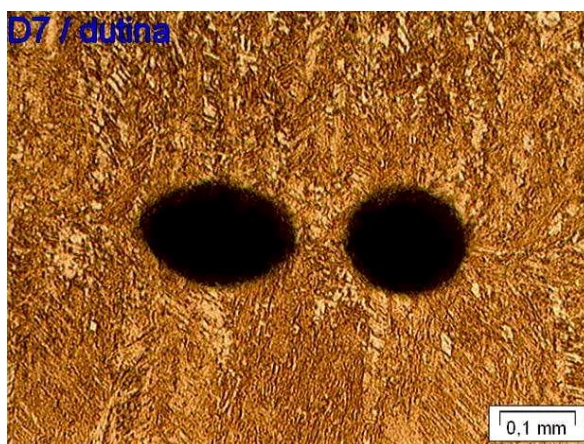
Na jednotlivých řezech je vidět jev přesunu antikorozní povrchové vrstvy zinku od středu bodu k jeho obvodu. Část Zn se vlivem vysokých teplot při svařování odpaří, ale část se přesune k okraji na povrch tepelně neovlivněné oblasti základního materiálu plechu. Tento jev pozoroval i Harlin et al. [31]. Po segregaci Zn na okraji čočky dochází k průchodu vyššího proudu.

Vnitřní vady z tuhnutí svarového kovu

Uvnitř svarového kovu natavené oblasti čočky v dělicí rovině svaru docházelo ke vzniku vnitřních vad, které jsou typově prezentovány snímky 7-29 a 7-30.



Obr. 7-29: Trhliny z tuhnutí uvnitř svarové čocky



Obr. 7-30: Plynové dutiny uvnitř svarové čocky

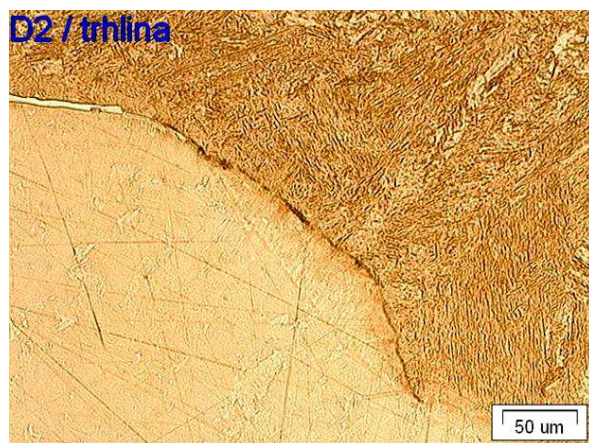
Trhliny a dutiny uvnitř svarové čocky vznikly během procesu ochlazování bodových svarů. Při různých nastaveních parametrů svařování docházelo k vadám různé velikosti. Norma VW 011 05 u daného typu spoje uvádí, že vnitřní vady svarové čocky, nesmí přesáhnout 25 % šířky průměru d_L . Vady typu dutin byly pozorovány zvětšenou měrou u vzorků, kde byla použita relativně malá přitlačná síla elektrod, a také, když byl povrch plechu nějakým způsobem znečištěný.

Trhliny z tuhnutí i plynové dutiny byly při výskytu mezi sebou vzájemně kombinovány. U inkriminovaných svarů většinou docházelo k oběma typům vad současně.

Tyto vnitřní vady svarové čocky se však jeví z pevnostního hlediska jako nedůležité a irelevantní, pokud docházelo při tahové zkoušce k lomu vždy pouze vně obvodu svarové čocky tepelně ovlivněnou oblastí profilem méněpevného feritického plechu dílu protikusů (dílu rámu vnitřní horní).

Studium kritické trhliny po hranici svarové čocky

Patrně nejzávažnější vada na bodovém svaru byla pozorována u experimentálního vzorku s označením D2. U tohoto vzorku byla zjištěna poměrně velká trhlina po obou stranách řezu svarové čocky v dělicí rovině svaru (tedy zřejmě i po celém obvodu svarového bodu) – viz obr. 7-31. Trhlina postupuje od rozhraní obou svařovaných plechů od oblasti „slepení“ povrchových vrstev (natavení vrstev povrchových úprav ocelových plechů) v místech TOO po hranici svarové čocky do materiálu nízkopevného ocelového plechu. Zobrazená trhlina na vzorku D2 má délku asi 0,3 mm.



Obr. 7-31: Trhlina po hranici SK-TOO – vz. D2



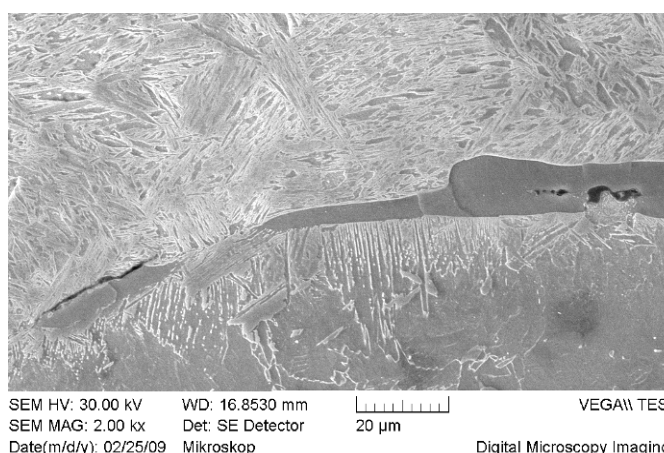
Obr. 7-32: Hranice SK-TOO bez trhlin – vz. D3

Tato trhlina byla pravděpodobně příčinou relativně nižší pevnosti při tahové zkoušce stříhem i částečně odlišného módu lomu vzorku D2. U ostatních vzorků bodových svarů podobné trhliny nebyly pozorovány. Takovéto trhliny jsou u bodových odporových svarů dle normy VW 011 05 nepřipustné.

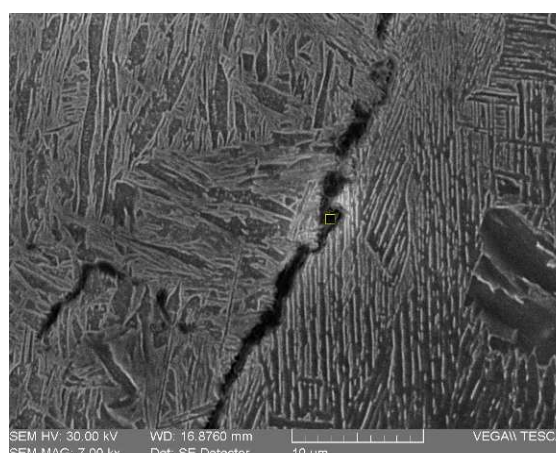
Ke vzniku uvedené trhliny došlo vlivem souhry aplikovaných paramterů procesu bodového svařování. Parametry proudu a času svařování byly nastaveny na svých nízkých úrovních a parametr přitlačné síly elektrod na své vysoké úrovni. Jednalo se tedy o nastavení, při kterém vznikl při svařovacím cyklu nejmenší přechodový odpor mezi spojovanými materiály. Vlivem nízkého odporu vznikla malá tepelná energie k natavení materiálu kovu svarové čochky.

Použitým vysokopevným materiálem u vzorku D2 byl USIBOR 1500, který nese povrchovou úpravu na bázi Al-Si.

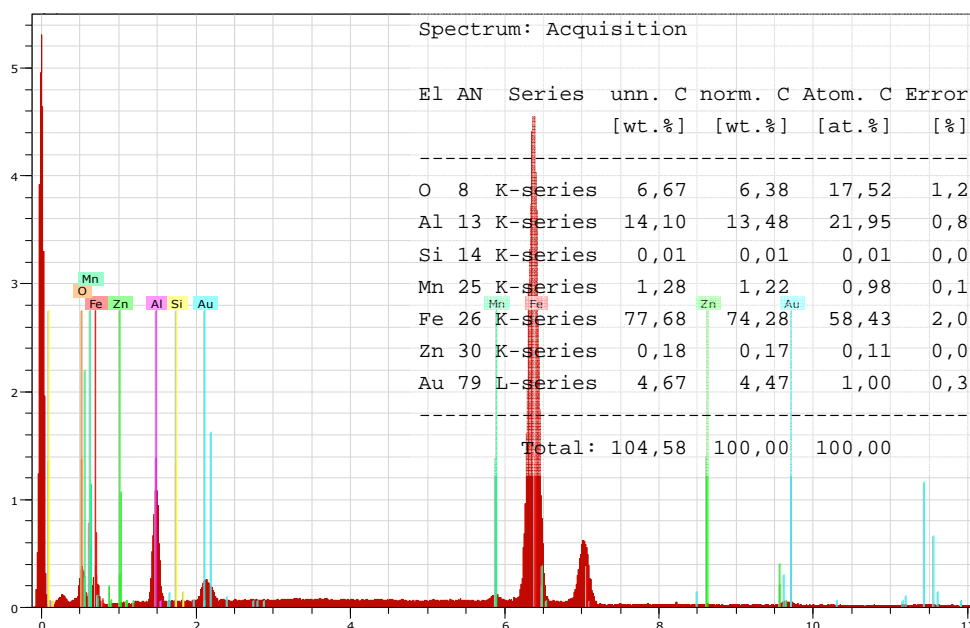
Na obr. 7-33 a 7-34 je zobrazena trhlina ve větším detailu. Chemická EDX analýza trhliny je uvedena v grafu 7-11.



Obr. 7-33: Trhlina mezi TOO a SK – vz. D2



Obr. 7-34: Trhlina v SK – detail – vz. D2

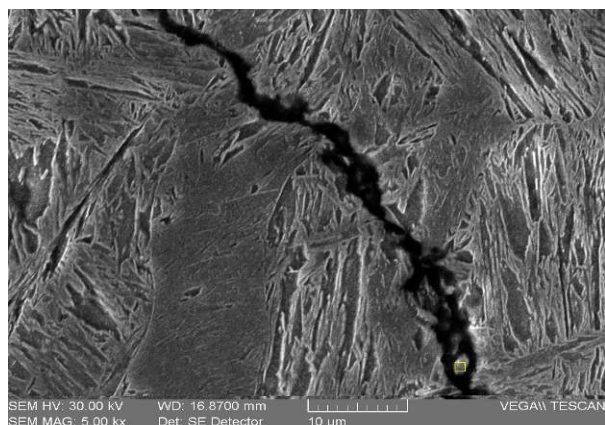


Graf 7-11: Chemická EDX analýza detailu z obr. 7-34 – vz. D2

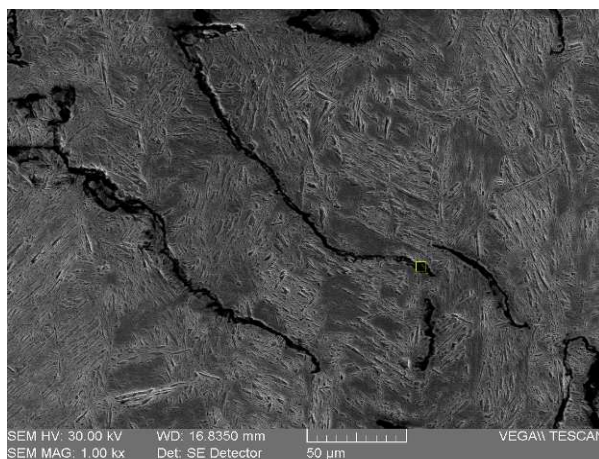
Z uvedeného je patrné, že trhlina má svůj původ v povrchové úpravě vysokopevného i nízkopevného ocelového plechu. Trhlina obsahuje mimo Fe i Al a stopy Zn. Množství nalezeného Zn při EDX analýze může být ovlivněno mírou opětovného leptání vzorku, resp.

část obsahu Zn byla leptáním zničena. Při tepelném cyklu bodového svařování vzorku D2 nedošlo k dokonalému spálení povrchových vrstev nebo jejich distribuci mimo svarový kov spoje. Trhlina, která představuje mechanický vrub a má tak přímý účinek na statickou i dynamickou únosnost spoje, vznikla interakcí vlivů aplikovaných parametrů svařování a povrchové úpravy materiálu USIBOR 1500.

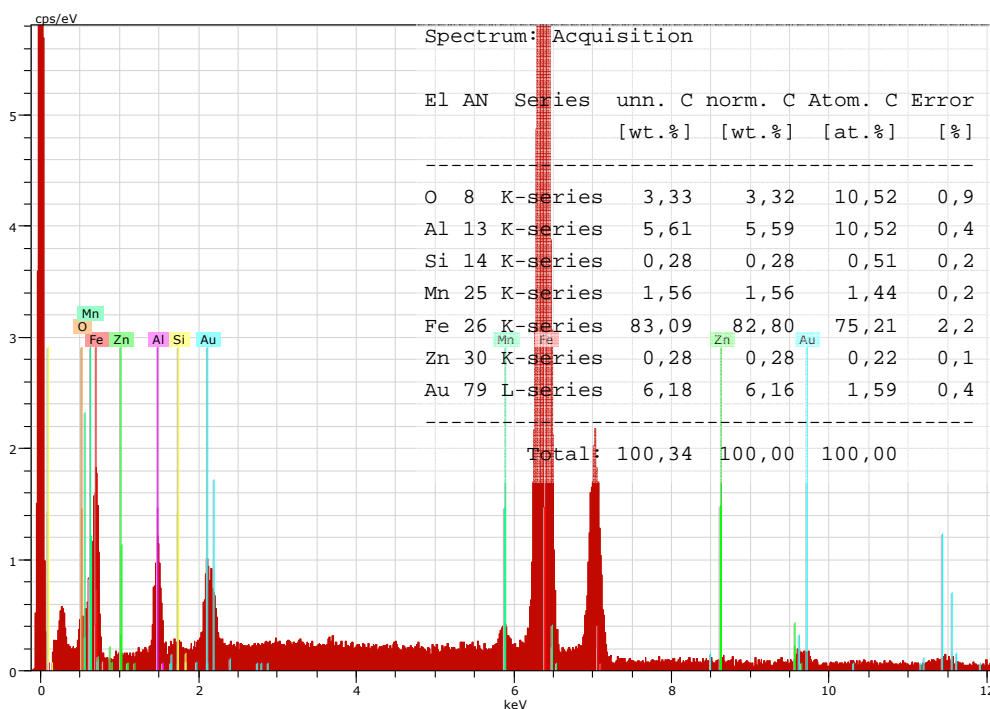
Po detailnější analýze svarového kovu byly trhliny uvedeného typu nalezeny také uvnitř svarové čočky (obr. 7-35 a 7-36, chemická EDX analýza viz graf 7-12). Výskyt trhlín z pozůstatků povrchové úpravy uvnitř struktury svarového kovu představuje hrozbu spíše pro homogenní svař vysokopevných ocelových plechů, protože u heterogenních svařů dochází k šíření lomové trhliny v TOO nízkopevného plechu.



Obr. 7-35: Trhlina v SK – detail – vz. D2



Obr. 7-36: Trhliny v SK – vz. D2



Graf 7-12: Chemická EDX analýza detailu z obr. 7-36 – vz. D2

Hliník byl během teplotního cyklu bodového svařování odtaven do svarového kovu, došlo k likvací Al a k iniciaci trhliny, která s největší pravděpodobností obsahuje křehkou fázi Al_2O_3 . Přítomnost této fáze v oblasti svarové čočky je z pevnostního hlediska spoje nežádoucí.

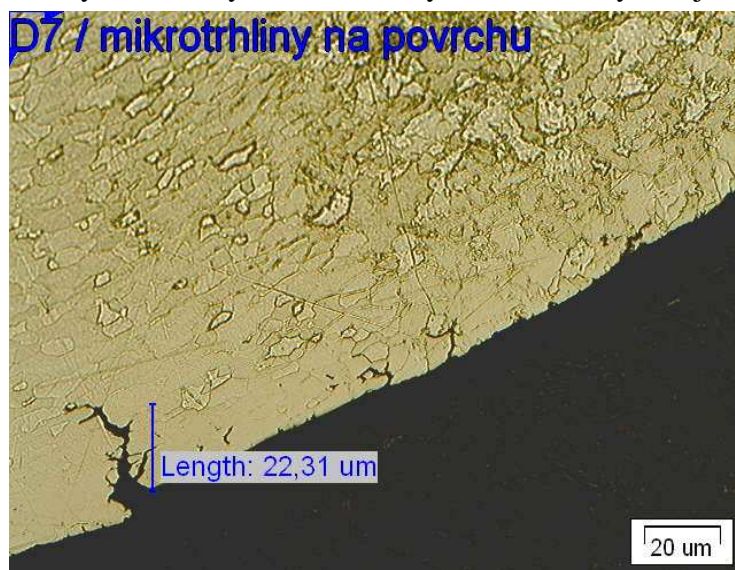
Povrchové trhliny v okrajové oblasti vtláčení elektrod

Dalším typem trhlin, které byly při zkoumání struktury bodových svarů pozorovány, byly povrchové trhliny v okrajové oblasti vtláčení elektrod – viz obr. 7-37. Byly nalezeny na povrchu nízkopevného plechu tam, kde došlo vlivem procesu svařování k nadměrným hloubkám vtláčení elektrod.

Mezní zúžení profilu plechů vlivem vtláčení elektrod je normou VW 011 05 stanovena na 20 % pro stupeň kvality povrchu OG3 [13].

Tyto trhliny se měří kolmo k rovině spoje a tolerance jejich možné délky dané VW normou je 150 μm . Největší trhlina tohoto typu byla nalezena na okraji svarového bodu vzorku D7, u nějž byla zjištěna také největší hloubka vtláčení elektrod. Drobné povrchové trhliny byly zaznamenány i u vzorku T2.

Velikost nalezených trhlin byla v rámci daných tolerancí vyhovující kvality.



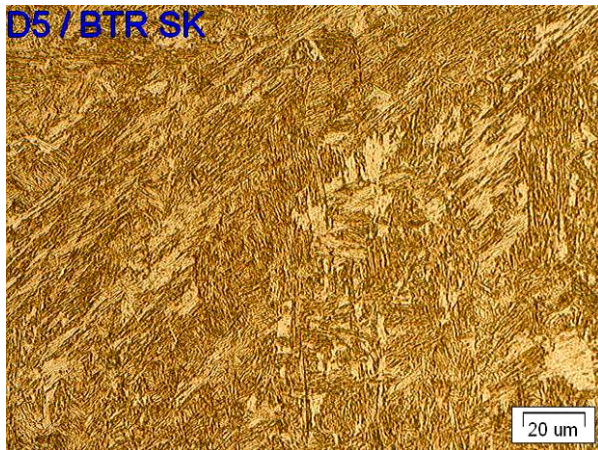
Obr. 7-37: Povrchová trhlina v oblasti vtláčení elektrody – vz. D7

Uvedený typ trhliny může mít velmi negativní účinek na dynamickou únosnost spoje.

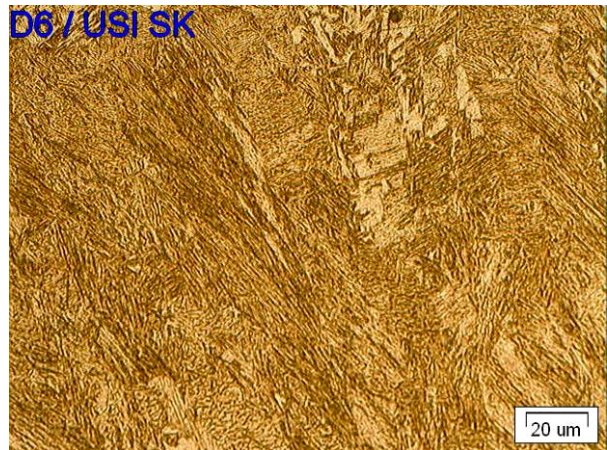
Mikrostruktura heterogenních svarů

Mikrostruktura jednotlivých oblastí svaru byla dána chemickým složením a metodou tváření svařovaných materiálů. Obsah uhlíku přibližně 0,25 % a technologie lisování za tepla určila materiálu dílu B-sloupku martenzitickou strukturu velké pevnosti, tvrdosti a potažmo křehkosti ve srovnání s materiálem dílu protikusy z nízkopevné oceli.

Mikrostruktura základního materiálu dílů z vysokopevné oceli byla již diskutována v předchozí subkapitole. Struktura oblasti SK a TOO heterogenních svarů materiálů BTR165 a USIBOR 1500 s dílem protikusy je prezentována na obr. 7-38 až 7-41.



Obr. 7-38: Struktura oblasti svarového kovu – vz. D5 (BTR165)



Obr. 7-39: Struktura oblasti svarového kovu – vz. D6 (USIBOR 1500)



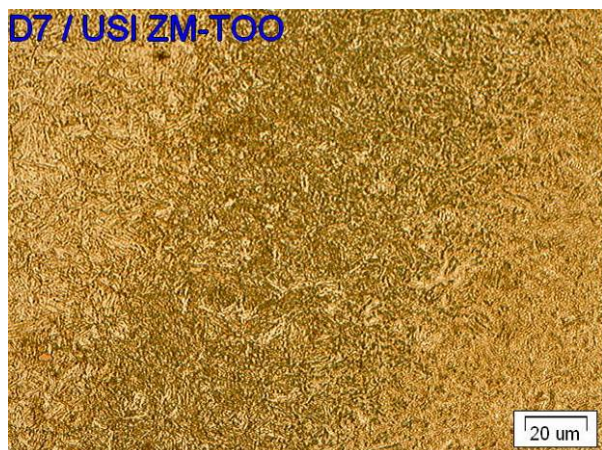
Obr. 7-40: Tepelně ovlivněná oblast – vz. D5 (BTR165)



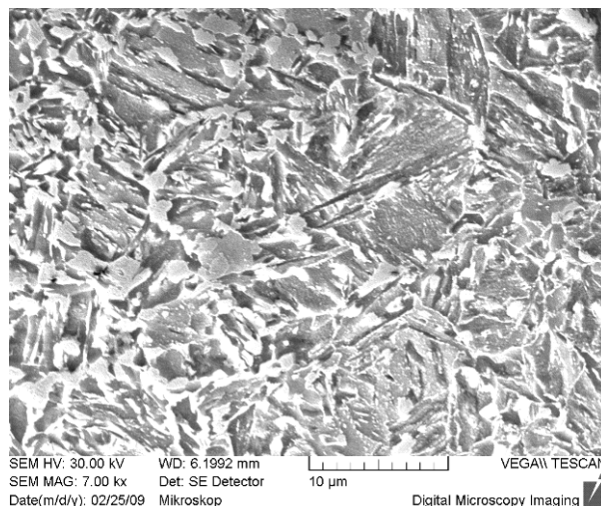
Obr. 7-41: Tepelně ovlivněná oblast – vz. D6 (USIBOR 1500)

Mikrostruktura svarového kovu se skládá ze směsi hrubých zrn martenzitu, acikulárního feritu a zbytkového austenitu. Mikrostruktura oblasti svarového kovu je (až na drobné trhliny u vzorku D2) u obou posuzovaných vysokopevných materiálů identická.

Shodná je i struktura TOO, ve které došlo vlivem teplotního cyklu svařování ke zjemnění zrna struktury oproti ZM, a na hranici ZM-TOO došlo k popuštění materiálu vysokopevné oceli a k vytvoření pásma zvýšené precipitace karbidů železa Fe_3C – viz obr. 7-42 a 7-43. Tento jev precipitace karbidů odpovídá danému typu vysokopevné oceli v reakci na aplikovaný tepelný cyklus svařování.



Obr. 7-42: Karbidy na hranici ZM-TOO – vz. D7 (USIBOR 1500)

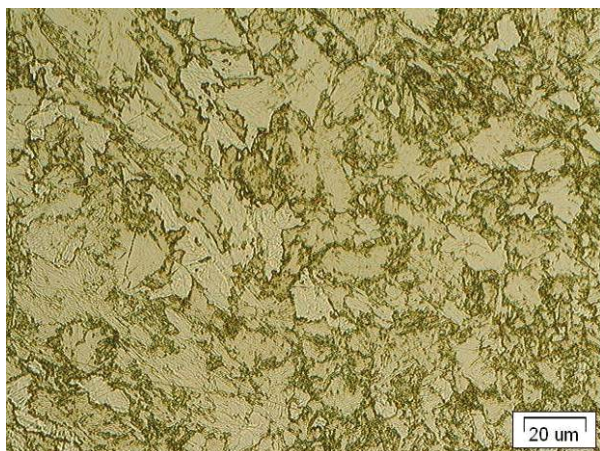


Obr. 7-43: Detail Fe_3C na hranici ZM-TOO – vz. D2 (USIBOR 1500)

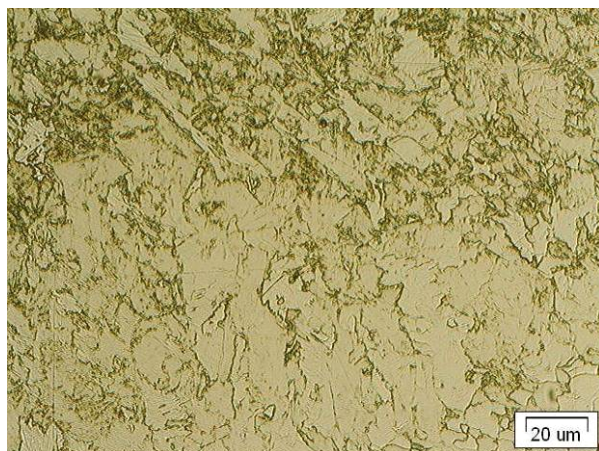
Tepelný účinek v uvedeném popuštěném pásmu byl pozorován i pomocí zkoušky mikrotvrdosti v linii napříč vysokopevným materiálem bodového svaru, resp. toto pásmo vykazovalo menší tvrdost než okolní oblasti svaru. Výsledky zkoušky mikrotvrdosti jsou uvedeny v následující subkapitole homogenních svarů (kapitola 7.3) – viz grafy 7-14 a 7-15.

Díl protikusu (vnitřní horní díl rámu) byl naproti výše uvedenému tvářen za studena a jeho struktura je čistě feritická. Jedná se o standardní karosářský plech nízké pevnosti při obsahu uhlíku do 0,08 % (viz tabulka chemického složení 5-2).

Vlivem pozvolného průběhu ochlazování docházelo u bodových svarů v jejich tepelně ovlivněné oblasti k růstu zrn. Růst zrna v TOO se projevuje ve feritické oceli, protože se u ní projevuje lepší transfer tepla [44]. Oblast TOO nízkopevné oceli byla tvořena převážně strukturou acikulárního feritu (obr. 7-44), který se běžně vytváří ve svarech standardních nízkopevných karosářských plechů. Průměrná velikost zrna v TOO je několikanásobně větší než velikost polyedrického zrna základního materiálu oceli plechu. Větší zrno je inherentně spojeno s horšími vlastnostmi vrubové houževnatosti, tažnosti a pevnosti oproti zrnu jemnému. Největších zrn feritu v TOO bylo dosaženo na hranici TOO-ZM (obr. 7-45) a zvláště u vzorků s měkkým režimem svařování, kde byla nastavena nízká úroveň parametru proudu a vysoká úroveň parametru času svařování.



Obr. 7-44: Tepelně ovlivněná oblast materiálu nízkouhlíkového plechu – vz. D6



Obr. 7-45: Rozhraní TOO-ZM materiálu nízkouhlíkového plechu – vz. D6

Panoramata oblastí SK-TOO-ZM heterogenních bodových svarů plechů martenzitické i feritické struktury jsou uvedena v příloze C a mikrostruktura ve vztahu k průběhu linie mikrotvrdosti je zobrazena v příloze D.

Z uvedených snímků struktury bodových svarů je patrné rozdílné chování heterogenních materiálů v reakci na tepelný cyklus svařování. Vlivem rozdílných schopností vedení tepla došlo u vysokopevného martenzitického materiálu ke zjemnění zrna struktury TOO a u nízkopevného feritického materiálu k jeho zhrubnutí.

Metalografie vzorků iniciačního testu rozsahu parametrů

Iniciační test rozsahu parametrů byl proveden ještě před započítím svařování vzorků dle návrhu experimentu metodou DOE. Na základě tohoto testu byly určeny úrovně pro jednotlivé parametry (faktory) a byla tak vytýčena pracovní oblast jednotlivých parametrů pro daný druh svarového spoje.

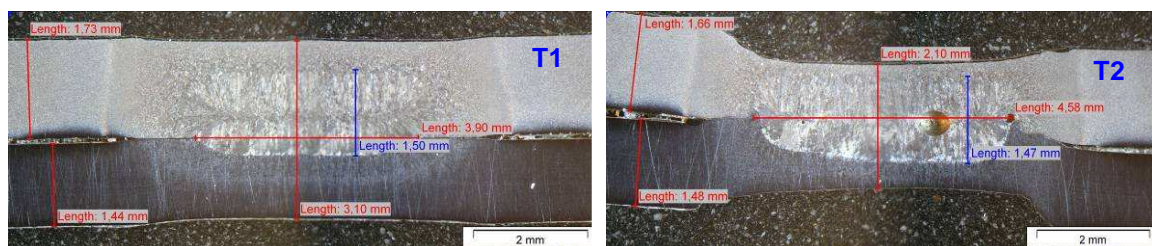
Každý regulovatelný parametr svářecího stroje byl testován na extrémní únosnou mez, kdy charakteristika jakosti ještě stále vyhovovala pracovním podmínkám normy. Při testech byly postupně prováděny cílené změny v nastavení jednoho parametru, zatímco ostatní parametry byly ponechány konstantní. Přitom byla sledována vizuální kvalita vzniklého bodového svaru.

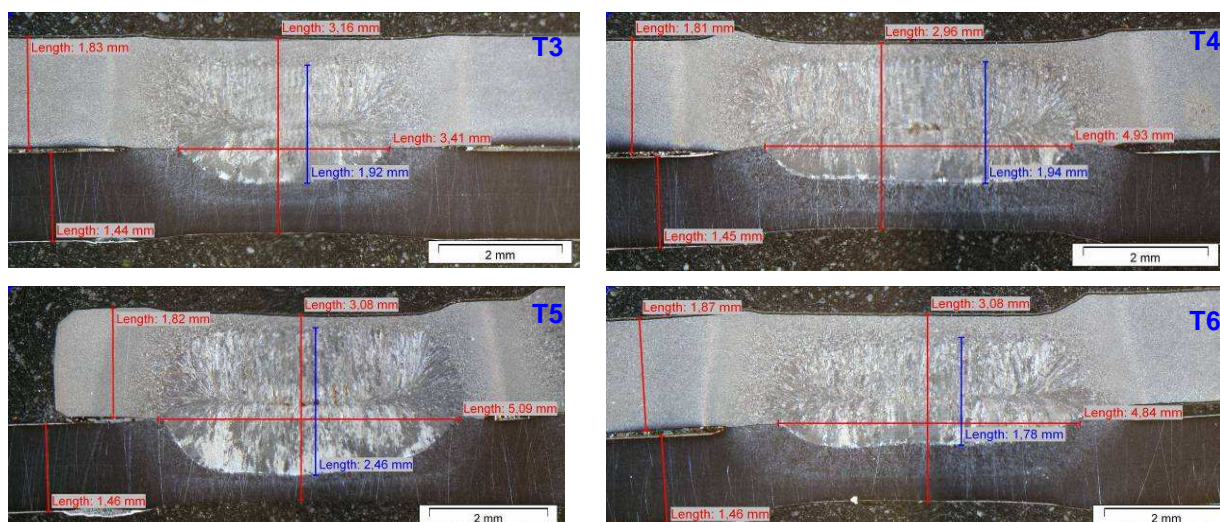
Vhodná nastavení parametrů byla přejata pro experiment podle metody DOE a extrémní provedení svarů bylo ponecháno pro metalografická pozorování – viz tabulka 7-3.

Pokus	A Svářecí proud [kA]	B Čas svař. [per]	C Síla elektrod [kN]	D Dodavatel materiálu	Označení vzorku
1	6,4	17	3,0	USI	T1 (21_U2)
2	9,3	17	3,0	USI	T2 (21_U2)
3	7,9	10	3,0	USI	T3 (20_U2)
4	7,9	25	3,0	USI	T4 (20_U2)
5	7,9	17	1,8	USI	T5 (05_U1)
6	7,9	17	5,0	USI	T6 (15_U2)

Tab. 7-3: Hodnoty parametrů u svařování jednotlivých vzorků (T)

Z bodových svarů vyrobených dle výše uvedených kombinací parametrů byly připraveny výbrusy, které byly zkoumány světelnými mikroskopy (vzorky označeny T). Makrosnímky jednotlivých řezů jsou uvedeny na obr. 7-46. U těchto vzorků byly měřeny a hodnoceny stejné atributy předepsané normou VW 011 05 jako u vzorků s označením D.





Obr. 7-46: Makrosnímky bodových svarů vzorků T1 až T6

Při svařování vzorku T1 byl nastaven parametr proudu na minimální hodnotu tohoto experimentu (6,4 kA) a u T2 na maximální (9,3 kA). Bodový svar vzorku T1 přitom nedosáhl na kritérium minimální hodnoty průměru čochy předepsané normou, resp. jeho šíře byla o 0,4 mm užší než toleruje norma. Oproti tomu u vzorku T2 byla naměřena maximální hloubka vtažení elektrod 36 %, což je hodnota která přesahuje normou stanovené meze. Navíc při tak vysokém vtažení elektrod došlo k rozstříku. Hodnota proudu má velký vliv na vtisk elektrod. Pracovní oblast nastavení proudu pro experiment podle metody DOE musela být patřičně zúžena.

Z měření vzorků T3 a T4, u nichž byl regulován pouze čas svařování a proud i síla elektrod měli konstantní hodnotu, je vidět, že na pevnostní charakteristiku průměru svarové čochy (d_L) má podstatný vliv parametr času. Stejně tomu bylo i při návrhu experimentu s charakteristikou průměru svarového bodu (d_P). Mezi těmito dvěma charakteristikami existuje vztah

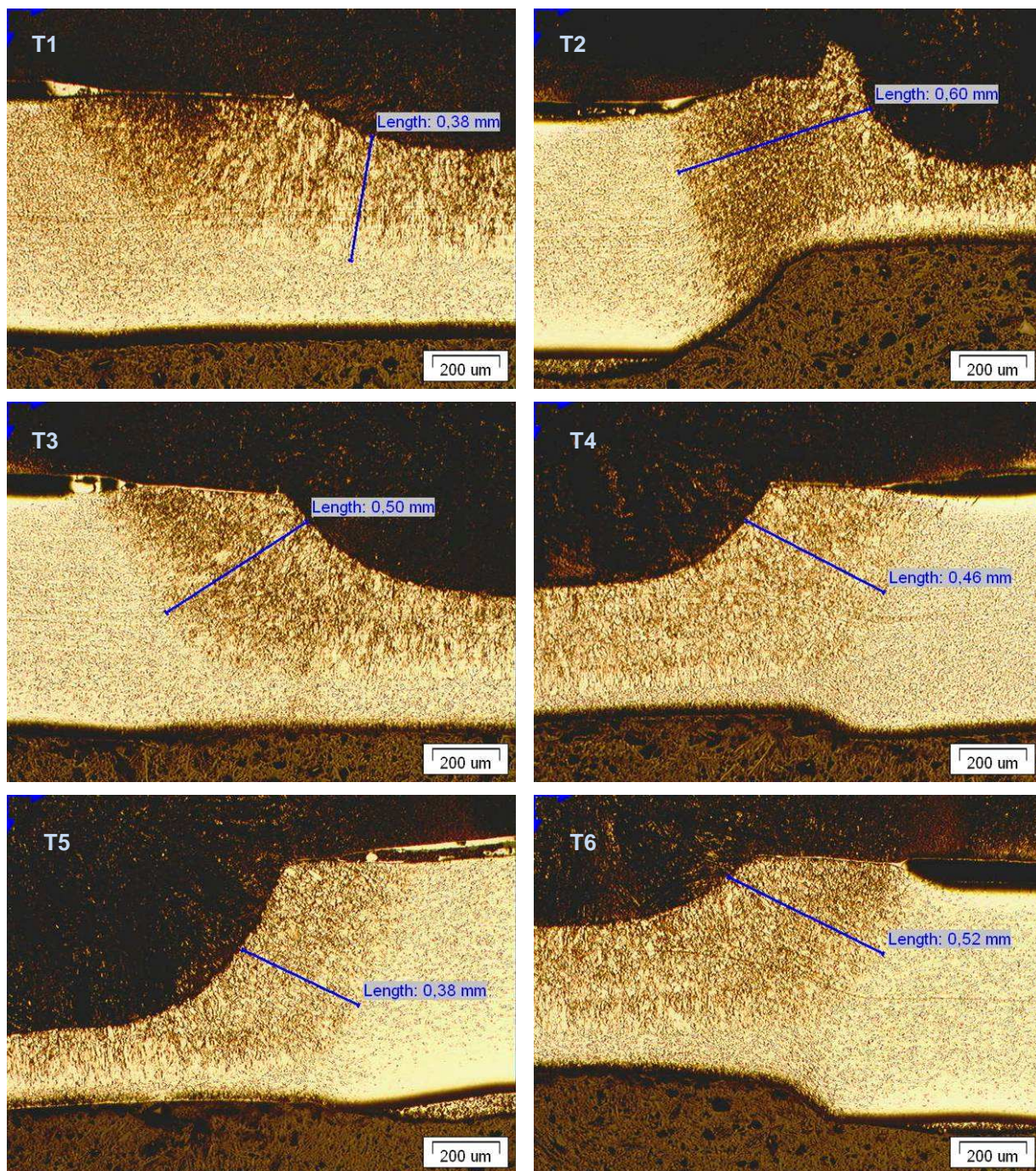
$$d_{P_{\min}} \geq 1,15 \cdot d_L . \quad (30)$$

Zatímco u vzorku T3 ($T_{sv} = 10$ per) byla naměřena minimální hodnota $d_L = 3,41$ mm, u vzorku T4 byla naměřena maximální hodnota $d_L = 4,93$ mm. U parametru proudu byly hodnoty pracovní oblasti upraveny spíše na dolní úrovni, aby bylo při experimentu dosaženo $d_{L_{\min}}$.

Na vzorcích T5 a T6 byl zkoumán rozsah parametru přítláčné síly elektrod. U vzorku T5 byla nastavena síla na hodnotu 1,8 kN a u vzorku T6 na hodnotu 5 kN. Pozorované svary při změnách přítláčné síly elektrod v daných mezích neměly vizuálně znatelný vnější efekt, a tak bylo pro experiment zvoleno rozpětí dle zkušeností z provozu sériové výroby karoserií. Příliš velké síly elektrod nepříznivě ovlivňují životnost ochranných čepiček elektrod [28]. Z metalografických makro-snímků je však patrné, že u vzorku T5 došlo k poměrně velkým vnitřním vadám ve svarové čočce vlivem malé přítláčné síly. Z řezů bodovými svary vzorků T5 a T6 je také vidět, že přítláčná síla elektrod se podstatně podílí na velikosti svarové čochy. U vzorku T5, kde byla použita menší síla, čočka dosahuje až k povrchu vysokopevného plechu a její poloměr je oproti poloměru čochy vzorku T6 větší.

Při pozorování struktury tepelně ovlivněné oblasti feritického materiálu dílu protikusy bylo zjištěno, že rozhodující účinek na šířku TOO má parametr proudu. Parametr proudu má také rozhodující vliv na velikost zrna feritu v TOO. U daných typů svarů tedy platí, že čím větší proud, tím menší zrno v TOO a zároveň širší TOO. Je ale nutné pamatovat na to, že velká hodnota svářecího proudu je příčinou velkých hloubek vtažení elektrod. Tomu

nasvědčují metalografické snímky na obr. 7-47 zhotovené po opětovném naleptání vzorků kvůli zobrazení hranic zrn feritické struktury materiálu plechu protikusů.



Obr. 7-47: TOO nízkopecvného ocelového plechu vzorků T1 až T6

Z uvedených snímků je zřejmý i nemalý vliv parametru přítláčné síly elektrod na velikost TOO. Extrémní změny nastavení parametru času svařování neměly na TOO a strukturu feritického plechu významný vliv.

Nečistota a kvalita vnitřní struktury bodových svarů

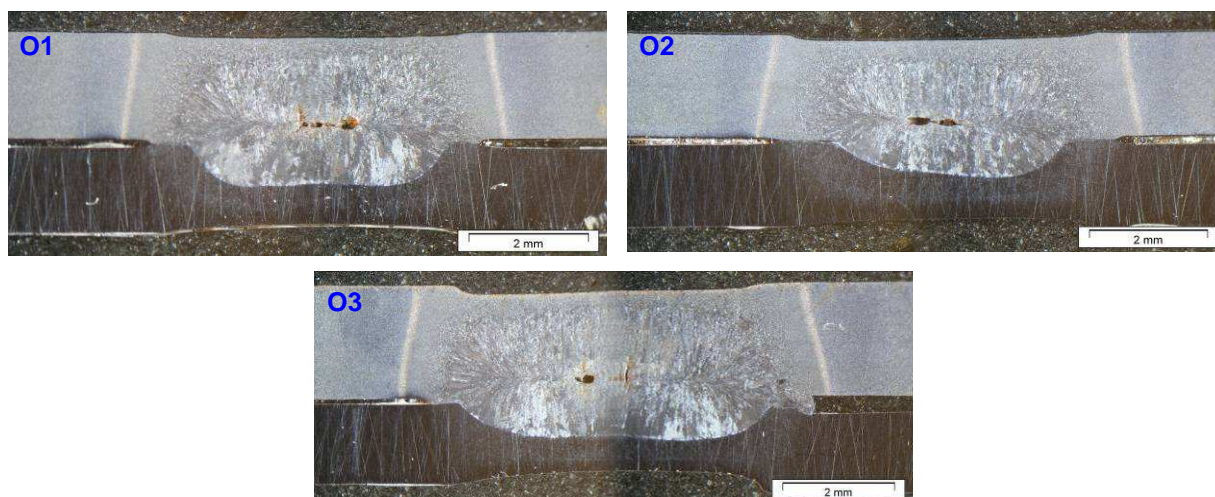
V provozu svařoven automobilových závodů je dbáno na čistotu a pořádek. Je tomu tak hlavně proto, že čistota pracovního prostředí se významně podílí na kvalitě vnitřní struktury svarů. Významným nežádoucím zástupcem nečistoty svařovaných plechů, který je v provozu svařovny velmi obvyklý, je faktor mastnoty, jež se dostává na povrch dílů během procesu lisování.

Celkem byly svařeny 3 vzorky s označením O při různých parametrech za účelem pozorování vlivu mastnoty na kvalitu svaru – viz tab. 7-4.

Pokus	A Svářecí proud [kA]	B Čas svař. [per]	C Síla elektrod [kN]	D Dodavatel materiálu	Označení vzorku
1	7,4	15	2,2	USI	O1 (08_U1)
2	7,4	15	4,0	USI	O2 (14_U2)
3	7,4	22	2,2	BTR	O3 (06_B1)

Tab. 7-4: Hodnoty parametrů u svařování jednotlivých vzorků (O)

Na povrchu těchto vzorků byl před jejich svařením nanesen olej typu MULTIDRAW PL 61SE, který je používán k mazání za účelem dosažení lepší lisovatelnosti.



Obr. 7-48: Makrosnímky bodových svarů vzorků O1 až O3

Z obr. 7-48 je vidět, že u všech třech zkoumaných vzorků došlo k vytvoření dutin uvnitř svarové čočky v dělicí rovině svaru. Oproti vzorkům D1, D2 a D3, které byly svařeny za stejných parametrů, došlo u vzorků O1 a O2 ke vzniku větších dutin s vyšší četností výskytu. Částečně se také snížil průměr svarové čočky d_L u všech vzorků, na nichž byl na povrchu nanesen zmiňovaný olej, oproti těm, které byly svařeny bez aplikace nečistoty.

Mastnota na povrchu plechů má tedy nežádoucí vliv na kvalitu bodových odporových svarů tím, že se podílí na zvýšené tvorbě dutin při tuhnutí roztaveného materiálu uvnitř svarové čočky, a částečně snižuje také průměr svarové čočky a tím i celkovou pevnost bodového svaru (především homogenního).

Souhrn poznatků z metalografie heterogenních svarů

U metalografických pozorování je třeba mít na paměti, že velkou roli při hodnocení naměřených dat hraje fakt, zda se podařilo uvedený svarový bod říznout a vybrousit přesně do jeho středu. Je to podmínka především pro měření průměru svarové čočky d_L a velikosti dutin, které mohou nabývat v jiném místě řezu bodovým svarem jiných velikostí. Z toho důvodu byl na přesnost řezu přesně středem svarové čočky při přípravě metalografických vzorků kladen velký důraz.

Pro souhrn poznatků z pozorování metalografie jednotlivých výbrusů vzorků nejlépe poslouží příslušná naměřená data uvedená v tabulce 7-5.

Ozn. vzorku	Proud [kA]	Čas [per]	Síla [kN]	Materiál	d_L [mm]	Dutiny	Hl. vtlač.	Trhliny	d_{TOO} [mm]
D1	A1=7,4	B1=15	C1=2,2	D1=BTR	4,9	4%	6%	ne	0,30
D2	A1=7,4	B1=15	C2=4,0	D2=USI	4,1	0%	9%	ne	0,42
D3	A1=7,4	B2=22	C1=2,2	D2=USI	5,8	23%	9%	ne	0,36
D4	A1=7,4	B2=22	C2=4,0	D1=BTR	5,4	0%	9%	ne	0,45
D5	A2=8,4	B1=15	C1=2,2	D1=BTR	5,2	23%	6%	ne	0,40
D6	A2=8,4	B1=15	C2=4,0	D2=USI	5,0	11%	9%	ne	0,36
D7	A2=8,4	B2=22	C1=2,2	D2=USI	5,6	11%	27%	ano	0,51
D8	A2=8,4	B2=22	C2=4,0	D1=BTR	5,8	0%	14%	ne	0,42
T1	6,4	17	3,0	USI	3,9	0%	6%	ne	0,38
T2	9,3	17	3,0	USI	4,6	18%	36%	ano	0,60
T3	7,9	10	3,0	USI	3,4	0%	4%	ne	0,50
T4	7,9	25	3,0	USI	4,9	13%	10%	ne	0,46
T5	7,9	17	1,8	USI	5,1	22%	7%	ne	0,38
T6	7,9	17	5,0	USI	4,8	0%	7%	ne	0,52
O1	7,4	15	2,2	USI	4,4	22%	2%	ne	0,39
O2	7,4	15	4,0	USI	4,0	24%	6%	ne	0,54
O3	7,4	22	2,2	BTR	5,7	6%	7%	ne	0,44

Tab. 7-5: Naměřená data z metalografie heterogenních bodových odporových svarů

Po provedení analýzy rozptylu (ANOVA) byly zjištěny podíly vlivu jednotlivých parametrů (faktorů) pro naměřené charakteristiky jakosti zobrazené ve sloupcích druhé poloviny tabulky. ANOVA bylo možné provést ze vzorků D1 až D8, které byly pro tento účel cíleně svařeny za určitých kombinací nastavení parametrů (v jejich daném pracovním rozsahu). Při následujících tvrzeních však bylo čerpáno také z dat naměřených při metalografických hodnoceních vorků T1 až T6 a vzorků O1 až O3.

Průměr svarové čočky

Hodnota průměru svarové čočky d_L je charakteristika jakosti typu B, tzn. čím vyšší je d_L tím lepší pro pevnost svaru. Za účelem dosažení co možná nejlepších hodnoty d_L platí kombinace regulovatelných parametrů $A_2B_2C_1$. Největší podíl na velikosti d_L nese parametr

času svařování – cca 65 %. Nezanedbatelný podíl vlivu má také proud (cca 11 %), přítláčná síla elektrod (cca 8 %) a ještě interakce mezi parametry proudu a síly elektrod (cca 8 %). Interakce mezi parametry proudu a síly ($A \times C$) se projevuje tak, že při vyšší úrovni proudu (A_2) v podstatě nezáleží na úrovni síly, avšak při nižší úrovni proudu (A_1) je pro dosažení většího průměru čocky lepší aplikovat současně nižší úroveň síly elektrod (C_1).

Vnitřní vady svarové čocky

Výskyt dutin uvnitř svarové čocky je jev nežádoucí a hraje významnou roli, když dochází k lomu svarového bodu skrze dělicí rovinu spoje přes svarovou čocku. V případě heterogenních bodových svarů, kdy dochází výhradně k šíření lomové trhliny tepelně ovlivněnou oblastí základního materiálu méněpevného plechu, je však kritérium výskytu dutin málo důležité ve vztahu ke kvalitě bodového svaru. Dutiny a jiné vady z tuhnutí materiálu uvnitř struktury svarové čocky jsou charakteristikou typu S, tj. „čím méně, tím lépe“. Z ANOVA výskytu dutin je vidět, že u daného typu spoje je rozhodujícím parametrem faktor přítláčné síly elektrod (cca 47 %) a interakce proudu a času svařování (cca 33 %). Tato interakce ($A \times B$) funguje tak, že méně dutin je dosaženo, když je současně s vyšší úrovní proudu aplikována v nastavení parametrů i vyšší úroveň času svařování a při nižší úrovni proudu nižší úroveň času. Nejhorší variantou této interakce je pak nastavení A_2B_1 . Optimální kombinace parametrů na svých úrovních je pro nejmenší výskyt dutin $A_1B_1C_2$. Ostatní běžně regulovatelné faktory na tvorbu dutin mají jen malý účinek. Relativně velký účinek na tvorbu dutin však má také šumový (neregulovatelný) faktor nečistot na povrchu svařovaných dílů. Podle intenzity znečištění mohou nečistoty způsobit zvýšenou tvorbu dutin. U vzorku O2 došlo oproti vzorku D2 svařeném při totožných parametrech o navýšení výskytu dutin v dělicí rovině svaru o 24 %.

Hloubka vtlačení elektrod

Norma VW 011 05 uvádí kritérium max. 20 % zúžení profilu daných typů plechů při vtlačení elektrod během procesu bodového odporového svařování.

Při experimentu bylo zjištěno, že vždy při vtlačení elektrod do hloubky větší než cca 25 % původní tloušťky dvou svařovaných plechů vznikají povrchové trhliny v okrajové oblasti vtlačení elektrod v materiálu nízkopevného plechu. Hloubka vtlačení elektrod je charakteristikou typu S a na její velikosti mají největší podíl faktory času svařování (cca 32 %), proudu (cca 20 %), jejich vzájemná interakce (cca 20 %) a faktor volby materiálu, resp. jeho různé tloušťky (cca 14 %). Optimální kombinace faktorů pro minimalizaci hloubky vtlačení elektrod je $A_1B_1D_1$. Interakce $A \times B$ v tomto případě znamená, že nejhorší variantou spolupůsobení těchto dvou parametrů je varianta A_2B_2 , tedy vyšší úroveň proudu i vyšší úroveň času svařování. Ostatní jejich varianty jsou ve výsledku rovnocenné.

Šířka tepelně ovlivněné oblasti

Pro šířku TOO má podstatný účinek interakce proudu a přítláčné síly elektrod (cca 51 %). Čas svařování má podíl vlivu přibližně 30% a proud asi 11%. Pro dosažení co možná nejužší TOO je třeba nastavit tyto parametry na úrovně $A_1B_1C_1$.

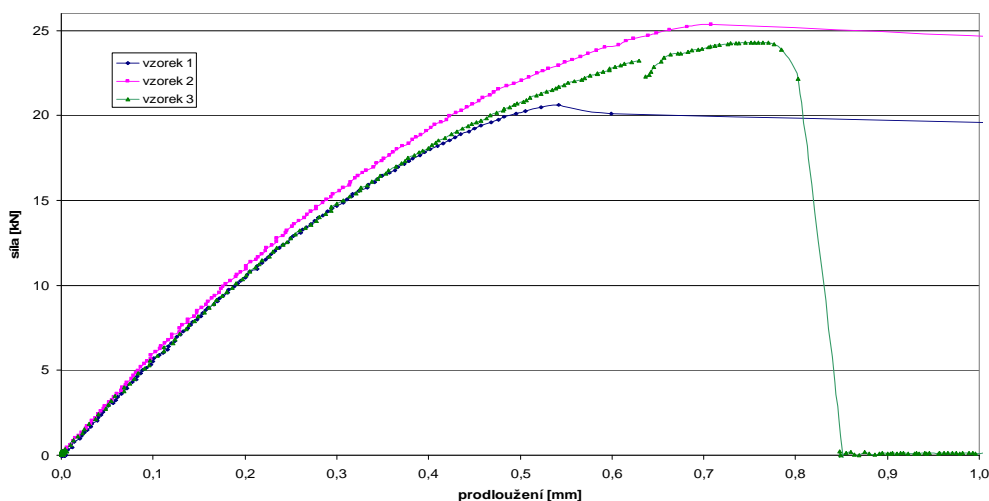
7.3 Materiálové analýzy homogenních svarových spojů

K těmto analýzám byly bodově svařeny vzorky z materiálu BTR165. Vzniklé svary byly testovány následující metodikou zkoušek:

- Tahové statické zkoušky bodových svarů stříhem
 - při různém nastavení parametrů svařování.
- Metalografické makroskopické analýzy bodových svarů
 - před statickou tahovou zkouškou stříhem,
 - po statické tahové zkoušce stříhem.
- Měření mikrotvrdości HVm jednotlivých oblastí svaru
 - v podélné linii plechů napříč čočkou svarového bodu.
- Fraktografie
 - pro stanovení módu lomu.

Materiálové rozbory homogenních svarových spojů byly provedeny pro úplnost pojednání o svažitelnosti daných vysokopevných materiálů. (Tato práce se zaměřuje spíše na heterogenní svarové spoje, které se dnes v konstrukci karoserií vyskytují ve vazbě k vysokopevným dílům častěji než spoje homogenní.) Heterogenní svařování je složitější kvůli rozdílným teplotním cyklům každého kovu [39].

7.3.1 Tahové zkoušky stříhem



Graf 7-13: Pevnostní charakteristika F_{max} homogenních svarů

Tahové zkoušky byly prováděny při rychlosti zatěžování vzorků 12 mm/min (viz graf 7-13). Testovány byly 3 vzorky, které byly svařeny při různých hodnotách parametru času svařování při zachování proudu a přítláčné síly elektrod konstantních. Konkrétní parametry byly následující:

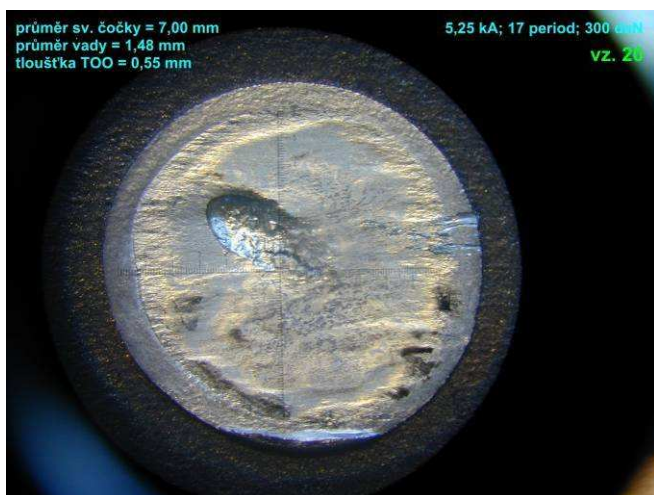
- vzorek 1: proud = 5 kA; čas = 15 per; síla = 1,8 kN
- vzorek 2: proud = 5 kA; čas = 18 per; síla = 1,8 kN
- vzorek 3: proud = 5 kA; čas = 21 per; síla = 1,8 kN

Maximální tahová síla při statické zkoušce stříhem dosahovala hodnot 20÷25 kN. Nejvyšší hodnoty $F_{max} = 25$ kN bylo dosaženo u vzorku č. 2, u kterého byl parametr času svařování nastaven na střed pracovního rozsahu, tj. 18 per.

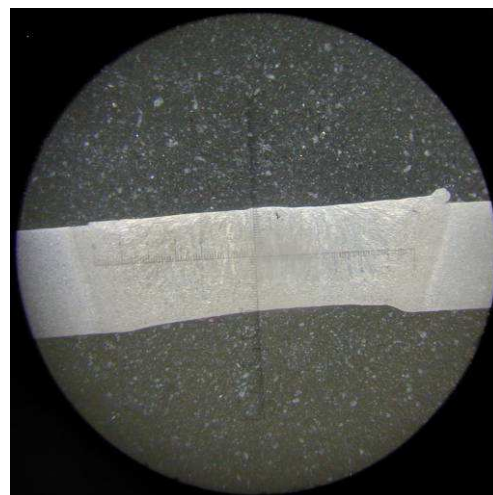
7.3.2 Makroskopická pozorování a měření mikrotvrdomosti

Metodou metalografie byly pozorovány vzorky, které byly podrobeny tahové zkoušce stříhem, a vzorky, které nebyly předem nijak namáhány.

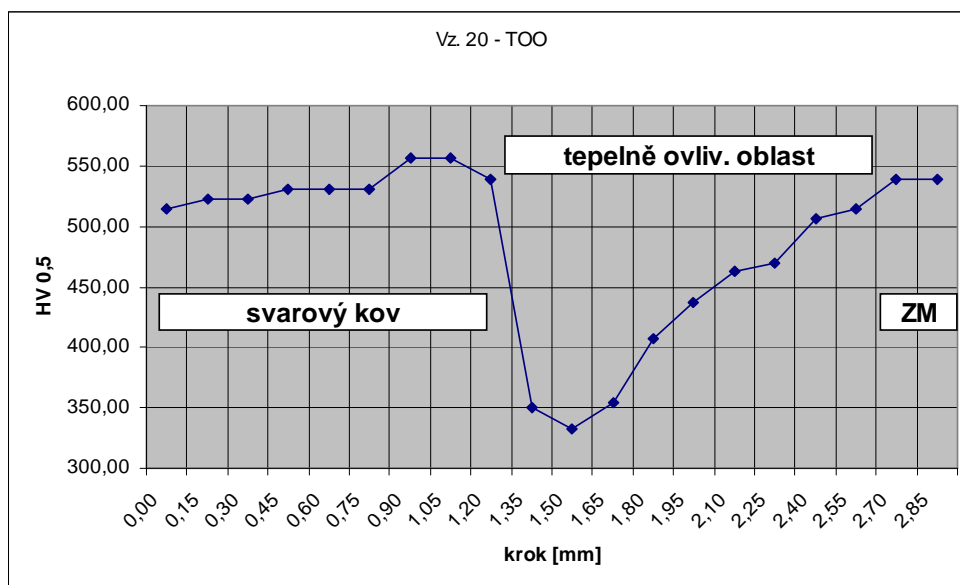
Na uvedených snímcích 7-49 a 7-50 je vidět lomovou plochu po tahové zkoušce a její příčný řez se zobrazením makrostruktury oblastí bodového svaru. Lom proběhl dělicí rovinou svaru přes oblast svarové čočky. Z lomové plochy jsou na první pohled patrné vady vnitřních dutin po ztuhnutí nataveného materiálu svarové čočky.



Obr. 7-49: Lomová plocha homogenního svaru – vz. 20



Obr. 7-50: Příčný řez rovinou svaru – vz. 20



Graf 7-14: Průběh tvrdosti SK-TOO-ZM – vz. 20

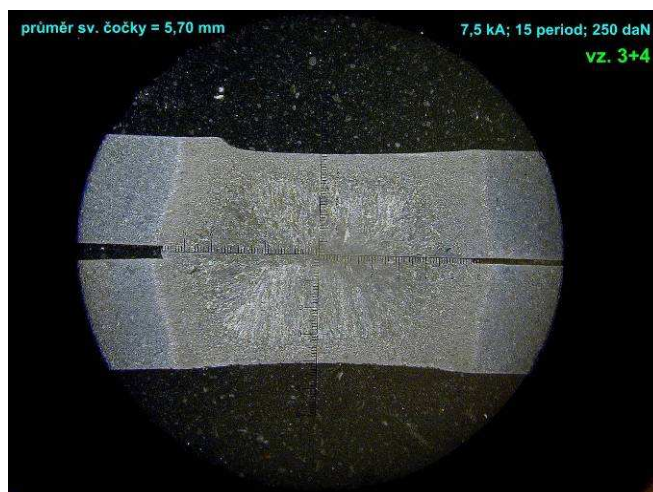
Z měření mikrotvrdomosti v linii od oblasti svarového kovu přes oblast tepelného ovlivnění základního materiálu až do základního materiálu (graf 7-14) bylo patrné, že tvrdost TOO je podstatně nižší než tvrdost oblasti SK nebo ZM. Ze snížené tvrdosti lze usuzovat i na nižší pevnost struktury TOO vzhledem k okolním oblastem svaru. Oblast TOO byla popuštěna vlivem teplotního cyklu ochlazování bodového svaru.

Na snímcích 7-51 a 7-52 je zobrazen povrch bodového odporového svaru, který nebyl podroben tahové zkoušce, a jeho metalografický výbrus při makro zvětšení (cca 10x). Geometrie svaru vzorku St.1 je vyhovující, velikost svarové čočky je dostatečná. Ze snímku

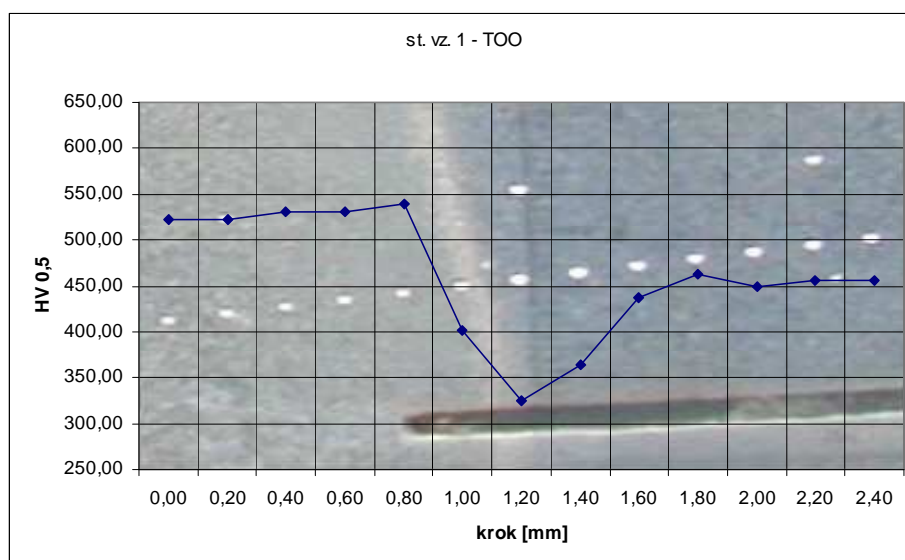
je patrné, že vzorek byl svařen pod mírným vykloněním elektrod do úhlu mimo kolmici k povrchu svařovaných plechů. Tento jev nastává především při ručním bodovém svařování.



Obr. 7-51: Povrch bodového svaru – vz. St.1



Obr. 7-52: Příčný řez rovinou svaru – vz. St.1

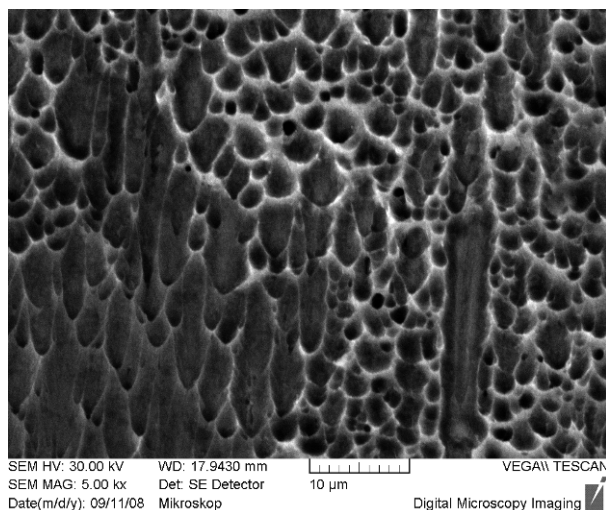


Graf 7-15: Průběh tvrdosti SK-TOO-ZM – vz. St.1

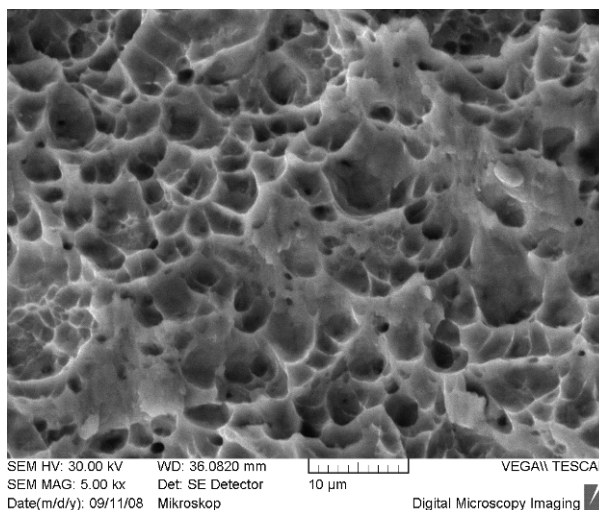
I v tomto případě při měření mikrotvrdosti dle HV0,5 byl zaznamenán prudký pokles v mechanických vlastnostech TOO svaru. Na pozadí grafu 7-15 je zobrazen snímek s jednotlivými vpichy, které měly větší krok (odstup) než byl použit u měření na vzorku 20. Z uvedeného je názorně vidět, že prudký pokles tvrdosti začíná s barevně výraznou hranicí popuštění v TOO. Minimální tvrdost materiálu byla naměřena právě za touto hranicí v orientaci k ZM. Dále směrem k základnímu materiálu dochází opět k plynulému růstu tvrdosti až po hodnotu cca 500 HV0,5, což představuje tvrdost ZM vysokopevné oceli daných dílů.

7.3.3 Fraktografie

Všechny vzorky po tahové zkoušce stříhem, jejichž lomové plochy byly zkoumány fraktograficky pomocí elektronové mikroskopie, měly identický tvárný mód lomu. V oblastech středu a okraje svarové čočky podle směru namáhání byly zaznamenány rozdíly plošného podílu stříhové morfologie lomu (obr. 7-53 a 7-54).

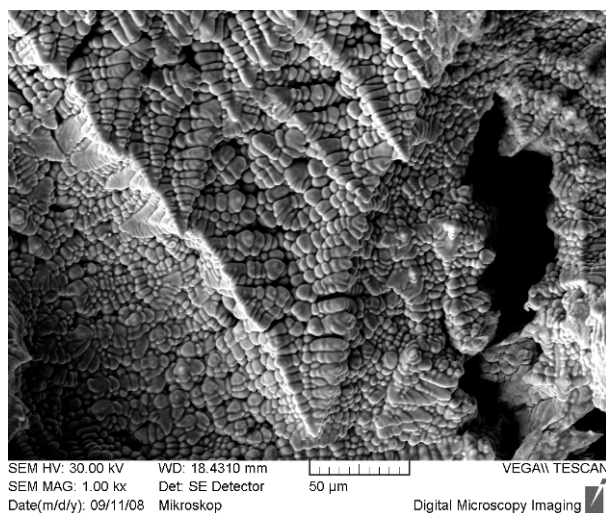


Obr. 7-53: Morfologie lomové plochy ve středové oblasti svarové čičky

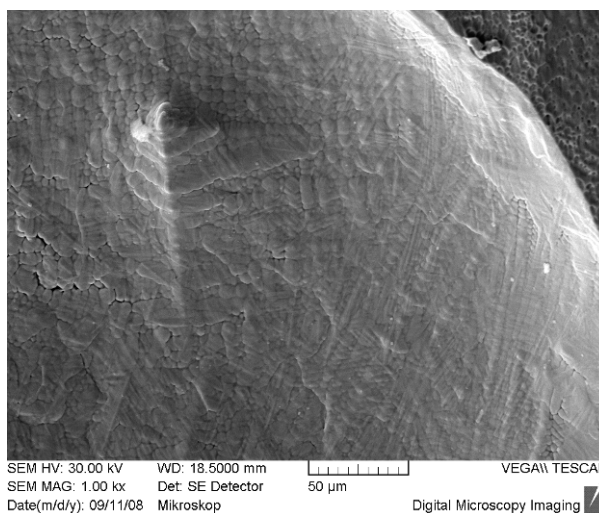


Obr. 7-54: Morfologie lomové plochy v okrajové oblasti svarové čičky

Při menších zvětšeních bylo na lomových plochách možné sledovat různé tendence rozvoje vad; byly nalezeny vady ve vazbě na vnitřní stavbu materiálu (z etapy krystalizace) – mikrořediny viz obr. 7-55 a 7-56.



Obr. 7-55: Vady vnitřní stavby materiálu (A)



Obr. 7-56: Vady vnitřní stavby materiálu (B)

7.4 Závěry z materiálových analýz bodových svarů

Pevnost je prioritní charakteristikou jakosti při posuzování bodových odporových svarů. Pro proces sériové výroby karoserií je však důležitá také nízká variabilita výstupů řízení procesu. Pro hodnocení pevnosti bodových odporových svarů se při výrobě karoserií používá hned několik měřených veličin. V provozu se k určení pevnosti používá především měření průměrů svarových bodů (d_p). V laboratorních podmínkách výroby lze s menší frekvencí nepravidelně měřit pevnost bodových svarů veličinou maximální síly ve stříhu (F_{max}) na trhacím stroji; nebo lze zjistit průměr svarové čičky (d_L) bodového svaru na výbruse použitím postupů metody metalografie. Tyto tři veličiny jsou korelované.

Z tahových zkoušek stříhem a fraktografických pozorování byl určen mód lomu vzorků. K lomům docházelo v tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu svaru po hranici ztavení svarové čičky. Skluzové systémy a reliéf povrchu lomových ploch nasvědčovaly, že u vzorků docházelo k tvárným lomům. Z měření mikrotvrdosti jednotlivých oblastí svarů je

patrné, že struktura svarové čičky je oproti struktuře tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu nízkopevného plechu asi 3-krát tvrdší.

Z metalografických pozorování bylo zjištěno, že v tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu nízkouhlíkového plechu docházelo ke zhrubnutí zrna, což je obecně spojováno se zhoršením mechanických vlastností.

Pevnost bodových odporových svarů a s ní spojená robustnost, závisí na průměru natavené oblasti svarové čičky. Při tahových zkouškách stříhem dochází k vylomení svarové čičky a mnohdy celého svarového bodu z materiálu plechu protikus. Tento způsob lomu je zapříčiněn i ohybovým momentem, který při tahové zkoušce stříhem působí na svarový bod vzorku. Při tahovém namáhání svaru byla iniciována lomová trhlinka ze strany, ze které byl upnut nízkouhlíkový kus plechu svařeného vzorku do čelistí trhačického stroje. Potom trhlinka postupovala dále symetricky po stranách svarového bodu po jeho obvodě až k úplnému vytržení bodu, resp. svarové čičky.

Vylomení celých bodových svarů je vhodným způsobem lomu z důvodu větší absorpce energie oproti lomům skrze oblast svarové čičky [37, 39].

Heterogenita spoje má na výslednou pevnost bodových svarů takový vliv, že svarová čička se vlivem natavení a promíchání materiálů obou spojovaných dílů několikanásobně zpevní oproti základnímu materiálu nízkouhlíkového plechu a k lomům v ní tedy z principu nedochází. Při vlastním experimentu došlo k lomu vždy v materiálu nízkopevného plechu cestou nejmenšího odporu tepelně ovlivněnou oblastí spoje.

8 FMEA procesu bodového odporového svařování

Analýza možných způsobů a důsledků závad (FMEA – Failure Mode and Effect Analysis) je metodologie pro analýzu potenciálních závad v ranné fázi cyklu vývoje výrobku, kdy je snazší přijímat opatření k nápravě a tím zvyšovat spolehlivost již při konstrukci výrobku [32]. Nástroj FMEA je využíván k určování vztahů mezi požadavky na proces a výrobek a k zjištění možných rizik vzniku nevyhovujícího výstupu a jeho důsledků.

Někdy se pro FMEA užívá názvu – analýza rizik. Je tomu tak proto, protože v analýze se u jednotlivých způsobů závad kvantifikují možná rizika a tím se určují i priority pro opatření k nápravě těchto závad.

Analýza FMEA se zpravidla provádí před náběhem nového výrobku nebo zavedením nového procesu do výroby a pokračuje po celou dobu života výrobku. Jako jeden z nástrojů metodiky Six Sigma pomáhá FMEA určit řídicí prvky (ve vývoji a výrobě), které musí být zavedeny, aby byla zajištěna stabilní produkce výrobků dle daných specifikací [29]. Během života výrobku/procesu by se měla FMEA—jakožto živý dokument—změnit vždy, když dojde ke změně stávající konstrukce nebo je pozměněn výrobek či proces.

Existuje několik aplikací FMEA. Patří mezi ně:

- konstrukce, která se zaměřuje na součásti a subsystémy,
- proces, který spadá pod procesy výroby a montáže,
- systém, který se orientuje na globální systémové funkce,
- činnosti služeb,
- softwarové funkce.

Procesní FMEA začíná rozpoznáním funkcí řešeného procesu; je nutné určit všechny požadavky, které se k danému procesu vztahují. Mezi hlavní funkce procesu bodového odporového svařování karosářských dílů z vysokopevných ocelových plechů patří vyhovující spojení svařovaných dílů dle konstrukční dokumentace. Bodové svary musí být dostatečně pevné (musí dobře „držet“) a vyrobené spojení nesmí způsobovat žádné vícepráce při následujících operacích výroby (na finishovacích linkách a v lakovně) a u koncového zákazníka.

V druhé fázi analýzy je třeba identifikovat možné způsoby (módy) závad, které se vztahují k procesu nebo výrobku. Vzhledem k úzkému zaměření se tato práce zabývá jen způsoby závad, které byly pozorovány v předchozích materiálových analýzách vlastních svařených vzorků. Mezi řešené způsoby závad byly zařazeny: malý nebo žádný průměr svarové čočky, rozstřiky, velká hloubka vtlačení elektrod, trhliny a dutiny z tuhnutí uvnitř svarové čočky, trhliny na hranici ztavení (SK-TOO), povrchové trhliny v okrajové oblasti vtlačení elektrod a hrubozrnná struktura tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu v blízkosti hranice ztavení.

S dalším krokem analýzy je třeba určit možné důsledky, které jsou spojené s výskytem konkrétní závady. Důsledků závad může být více. V analýze se však hodnotí pouze ten nejhorší možný. Je dobré jednotlivé důsledky závad popisovat stručně a jasně z pohledu zákazníka nebo následující výrobní operace. Musí být jasně definováno, zda by mohl mít daný způsob závady účinek na bezpečnost nebo zda by mohlo dojít k neshodě s výrobními předpisy. Nejhorší důsledek způsobu závady je kvantifikován číslem stupnice 1 ÷ 10 a určuje její závažnost (Z). Znamka závažnosti se dá snížit jedině změnou návrhu nebo změnou procesu. Důsledkem možných způsobů závad procesu bodových odporových svarů je většinou nedostatečně držící spoj.

Možná příčina (nebo mechanismus závady) znamená způsob, jakým může závada nastat, jak se vyskytuje, je popsána pomocí veličin, které lze regulovat a napravit. Příčiny je třeba identifikovat až k jejich fyzikální podstatě. K poznání jednotlivých příčin chování procesu bodového odporového svařování dobře posloužila metoda návrhu experimentu a provedené materiálové rozbory. Závady na svarových bodech mohou být řízeny pomocí regulace parametrů (faktorů) proudu, času svařování, přítláčné síly elektrod a volbou vhodného materiálu. Pravděpodobnosti, že daná závada nastane ze specifické příčiny, se v metodě FMEA říká výskyt (V) a hodnotí se rovněž stupnicí $1 \div 10$ jako závažnost závady. Příčinu závady je možné odstranit nebo lze zmírnit její účinek změnou návrhu nebo procesu.

Ve výrobě jsou zpravidla všechny procesy nějakým způsobem řízeny a jsou zavedena opatření, která zabraňují v možné míře výskytu způsobu závady nebo příčiny závady, kdyby nastala. Stávající opatření (kontroly) mají podobu preventivních opatření, statistické regulace procesů (SPC) nebo hodnocení charakteristiky jakosti po ukončení procesu. Obecně existují dva druhy nástrojů řízení procesu: prevence a odhalení příčiny možného způsobu závady. V provozu výroby karoserií jsou zavedeny různé druhy kontrol kvality svarových bodů, které jsou prováděny s různou četností podle potřeby a závažnosti aktuálně řešených problémů. Jejich účelem je zabránit expedici vadného výrobku koncovému zákazníkovi.

Mezi hlavní kontroly bodových odporových svarů patří základní vizuální kontrola, klínové nedestrukční zkoušky s návratem testovaného dílu do procesu výroby, sekáčové destruktivní zkoušky a u dílů z vysokopevných ocelí je uplatňována ultrazvuková defektoskopie (NDT) vzhledem k nízké houževnatosti materiálu těchto dílů a jejich nevhodnosti k sekáčovým zkouškám. Laboratorně (metalografie, tahové zkoušky) se bodové odporové svary pravidelně nezkontrolují. Účinnost zmíněných technologií zkoušení bodových svarů je různá a záleží především na odbornosti a zkušenostech zkušební technika.

Odhalitelnost (O) je známka přiřazená stávajícím opatřením k nápravě. Vyjadřuje způsobnost těchto opatření k odhalení možné závady nebo její příčiny. Kvantifikace odhalitelnosti se rovněž provádí podle stupnice $1 \div 10$, ale oproti závažnosti a výskytu má opačnou tendenci ($1 =$ vada jistě odhalitelná, $10 =$ vadu je nemožné odhalit stávajícím řízením procesu).

Součin daných známek závažnosti důsledků závady, pravděpodobnosti výskytu příčiny závady a způsobnosti stávajícího řízení procesu k odhalení závady se nazývá ukazatel priority rizika (UPR).

$$UPR = Z \cdot V \cdot O \quad (31)$$

UPR , anglicky RPN (Risk Priority Number), může nabývat hodnot $1 \div 1000$ a s jeho pomocí lze určit žebříček priorit pro nápravu dílčích způsobů závad. Každý způsob závady a jeho možné příčiny jsou hodnoceny nezávisle a hodnoty Z , V a O jsou určovány individuálně na základě odborných zkušeností lidí, kteří FMEA tvoří. Výsledná velikost ukazatele priority rizika se může u stejných problémů v různých expertních týmech FMEA odlišovat. Proto si každý tým určuje svou referenční hodnotu UPR^* , která značí hranici, po jejímž překročení je nutné pro daný způsob závady navrhnout vhodná nápravná opatření. Závady pod hranicí UPR^* mají nízkou prioritu a následně je ve výrobě není nutné řešit.

Nápravná opatření způsobů závad jsou zaměřena nejprve na vysokou závažnost možných důsledků a potom na vysoký UPR . Účelem jakéhokoliv doporučeného opatření je snížení známek v pořadí: Z , V a O .

Pokud je závažnost 9 nebo 10, znamená to, že v důsledku závady je ohrožená bezpečnost člověka nebo životního prostředí, a je tedy třeba věnovat zvláštní pozornost funkčním opatřením k nápravě těchto závad. V takovém případě je nutné preventivně zabránit vzniku závady vyloučením nebo omezením jejích příčin.

Ke snížení známky závažnosti může vést jen revize návrhu nebo procesu [32]. Stejně tak výskyt příčiny možné závady může být omezen pouze úpravou návrhu nebo procesu. Odhalitelnost závady lze zlepšit uplatněním metod chybového řízení. Zvyšování četnosti kontrol není přitom efektivní. Je třeba se zaměřit na prevenci.

Pro implementaci doporučených opatření k nápravě je třeba pověřit nějakého pracovníka zodpovědností jejich splnění do určitého termínu. Jakmile byla opatření zavedena, je nutné nově odhadnout známky závažnosti, výskytu a odhalitelnosti. Nový *UPR* je opět porovnán s *UPR**, a takto je možné FMEA provést několikrát. FMEA je živý dokument a měla by vždy odrážet aktuální stav.

FMEA je tvořena především v předvýrobních etapách plánování výroby. Měla by být ale provedena vždy, když dojde ke změně vstupů nebo vlivných faktorů daného procesu, resp. návrhu. Jedině tak může efektivně napomoci k cílům neustálého zlepšování.

8.1 Vlastní FMEA

Vlastní FMEA procesu bodového odporového svařování (tab. 8-1) má sloužit jako katalog možných způsobů závad, které mohou v sériové výrobě nastat. Tato forma katalogu pomocí metody FMEA je výhodná v tom, že vedle prostého vyjmenování možných způsobů závad bodových svarů, určuje také jejich důsledky, příčiny a priority pro jejich řešení. Prioritní jsou ty závady, které s sebou nesou největší riziko z hledisek závažnosti, výskytu a špatné odhalitelnosti během procesu výroby. Vlastní FMEA se zabývá pouze heterogenními svarovými spoji.

Při tvorbě FMEA bylo čerpáno ze znalostí, které byly nabyty pomocí metody DOE během rozborů metalografických výbrusů. Díky této metodě byly přesně identifikovány jednotlivé příčiny různých způsobů závad bodových odporových svarů (jejich charakteristik jakosti) – viz tabulka 8-1.

Funkce / požadavky procesu	Možný způsob závady	Možný důsledek závady	Z	Možná příčina / mechanismus závady	V	Stávající řízení procesu	O	UPR
Bodové odporové svařování heterogenních materiálů dílu B-sloupku z vysokopevné martenzitické oceli a dílu vnitřního horního rámu z nízkopevné feritické oceli.	Malý nebo žádný průměr svarové čočky	Nedostatečně držící spoj	9	Malý čas svařování	6	Klínová zkouška s návratem 3x za směnu, ultrazvuková defektoskopie 3x za týden	6	324
				Malý svářecí proud	3	dtto	6	162
				Velká přítlačná síla elektrod	2	dtto	6	108
				Malý svářecí proud v interakci s velkou přítlačnou silou elektrod	2	dtto	6	108
Spojit díly tak, aby dostatečně držely, resp. měly pevnost předepsanou dle normy VW 011 05, a aby nevznikly vícepráce na dalších výrobních operacích.	Velká hloubka vtlačení elektrod	Nedostatečně držící spoj, rozstříky a povrchové mikrotrhliny v okrajové oblasti vtlačení elektrody	6	Velký čas svařování	6	dtto	6	216
				Velký svářecí proud	5	dtto	6	180
				Velký proud v interakci s velkým časem svařování	4	dtto	6	144
				Dosednutí elektrod pod špatným úhlem (vylomení)	7	dtto + šablony	5	210
Trhliny na hranici ztavení (SK-TOO)	Nedostatečně držící spoj	8	Kombinace parametrů: malý proud, malý čas, velká přítlačná síla elektrod	2	Klínová zkouška s návratem 3x za směnu	9	144	
Hrubozrná struktura v TOO základního materiálu nízkopevného plechu	Zhoršené mechanické vlastnosti spoje	2	Kombinace parametrů: malý proud, velký čas svařování (měkký svářecí režim)	4	Klínová zkouška s návratem 3x za směnu	9	72	
Trhliny a dutiny z tuhnutí uvnitř svarové čočky	Žádný navenek znatelný důsledek	1	Nedostatečná přítlačná síla elektrod	7	Ultrazvuková defektoskopie 3x za týden	7	49	
			Velký proud v interakci s malým časem svařování	5	dtto	7	35	
			Znečištěný povrch svařovaných dílů	7	dtto + 100% vizuální kontrola dělníkem v lisovně	6	42	

Tab. 8-1: FMEA procesu bodového odporového svařování heterogenních spojů dílů B-sloupku z vysokopevné oceli a dílů z nízkopevné feritické oceli

FMEA procesu odporového bodového svařování dílu B-sloupku a protikusu vnitřního horního rámu byla vypracována po vyčíslení ukazatele priority rizika (*UPR*). Nejvyšší známku rizika dostala závada malé nebo žádné svarové čočky z příčiny nedostatečného času svařování. Nastavení parametru času hraje v tomto procesu při vzniku možných závad velmi významnou úlohu.

Možné vady (způsoby závad) bodových svarů jsou všeobecně známé a jejich kritéria jsou stanovena normou VW 011 05. Možné důsledky těchto závad lze poznat ze zkušeností z praxe svařovny automobilového závodu. Míra rizika jednotlivých závad byla konzultována se svářecími technologi. Hlavním přínosem analýzy rizik jsou ale jednotlivé příčiny závad ve vztahu k faktorům, které do procesu bodového svařování daných materiálů zasahují. Tyto příčiny jsou principiálním základem fungování celého procesu a bez jejich dokonalé znalosti nelze správně daný proces řídit (regulovat).

U vlastní FMEA nebyla řešena doporučená preventivní opatření a opatření k nápravě. Když započítáme i vizuální kontrolu dělníka na lince, u každého znaku kvality bodového svaru jsou dvě až tři kontroly. Přidávání dalších kontrol by zřejmě jen zdražilo výrobu a v podstatě stejně nic nevyřešilo, resp. ukazatel priority rizika dané závady by se nasazením dalších kontrol na lince snížil jen minimálně.

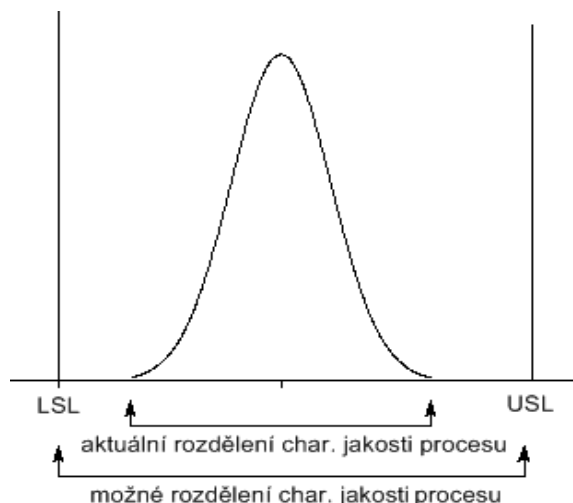
Například ke zlepšení výskytu závady malé (nebo žádné) svarové čočky by bylo vhodným preventivním opatřením nasazení automatizovaného systému sebekontroly svařovacích zařízení Fuzzy Logic. Tento systém je příkladem, jak je možné snížit výskyt závady žádného nebo malého svarového bodu a tím i jeho celkové riziko. Podobných technických systémů řešení existuje více. Všechny jsou ale nákladné a jejich plošné nasazení do sériové výroby karoserií by ztlačilo cenu automobilů.

FMEA je živým dokumentem a mělo by s ním být tak i pracováno. Měl by být neustále upravován a obnovován. FMEA je také velice transparentním dokumentem. V případě procesu bodového odporového svařování jasně určuje podle závažnosti možných důsledků závad, četosti výskytu jednotlivých příčin vedoucích k závadám a možností výroby odhalit tyto závady pomocí daných prostředků řízení, kde je třeba zasáhnout s preventivním opatřením nebo opatřením k nápravě, a určuje tak, které závady mají při řízení procesu prioritu.

9 Způsobilost procesu

Ve výrobě vzniká často požadavek na srovnání výstupu stabilního procesu se specifikací (tolerancemi) a je nutné posoudit, jak dobře proces vyhovuje dané specifikaci. K tomu účelu se srovnává přirozená variabilita procesu s mezními hodnotami specifikace.

Způsobilý proces je takový, u něž spadají téměř všechna naměřená data charakteristiky jakosti dovnitř specifikací (viz graf 9-1, dolní toleranční mez – LSL, horní toleranční mez – USL).



Graf 9-1: Rozdělení naměřených dat charakteristiky jakosti procesu uvnitř specifikací

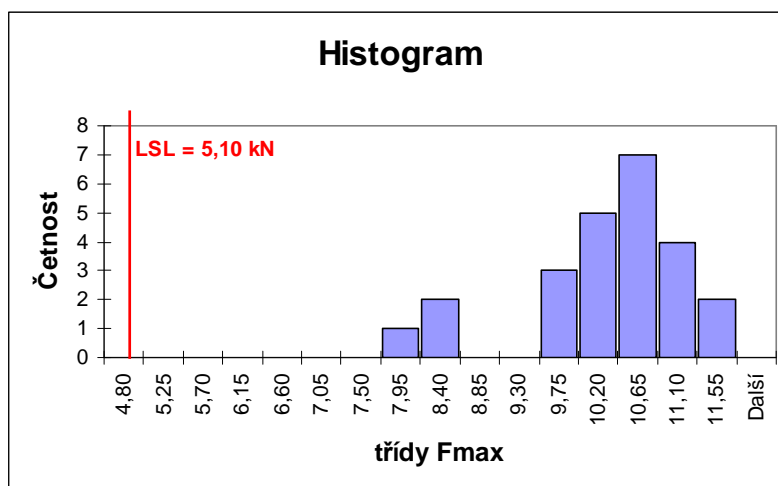
Hodnocení způsobilosti technologického procesu se provádí pomocí indexů způsobilosti. Nejpoužívanějšími indexy jsou C_{pk} , C_p a C_{pm} [33]. Tyto indexy lze použít pouze u znaků řízení procesu, které splňují předpoklad normality (rozdělení pravděpodobnosti dle grafu 9-1).

Vzorek / nastavení param. svařování	F_{max} [kN] / Y1	F_{max} [kN] / Y2	F_{max} [kN] / Y3
D1 / 1111	11,11	10,17	9,94
D2 / 1122	8,16	8,04	7,58
D3 / 1212	10,71	10,26	10,97
D4 / 1221	10,23	10,63	10,83
D5 / 2112	9,93	10,45	9,60
D6 / 2121	10,06	10,02	9,60
D7 / 2211	11,40	10,36	10,53
D8 / 2222	10,94	10,51	9,69

Tab. 9-1: Naměřená data F_{max}

Při experimentu byla naměřena data uvedená v tabulce 9-1. Pro účely zjištění způsobilosti procesu byla použita charakteristika jakosti F_{max} . Z naměřených hodnot v tabulce však nelze posoudit, zda znak pevnosti bodových odporových svarů má normální rozdělení pravděpodobnosti či nikoliv.

K vizualizaci rozdělení dat je vhodné rozdělit data do tříd a sestavit z nich histogram (graf 9-2).



Graf 9-2: Histogram rozložení naměřených dat F_{max}

Z histogramu je vidět, že charakteristika jakosti má normální rozdělení pravděpodobnosti. V levé části histogramu jsou 3 měření, která patří vzorkům pokusu D2. U těchto vzorků došlo k výjimečnému výskytu vady trhliny po obvodu svarové čochky a bylo tak u nich dosaženo skokově menší pevnosti než u ostatních vzorků, u nichž tato trhlina nefigurovala.

Jelikož naměřené hodnoty F_{max} mají normální rozdělení pravděpodobnosti, lze u nich použít výpočty indexů způsobilosti.

Z normy VW 011 05 je daná pouze spodní tolerance $LSL = 5,1$ kN. Druhá horní tolerance není omezena ($USL = +\infty$). Proto bylo pro výpočet způsobilosti použito indexu C_{pk} , který lze vypočítat podle vztahu

$$C_{pk} = \frac{\min[+\infty - \mu, \mu - LSL]}{3 \cdot \sigma} = \frac{\mu - LSL}{3 \cdot \sigma} = \frac{X - LSL}{3 \cdot s} \quad (32)$$

kde X je průměrná hodnota výběru a s je výběrová směrodatná odchylka.

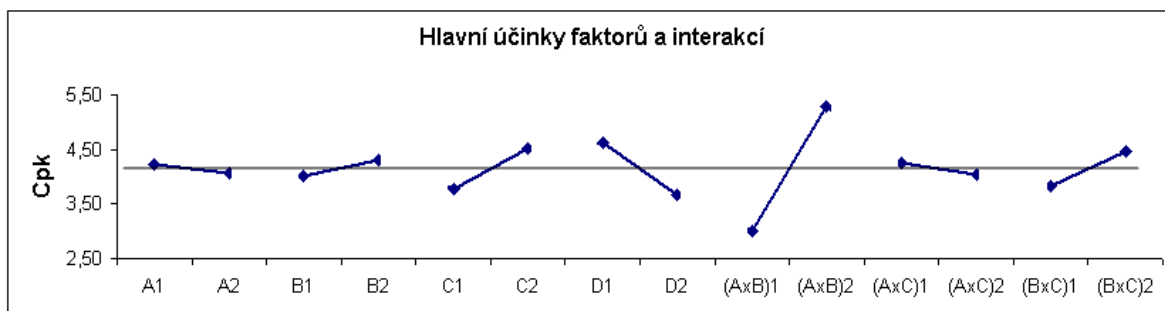
Podle uvedeného vztahu byl spočítán index způsobilosti u každého z pokusů D1 ÷ D8. Každý pokus měl 3 opakování. Při každém pokusu byla použita jiná kombinace nastavení parametrů svařování, a proto vyšel index způsobilosti C_{pk} u každého pokusu jiný – viz tab. 9-2.

Vzorek	Y_1 [kN]	Y_2 [kN]	Y_3 [kN]	LSL [kN]	X [kN]	s	C_{pk}
D1_1111	11,11	10,17	9,94	5,10	10,40	0,620	2,85
D2_1122	8,16	8,04	7,58	5,10	7,93	0,307	3,06
D3_1212	10,71	10,26	10,97	5,10	10,65	0,363	5,09
D4_1221	10,23	10,63	10,83	5,10	10,56	0,306	5,95
D5_2112	9,93	10,45	9,60	5,10	9,99	0,430	3,79
D6_2121	10,06	10,02	9,60	5,10	9,89	0,253	6,32
D7_2211	11,40	10,36	10,53	5,10	10,76	0,558	3,38
D8_2222	10,94	10,51	9,69	5,10	10,38	0,635	2,77

Tab. 9-2: Způsobilost procesu bodového svařování heterogenních svarů dle metody DOE

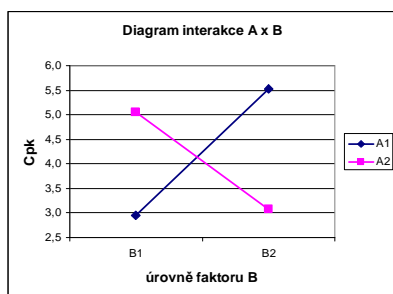
Uvedená tabulka 9-2 představuje plán experimentu podle metody DOE, kde měřenou charakteristiku jakosti F_{max} nahradil index způsobilosti C_{pk} , který značí variabilitu výrobního procesu ve vztahu k pevnosti bodových svarů. Tímto způsobem lze určit účinky jednotlivých parametrů svařování na způsobilost výrobního procesu. Způsobilost je především znakem kvality procesu výroby, nikoliv produktu.

Pro představu je třeba vědět, že pro automobilový průmysl platí podmínka způsobilosti $C_{pk} \geq 1,67$. Této podmínce vyhovují tedy hodnoty způsobilosti všech pokusů, resp. nastavení parametrů bodového svařování heterogenních spojů.

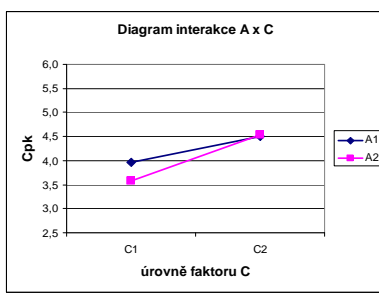


Graf 9-3: Hlavní účinky faktorů a jejich interakcí (C_{pk})

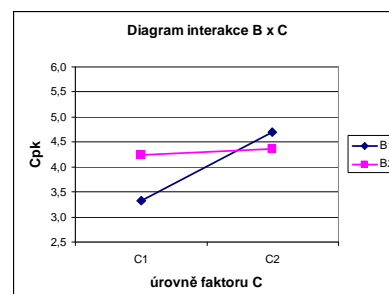
Z grafu hlavních účinků jednotlivých faktorů (parametrů) a interakcí (graf 9-3) je možné odečíst úroveň jednotlivých parametrů a interakcí, které poskytují vyšší hodnotu způsobilosti procesu. Bez uvažování interakcí by byla pro způsobilost procesu optimální kombinace nastavení faktorů $A_1B_2C_2D_1$. Konkrétní hodnoty úrovní faktorů jsou shodné s hodnotami návrhu experimentu pro charakteristiku jakosti d_p .



Graf 9-4: Interakce Ax B (C_{pk})



Graf 9-5: Interakce Ax C (C_{pk})



Graf 9-6: Interakce B x C (C_{pk})

Z grafů interakcí je vidět, že nejvýznamnější a skutečně silnou interakcí faktorů je interakce Ax B (proud vs. čas svařování). V této interakci nabývá maximální hodnoty způsobilosti kombinace A_1B_2 . To je v souladu s optimální kombinací faktorů bez interakcí. Takže i s uvažováním interakcí platí, že nejlepší kombinace faktorů z hlediska způsobilosti procesu je $A_1B_2C_2D_1$.

Faktor	f	S	V	F	S'	P
A (svářecí proud)						sloučeno s chybou
B (čas svařování)						sloučeno s chybou
C (přítlačná síla elektrod)	1	1,12	1,12	13,93	1,04	7,23%
D (dodavatel materiálu)	1	1,80	1,80	22,38	1,72	11,96%
Int. A x B	1	10,33	10,33	128,73	10,25	71,48%
Int. A x C						sloučeno s chybou
Int. B x C	1	0,78	0,78	9,66	0,69	4,85%
Chyba	4	0,32	0,08			4,48%
Celkem	7	4,27				100,00%

Tab. 9-3: ANOVA po sloučení nevýznamných faktorů a interakcí (C_{pk})

Dominantní význam pro způsobilost procesu bodového odporového svařování má interakce faktorů proudu a času svařování. Z jejího grafu je patrné, že je pro způsobilost vhodné nastavovat buď velký čas a zároveň malý proud (měkký režim svařování) a nebo obráceně malý čas a velký proud (tvrdý režim svařování). Měkký režim je však pro

způsobnost o něco málo výhodnější. Pro způsobnost procesu je nevhodné nastavovat parametry proudu a času na stejné úrovni.

Druhým nejvýznamnějším faktorem je faktor dodavatele materiálu. S tímto faktorem jsou spojeny především rozdílné parametry tloušťky plechů a jejich povrchové úpravy. Z hlediska způsobnosti procesu bodového svařování přitom vyšel lépe materiál BTR165. Plech z vysokopevné oceli materiálu obchodní značky BTR165 tlustší a nemá povrchovou úpravu na bázi Al-Si jako materiál USIBOR 1500.

Třetím faktorem, který má nemalý vliv na způsobnost procesu, je faktor přítláčné síly elektrod, který dává lepší výsledky při své větší úrovni.

Další vlivy na znak způsobnosti C_{pk} je možné vyčíst z uvedených grafů 9-3 až 9-6 a hodnot tabulky ANOVA (tab. 9-3).

Oproti původnímu návrhu experimentu s charakteristikou jakosti průměru svarového bodu dává charakteristika způsobnosti jiné výsledky. V optimální kombinaci svářecích parametrů se liší v nastavení faktoru přítláčné síly (C). Nastává zde konflikt zájmů. Pro vysokou pevnost je lepší mít přítláčnou sílu elektrod na nižší úrovni, kdežto pro lepší způsobnost procesu je lepší její vyšší úroveň. Ostatní parametry mají své optimální nastavení stejně jak pro pevnost, tak pro způsobnost procesu svařování.

Vzhledem k malému počtu opakování pokusů, resp. vzorků, je třeba výpočty jednotlivých C_{pk} brát orientačně.

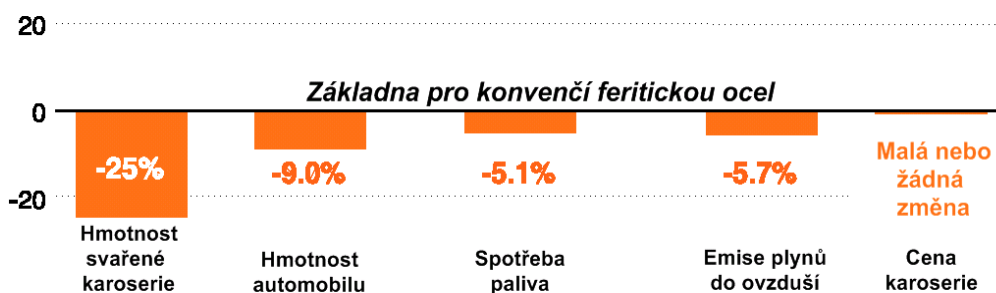
10 Ekonomická rozvaha

Při rozhodování o nasazení nového materiálu do konstrukce automobilu je kritickým prvkem cena. Výpočet nákladů při zavedení nové technologie a nového materiálu je ztížen tím, že chybí zkušenosti a historie naměřených dat.

U svařené karoserie s sebou přechod od konvenčních nízkopevných feritických ocelí k vysokopevným nese celou řadu aspektů. Zřejmě nejdůležitějším motivem ke změně je zvýšená pasivní bezpečnost posádky vozu. Z vysokopevnostních materiálů se konstruuje především vnitřní díly karoserie, které jsou stěžejní pro odolnost vůči nárazu.

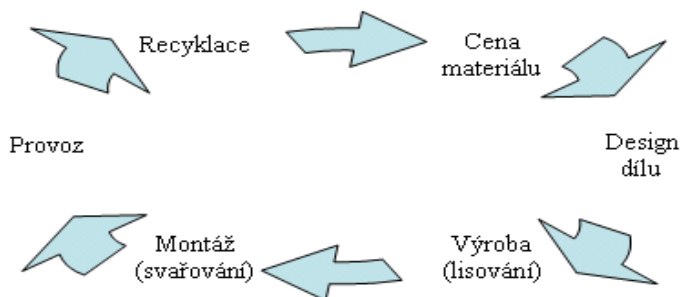
Výsledkem nasazení vysokopevných materiálů v konstrukci karoserie je snížení její celkové hmotnosti. Vnitřní díl z vysokopevné oceli nahrazuje v karoserii hned několik dílů výztuhy z běžné nízkopevné oceli, které by jinak musely být v konstrukci použity pro zachování stejné tuhosti a bezpečnosti konstrukce. Dnes se v automobilovém průmyslu vysokopevné oceli při konstrukci karoserie používají v takové míře, že dochází k redukci její hmotnosti v průměru o 25 %. Celková hmotnost vozu se tak sníží asi o 9 % (viz obr. 10-1). U pětimístného vozu to znamená přibližně 117 kg [34].

Snížení hmotnosti s sebou přináší zlepšení jízdních vlastností automobilu, úspory při dimenzování trakčních agregátů vozu, snížení spotřeby paliva a tím i snížení emisí plynů do ovzduší. Při snížení hmotnosti uvedeného typu vozu lze ušetřit na spotřebě paliva asi 5,1 %, což by snížilo emise přibližně o 5,7 % [33].



Obr. 10-1: Úspory při nasazení vysokopevné oceli do konstrukce karoserie [34]

Určení rentability je u každého produktu komplexní záležitostí. U vysokopevných dílů karoserie je třeba brát v potaz jednak náklady spojené se změnou technologie svařování ve svařovně, je třeba započítat i rozdílnou cenu materiálu, vývoj vysokopevného dílu, náklady na jeho vylisování, úsporu dílů karoserie a úsporu při její montáži a změnu nákladů spojenou s provozem automobilu a jeho recyklací [35] – viz obr. 10-2.



Obr. 10-2: Náklady na produkt v jeho životním cyklu

Nákupní cena jednotky materiálu vysokopevné oceli je oproti konvenční oceli vyšší. Díky redukci celkového počtu dílů karoserie lze ušetřit na množství lisů a lisovacích nástrojů. Pro lisování dílů z vysokopevné oceli je třeba složitějších a dražších nástrojů, dochází při tom k větší spotřebě energie a cyklus lisování trvá déle. Ve svařovně se díky redukci dílů ušetří

pracovní operace, prostor, svářecí roboti a stroje, energie, sníží se počet zaměstnanců, výrobní časy a zjednoduší se přitom logistika.

Díl B-sloupku, který je pro automobilky zpravidla dodávaným dílem, je z vysokopevné martenzitické oceli legované borem. Díl je tvářen technologií lisování za tepla. Výroba tohoto dílu je na poměry automobilového závodu velice nákladná a obtížná. Výroba dílů technologií lisování za tepla je specializací oceláren a je to součástí jejich dobře střeženého know-how.

Nákup dílů B-sloupku je nákladný. V jeho ceně se mimo pořizovací ceny materiálu a výroby plechu promítá především cena lisů a nástrojů dodavatele. Technologie lisování za tepla je velice náročná na spotřebu energie. Lisovací nástroje jsou kvůli prudkým změnám teplot velmi namáhány.

To, co je nutné zaplatit za nákup dílů B-sloupku od dodavatele, je možné ušetřit tím, že už není třeba dalších výztuh B-sloupku, tak jako tomu bylo dříve, a odpadnou tedy operace lisování těchto výztuh a design lisovacích nástrojů, ve svařovně se sníží počty výrobních operací, robotů, svářecích strojů [34] apod. Logisticky se přitom proces výroby karoserií částečně zjednoduší.

Podle analytických studií výrobců karosářských dílů z vysokopevných ocelí i vývojových konstruktérů karoserií je nasazování vysokopevných ocelí do konstrukce svařené karoserie pro automobilky ve výsledku dokonce mírně cenově výhodné [34].

Jak už bylo v úvodu kapitoly řečeno, hlavní výhody nasazení vysokopevných materiálů ve výrobě automobilu tkví především ve zvýšené bezpečnosti jeho konstrukce a v šetrnějším provozu automobilu vzhledem k životnímu prostředí.

11 Diskuze experimentálních výsledků

Wei Li et al. [23] zkoumal chování procesu bodového odporového svařování pomocí metody Design of Experiment podle G. Taguchiho. K tomuto účelu použil charakteristiku jakosti S/N pro vyjádření robustnosti seřízení jednotlivých parametrů (faktorů) procesu. Aby mohl posoudit vliv jednotlivých šumových faktorů, které se podílí na variabilitě procesu, použil pro svůj experiment plán s klouzavým faktorem proudu a vnějším polem s řízeným nastavením šumových faktorů. Vnější pole bylo použito pro zjištění míry vlivu každého ze zvolených šumových faktorů zvlášť.

Ve vlastním experimentu byly posuzovány šumové faktory, které měly vliv na odezvu pevnosti, robustnosti či způsobilosti, hromadně, standardním opakováním jednotlivých pokusů experimentu. Bylo tomu tak proto, že pro vlastní experiment nebylo důležité znát vlivy konkrétních faktorů na odezvu, nýbrž bylo třeba určit celkový vliv všech šumových faktorů a zjistit, za jakých podmínek jej lze minimalizovat a snížit tak variabilitu na výstupu procesu.

Wei Li et al. ve své práci popisuje vzájemnou závislost jednotlivých parametrů procesu bodového odporového svařování. Tyto dílčí závislosti byly pozorovány i při vlastním experimentu a byly vysvětleny pomocí významných interakcí jednotlivých faktorů – viz dílčí výsledky provedených ANOVA.

Z provedených rešerší ohledně materiálových analýz bodových svarů byla pozornost práce zaměřena především na výzkumy, které provedl S. Aslanlar et. al. [24, 25, 26] a Y. Zhang et. al. [37, 38, 46]. V jejich pracích byly popsány experimenty svařování homogenních i heterogenních materiálů, byl sledován proces opotřebením svářecích elektrod a byla přítom sledována především míra vlivu jednotlivých procesních parametrů bodového svařování na charakteristiky pevnosti v tahu a mikrotvrdosti jednotlivých oblastí svarů.

Aslanlar a Zhang nekvantifikovali přesný podíl vlivu jednotlivých faktorů na uvedené charakteristiky jakosti. Aslanlar však uvádí, že nejdůležitějším parametrem při bodovém odporovém svařování dílů z klasických karosářských ocelí je parametr přítláčné síly elektrod.

Při vlastním experimentu byl faktor přítláčné síly pozorován jako velmi významný při posuzování pevnosti bodového svaru z pohledu interakce s faktorem svářecího proudu. Bylo zjištěno, že faktor přítláčné síly elektrod má poměrně velký vliv na pevnost bodového svaru pouze pokud je nastaven faktor svářecího proudu na malou úroveň uvnitř svého pracovního rozsahu. U dané aplikace heterogenních materiálů byl u procesu bodového svařování při vlastním experimentu vyhodnocen jako nejdůležitější faktor času svařování. Tento faktor měl největší podíl na výsledné pevnosti svařených bodů.

Parametry výroby materiálu 22MnB5 technologií lisování za tepla se ve své práci podrobně zabýval M. Naderi et al. [36]. Zkoumal účinky anizotermální deformace na martenzitickou strukturu výše uvedeného materiálu. Sledoval především vliv doby austenitizace, teploty první deformace, velikosti vnitřního pnutí v materiálu, aplikované síly při lisování a rychlosti ochlazování v nástroji na výslednou vnitřní strukturu materiálu.

Z této práce bylo možné odhadnout původ dílčích rozdílů ve struktuře základního materiálu vlastních vzorků.

Při analýze možných způsobů a důsledků závad bylo postupováno podle zkušeností vlastních a zkušeností údržby a svářecích technologií sériové výroby karoserií. Hodnocení rizik jednotlivých závad na základě jejich závažnosti, pravděpodobnosti výskytu a jejich odhalitelnosti během procesu výroby odpovídá provozu svařovny automobilového závodu.

Vypočtená způsobilost procesu, které bylo dosaženo při svařování vzorků vlastního experimentu, se blíží způsobilosti, jež dosahuje provoz svařovny automobilového závodu,

protože byl při svařování aplikován postup dle příslušných automobilových standardů. V automobilovém závodě je však nutno počítat s větší mírou vlivu různých šumových faktorů a s poněkud větší variabilitou na výstupu procesu bodového svařování, než tomu bylo při laboratorních podmínkách vlastního experimentu.

Kapitola ekonomické rozvahy vycházela především z dostupných případových studií, které se zabývají rentabilitou nasazení vysokopevných ocelí při stavbě karoserie vozu. Diskuze na toto téma byla vedena i se zástupci plánování sériové výroby a vývoje karoserií Škoda Auto a.s.

12 Vlastní přínos

V disertační práci byla zkoumána aplikace technologie bodového odporového svařování na úzkou skupinu materiálů vysokopevné oceli legované borem.

Jedná se o specifický proces výroby, který je dnes v automobilovém průmyslu široce aplikovaný a zahrnuje řadu aktuálních podnětů pro výzkum, který v této oblasti není dosud uzavřen. V dostupné literatuře nebylo jednoduché najít již dříve řešené studie, které by se zabývaly uvedenou problematikou svařitelnosti vysokopevných borem legovaných ocelí. Bylo nutné pracovat s podklady výrobců daných materiálů a konzultovat se svářecími technologi.

Právě z výše uvedených důvodů bylo vlastní téma disertační práce zadáno. Přínosy této práce jsou založeny na reálném základě a jednotlivé závěry jsou plně aplikovatelné v praxi (ve výrobě karoserií automobilového závodu).

Hlavním přínosem uvedené práce je provedení materiálových analýz základního vysokopevného materiálu dodaných dílů a jejich heterogenních i homogenních bodových svarů (viz kapitola č. 7). Byly přitom zkoumány znaky nekvality, které vznikaly buď inherentně vlivem konkrétní jakosti základního materiálu vysokopevné oceli během etap výroby, a nebo byly během procesu spojování laboratorně nasimulovány vhodným nastavením svářecích parametrů.

Pomocí metody DOE byly zjištěny principiální mechanismy, které určují kvalitu bodových svarů při aplikaci na uvedený materiál (viz kapitola č. 6). Byla určena (kvantifikována) míra vlivu šumových/neregulovatelných faktorů i konkrétních regulovatelných faktorů na charakteristiky jakosti – pevnost bodových svarů, robustnost nastavení regulace a způsobilosti procesu bodového odporového svařování. Díky uvedené metodě byl určen i způsob řízení míry výskytu jednotlivých vnějších a vnitřních vad spoje.

Při analýze možných způsobů/módů a důsledků závad byly kvantifikovány priority – které závady jsou pro daný proces svařování dílů z vysokopevné oceli v provozu svařovny důležité a na které je třeba se zaměřit (viz kapitola č. 8).

Na základě určených priorit je zřejmé, kterými parametry a jak je možné daný proces řídit, aby bylo dosaženo požadované kvality svarů. Tyto požadavky se mohou v čase měnit v rámci příslušných norem.

Vybrané výsledky disertační práce mohou být věcným příspěvkem k cílenému a účelnému řízení procesu bodového odporového svařování vysokopevných ocelí v podmínkách automobilového závodu.

Vlastní metodika disertační práce je obecně aplikovatelná také na hodnocení svařitelnosti jiných kombinací svařovaných vysokopevných ocelí, než byly hodnoceny právě v této práci.

Závěry a shrnutí hlavních poznatků

V práci byly použity metody materiálových analýz a metody pro hodnocení kvality zkoumaných bodových odporových svarů vysokopevných ocelových plechů dodaných dílů B-sloupku.

Při rozborech fyzikálních, chemických a mechanických vlastností materiálu byly aplikovány metody fraktografie, chemické spektrální EDX analýzy, metalografie, měření mikrotvrdosti HVm a statické tahové zkoušky stříhem. Pro identifikaci vybraných mikromechanizmů byla použita rastrovací elektronová mikroskopie a energiová difrakční mikroanalýza.

Pro hlubší poznání daného procesu a jeho řízení byly použity metody DOE (návrh experimentu), FMEA (analýza možných způsobů a důsledků závad) a určení způsobnosti procesu svařování.

Výsledky studia vlivu materiálových parametrů na svařitelnost

Z provedených analýz základního materiálu a následné odezvy svarového cyklu byly identifikovány jako vybrané materiálové parametry v případném vztahu ke svařitelnosti níže uvedené záležitosti.

U obou typů vysokopevné oceli byla zjištěna převážně homogenní martenzitická stavba. Ocelový plech z materiálu USIBOR 1500 (oproti BTR165, který není nijak povrstven) nese povrchovou úpravu na bázi subvrstev Al, Si a Fe. Měření prokázalo lokální rozdíly v poměru tloušťek těchto subvrstev – viz obr. 7-6. Tyto skutečnosti poukazují na konkrétní parametry tepelného zpracování.

Lomové chování bylo hodnoceno na vzorcích ze statických zkoušek celistvého materiálu a rovněž zkoušek svarových spojů (pevnost heter. svarů – tab. 6-9). To umožnilo hodnocení možných vlivů svarového cyklu na základní lomové tendence a sledování postupu lomu v návaznosti na odpovídající změny dosažených pevnostních charakteristik, které byly získány v rámci měření prováděného experimentu.

Fraktograficky byly hodnoceny charakteristické oblasti lomů, postup trhliny v testovaném materiálu a souvislost s okolní stavbou oceli, popř. mikročistotou. Mód lomu byl u zúčastněných materiálů nízkopevné i vysokopevné oceli výlučně tvárný s typickou stavbou stříhových můstků oddělujících velice jemné iniciační kavity.

U materiálu USIBOR 1500 byl u vybraných vzorků zjištěn výskyt defektního lomu vlivem lokální zvýšené koncentrace a nerovnoměrné distribuce dezoxidačních prvků (především Ca) a S (viz graf 7-6) a na lomové ploše byly místy řídce nalezeny i křehké inkluze (TiN). Vlivem identifikovaných vad sekundárních částic byla u daného vzorku zaznamenána nízkoenergetická tvárná separace, která znamenala lokální snížení únosnosti materiálu. Při výskytu těchto vnitřních vad materiálu v oblasti spojování lze předpokládat jejich negativní vliv na kvalitu bodových odporových svarů.

U homogenních bodových svarů materiálu BTR165 byly na lomových plochách zaznamenány vady ve vazbě na primární vnitřní stavbu materiálu (mikrořediny).

U heterogenních bodových svarů oproti homogenním se šířila lomová trhlina po obvodě svarové čočky, čímž došlo k jejímu vylomení z nízkopevného feritického materiálu dílu protikusy (obr. 7-21). Tento průběh lomu je vhodný vzhledem k vysoké absorpci dodané energie, což má velký význam zejména pro odolnost karoserie proti nárazu.

U materiálu BTR165 byla na výbrusech metalograficky pozorována lokální heterogenita vnitřní struktury. Při povrchu martenzitického plechu bylo zjištěno oduhličení a

přítomnost sekundárních zrn feritu. Ve středu plechu byla naopak nalezena podélně orientovaná místa s vyšším obsahem C (potvrzeno měřením mikrotvrlosti).

Povrchová úprava materiálu USIBOR 1500 ojediněle vykazovala vadu nehomogenního složení subvrstev. Vlivem lokální absence povrchové subvrstvy na bázi Al-Si došlo ke vzniku mezivrstvy oxidů železa, což vedlo k dekohezi celé ochranné vrstvy a následnému oduhličení základního materiálu martenzitické oceli. Tato vada představuje lokální negativní vliv na svařitelnost.

Zkoumány byly i vnitřní vady homogenních a heterogenních svarových spojů. U homogenních bodových svarů docházelo v oblasti svarového kovu (čočky) vlivem teplotního cyklu ochlazování k tvorbě dutin a trhlin různé morfologie.

U heterogenních svarů byly vedle uvedených vad dutin a trhlin z ochlazování zaznamenány také jiné typy trhlin. Jako nejzávažnější typ nespojitosti byla zjištěna trhlina po obvodu svarové čočky u vzorku D2 (obr. 7-33), která zapříčinila výrazně nižší pevnost spoje oproti ostatním vzorkům. Chemická analýza EDX prokázala v této souvislosti přítomnost Al, což poukazuje na její původ v povrchové úpravě materiálu USIBOR 1500. Po detailnějším pozorování byly nalezeny mikrotrhliny (obr. 7-34) uvedeného typu místy v celé oblasti svarového kovu. Tyto trhliny jsou pravděpodobně iniciovány v souvislosti s křehkou fází Al_2O_3 , což představuje negativní účinek na pevnost bodových svarů (především homogenních). Na vzorek D2 byla přitom aplikována nejslabší kombinace nastavení svářecích parametrů (viz tab. 7-5) z hlediska velikosti vytvořené tepelné energie během cyklu odporového svařování.

Dalším zjištěným typem trhlin byly trhliny v okrajové oblasti vtlačení elektrod. Tyto trhliny byly spojeny s jevem nadměrné hloubky vtlačení elektrod (cca nad 25 % celkové tloušťky plechů) vlivem aplikace vysokých úrovní parametrů procesu svařování (především proudu a času svařování). Tyto trhliny mohou mít negativní vliv na celkovou dynamickou únosnost spoje.

Vlivem rozdílných schopností vedení tepla spojovaných heterogenních materiálů došlo v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) feritického plechu ke zhrubnutí zrna (horší mechanické vlastnosti), zatímco u vysokopevného plechu došlo k zjemnění zrna v TOO a na jejím rozhraní s neovlivněným základním materiálem (ZM) k popuštění materiálu a precipitaci karbidů (patrné z obr. 7-42).

Měření mikrotvrlosti bylo zaměřeno především na zjištění mechanických vlastností jednotlivých struktur svarových spojů. Výrazné snížení tvrdosti bylo zaznamenáno u heterogenních bodových svarů na rozhraní oblastí SK a TOO feritického plechu. Skrze toto rozhraní byla iniciována lomová trhlina svařených vzorků během statické tahové zkoušky stříhem. Měření mikrotvrlosti HVm byl zaznamenán pevnostní rozdíl tohoto rozhraní – viz graf 7-10.

Pomocí zkoušky mikrotvrlosti oblastí spoje byla nalezena také zóna popuštění vysokopevného materiálu na rozhraní TOO-ZM.

Výsledky aplikace metod řízení kvality

Analýzou dat (ANOVA – viz tab. 6-13) získaných po provedení experimentu metodou DOE bylo zjištěno, že na zkoumanou charakteristiku jakosti průměru svarového bodu (d_p) má největší účinek nastavení parametru, resp. faktoru času svařování. Tento procesní parametr je třeba v provozu svařovny řídit (regulovat) účelně a velmi citlivě. Ostatní parametry je možné podřídít jiným prioritám než pevnostním a mohou být nastaveny na své provozně ekonomické úrovni.

Podobné výsledky hodnocení významnosti jednotlivých procesních parametrů byly získány z ANOVA charakteristiky S/N při zkoumání robustnosti. Bylo zjištěno, že šumové/neregulovatelné faktory procesu bodového odporového svařování dílů z vysokopevné oceli mají nejmenší podíl vlivu právě při nastavení regulovatelných faktorů na úroveň, které dávají vyšší hodnoty pevnosti svarových bodů.

U způsobilosti daného procesu se nejvíce projevuje účinek interakce regulovatelných faktorů proudu a času svařování (ANOVA viz tab. 9-3). Z hlediska variability pevnosti spojů v rámci tolerancí je nelze kombinovat jinak než v měkkém nebo tvrdém režimu. Je nutné nastavovat vždy buď velký čas (B_2) a malý proud (A_1) nebo velký proud (A_2) a malý čas (B_1) – viz graf 9-4. Kombinace malého proudu a malého času nebo opačná má za následek rapidní snížení způsobilosti (C_{pk}) celého procesu bodového svařování dílů z vysokopevné oceli.

Analýza možných způsobů a důsledků závad (FMEA) heterogenních bodových svarů vyšetřila, že prioritním rizikem daného procesu je závada žádná nebo malé svarové čochky, jejímž důsledkem je nedostatečně držící spoj. Nedostatečně držící spoj je důsledkem velmi závažným, který je nutné už z principu řešit, protože by mohlo dojít v mezních případech k ohrožení bezpečnosti posádky vozu. Nejčastější pravděpodobnou příčinou této závady může být aplikace parametru času svařování v nedostatečné úrovni. Závada žádná nebo malé svarové čochky je v současném provozu sériové výroby karoserií řízena/kontrolována několika způsoby zkoušení s různou četností v čase. Výsledná tabulka FMEA je uvedena v disertační práci.

Z aplikace výše uvedených metod řízení kvality a materiálových analýz plynou principiální informace o tom, jak je možné za provozu sériové výroby regulovat a řídit proces bodového odporového svařování dílů z vysokopevné borem legované oceli tak, aby byl minimalizován výskyt nežádoucích materiálových vad a aby výsledná pevnost spojů, robustnost nastavení parametrů a způsobilost procesu byla co možná nejlepší.

Seznam použité literatury

- [1] Shimizu T., Funakawa Y., Kaneko S.: "High Strength Steel Sheets for automobile Suspension and Chassis Use - High Strength Hot-Rolled Steel Sheets with Excellent Press Formability and Durability for Critical Safety Parts". In: *JFE GIHO No. 4*, 2004, s. 22–27.
- [2] Wieländer and Schill UK Ltd [online]: "Boron Steel". Dostupné z WWW: <<http://www.wielanderschill.co.uk/html/boronsteel.htm>>. [cit. 5.12.2007]
- [3] Takashina K., Nagura H., Kurokawa H.: "Vehicle side sill structure". United States Patent 6409257 [online]. 2002. Dostupné na WWW: <<http://www.freepatentsonline.com/6409257.html>>. [cit. 5.12.2007]
- [4] Pfestorf M., Von Rensburg J.: "Functional Properties of High Strength Steel in The Body in White". Vydal BMW AG, 2007.
- [5] Aspacher J.: "New forms for modern autobody stamping, High-strength, low-weight requirements spur new developments". In: *Stamping Journal* [online]. 12. září 2006. Dostupné z WWW: <http://www.thefabricator.com/MetalsMaterials/MetalsMaterials_Article.cfm?ID=1440>. [cit. 5.12.2007]
- [6] World Auto Steel [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.worldautosteel.org/>> [cit. 5.12.2007]
- [7] Abušínov A.: „Zvýšení hodnoty konstrukčních dílů tvářených z plechu“. Časopis MM 2006/10, 23.11.2006 v rubrice Trendy/Tváření, s. 14-22.
- [8] Bauer D.: „Inovativní technologie v automobilovém průmyslu“. Časopis MM 2007/10, 9.10.2007 v rubrice Trendy/Tváření, s. 22-26.
- [9] Tichý J.: "Svařování v automobilovém průmyslu - 2. část". Časopis Svět svaru, Ostrava, 2006, s. 14-15.
- [10] Kuncipál J. et al: Teorie svařování. Vydal SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha 1986. 04-211-86.
- [11] PV 6702: „Bodové svarové spoje. Pevnostní zkoušky ocelových materiálů.“ Volkswagen AG, 2004.
- [12] "Ultrasonic testing on USIBOR spot welds". Vydal ArcelorMittal, 2007.
- [13] VW 011 05-1: „Odporové bodové svařování. Konstrukce, výpočty, zajištění procesu, nepovrstvené a povrstvené plechy.“ Volkswagen AG, 2004.
- [14] VW 50060-1: „Kaltgewalzte Dualphasenstähle. Werkstoffanforderungen.“ Volkswagen AG, 2007.
- [15] VW 50060-2: „Warmgewalzte Dualphasenstähle. Werkstoffanforderungen.“ Volkswagen AG, 2007.
- [16] VW 50060-3: „Kaltgewalzte Komplexphasenstähle. Werkstoffanforderungen.“ Volkswagen AG, 2007.
- [17] VW 50060-4: „Warmgewalzte Komplex- und Martensitphasenstähle. Werkstoffanforderungen.“ Volkswagen AG, 2007.
- [18] DIN EN ISO 14 273: „Měření vzorků a provedení pro stříhovou tahovou zkoušku na svarových spojích provedených odporovým, švovým a bradavkovým svařováním s raženými bradavkami“. 2003.
- [19] DIN EN 10149: „Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen“. 1995.

- [20] TL 4225: „Legierter Vergütungsstahl 22MnB5 unbeschichtet oder vorbeschichtet. Werkstoffanforderungen an Halbzeuge und Bauteile.“ Volkswagen AG, 2006.
- [21] Blecharz, P.: Design of Experiments. DOE (Taguchiho přístup). Vydal PQM, 2001, Ostrava.
- [22] Datinský F.: Kvalita v prostředí automobilového průmyslu dle ISO/TS 16949. Podkladový materiál odborného kurzu. Vydala Agentura Ámos, Chrudim, 2008.
- [23] Wei Li, S. Jack Hu, Shao-Wei Cheng: "Robust Design and Analysis for Manufacturing Processes with Parameter Interdependency". In: *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 21/No. 2, 2002, s. 93-100.
- [24] S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, E. Ilhan, Z. Demir: "Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding". In: *Materials and Design 28* (2007), s. 2–7.
- [25] S. Aslanlar: "The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry". In: *Materials and Design 27* (2006), s. 125–131.
- [26] S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, E. Ilhan: "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding". In: *Materials and Design 29* (2008), s. 1427–1431.
- [27] L. Cretteur, C. Pynthe: "Weldability of USIBOR: Application on Skoda Auto". Vydal Arcelor Research – Innovation R&D. 2006.
- [28] Kopec P., Sitár I.: "Ultrazvuková kontrola - skúšanie bodových zvarových spojov v automobilovom priemysle". Vydal SlovCert spol. s r.o. Bratislava, 1999.
- [29] VDA 4: „Zajišťování kvality před sériovou výrobou. Zajišťování kvality během realizace produktu. Metody a postupy.“ Vydal Svaz automobilového průmyslu (VDA), ČSJ, Praha 2005. ISBN 80-02-01682-3.
- [30] Koutský J., Jandoš F., Karel V.: Lomy ocelových částí. Vydal SNTL, Praha, 1976.
- [31] N. Harlin, T.B. Jones, J.D. Parker: "Weld growth mechanism of resistance spot welds in zinc coated steel". In: *Journal of Materials Processing Technology* 143–144 (2003), s. 448–453.
- [32] Analýza možných způsobů a důsledků závad (FMEA). Vydala Česká společnost pro jakost, 2001, Praha. ISBN 80-02-01476-6.
- [33] Tošenovský, J.: „Hodnocení způsobilosti technologického procesu u jednostranných tolerancí“. In: *Metody zlepšování jakosti. Six Sigma a další strategie*. Praha, 2002. ISBN 80-238-9410-2.
- [34] World Association Environmental Case Study [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.worldsteel.org/>> [cit. 11.12.2007]
- [35] R. Roth: "Cost Model Analysis with Advanced High Strength Steels". In: *Great Designs in Steel seminar*. 2006.
- [36] M. Naderi, A. Saeed-Akbari, W. Bleck: "The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel". In: *Materials Science and Engineering A* 487 (2008), s. 445–455.
- [37] HongGang Yang, YanSong Zhang, XinMin Lai, Guanlong Chen: "An experimental investigation on critical specimen sizes of high strength steels DP600 in resistance spot welding". In: *Materials and Design 29* (2008), s. 1679–1684.

- [38] Zhang Xiaoyun, Chen Guanlong, Zhang Yansong, Lai Xinmin: "Improvement of resistance spot weldability for dual-phase (DP600) steels using servo gun". In: *Journal of Materials Processing Technology* (2008).
- [39] P. Marashi, M. Pouranvari, S. Amirabdollahian, A. Abedi, M. Goodarzi: "Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steels". In: *Materials Science and Engineering A 480* (2008), s. 175–180.
- [40] Yaowu Shi, Zhunxiang Han: "Effect of weld thermal cycle on microstructure and fracture toughness of simulated heat-affected zone for a 800MPa grade high strength low alloy steel". In: *Journal of Materials Processing Technology 207* (2008), s. 30–39.
- [41] Dean Deng: "FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects". In: *Materials and Design 30* (2009), s. 359–366.
- [42] Joonoh Moon, Sanghoon Kim, Jongho Lee, Byoungchul Hwang, Chang Gil Lee, Changhee Lee: "Effect of Cu and B addition on tempering behavior in the weld CGHAZ of high strength low alloy plate steel". In: *Materials Science and Engineering A 497* (2008), s. 153–159.
- [43] Luo Yi, Liu Jinhe, Xu Huibin, Xiong Chengzhi, Liu Lin: "Regression Modeling and Process Analysis of Resistance Spot Welding on Galvanized Steel Sheet". In: *Materials and Design 2008*.
- [44] Ahmet Hasanbasoglu, Ramazan Kacar: "Resistance spot weldability of dissimilar materials (AISI 316L–DIN EN 10130-99 steels)". In: *Materials and Design 28* (2007), s. 1794–1800.
- [45] Poggio S., Ponte M., Gambaro C., Adamowski J.: "Resistance Spot Welding of Advanced High Strength Steel DP600". Università degli Studi di Genova, 2006.
- [46] X.Q. Zhang, G.L. Chen, Y.S. Zhang: "Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels". In: *Materials and Design 29* (2008), s. 279–283.
- [47] B. Bouyousfi, T. Sahraoui, S. Guessasma, K. Tahar Chaouch: "Effect of process parameters on the physical characteristics of spot weld joints". In: *Materials and Design 28* (2007), s. 414–419.
- [48] Schmidová E., Culek B., Švanda P., Vágner J., Kapsa V., Konečný M.: „Stanovení míry vlivu rozptylu jakosti materiálu na jakost svarového spoje.“ In: *Svařování vysokopevnostních materiálů (průběžná zpráva)*, 12.11.2008, s. 1-34.
- [49] Kubanová J.: *Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi*. Vydal Statis, Bratislava, 2004. ISBN 80-85659-37-9.

Seznam obrázků

Obr. 2-1: Vysokopevné díly karoserie vozu [5]	5
Obr. 2-2: Rozklad karoserie Volvo XC90 [6]	6
Obr. 2-3: Ferit-martenzit (DP) [6]	7
Obr. 2-4: Bainit a austenit – dodatkové fáze (TRIP) [6]	7
Obr. 2-5: Diagram pevnosti různých karosářských ocelí [6]	8
Obr. 3-1: Schéma procesu kalení lisováním [8]	10
Obr. 3-2: ARA diagram oceli USIBOR 1500 [2]	11
Obr. 4-1: Složky odporu svarového spoje při bodovém odporovém svařování [10]	13
Obr. 4-2: Princip testování bodových svarů ultrazvukem [12]	14
Obr. 5-1: Díly B-sloupku (horní – USIBOR 1500, dolní – BTR165)	15
Obr. 5-2: Díl protikusu (vnitřní horní díl rámu)	15
Obr. 5-3: Rozměry svařeného vzorku (mm)	16
Obr. 5-4: Nařezané vzorky ke svařování	17
Obr. 5-5: Svažené vzorky	17
Obr. 5-6: Roztržené vzorky	18
Obr. 5-7: Metalografické vzorky	18
Obr. 6-1: Schéma procesního modelu	20
Obr. 6-2: Schéma náhodného odběru vzorků po profilu dílu B-sloupku	26
Obr. 6-3: Axiální vychýlení elektrod svařecích kleští [23]	27
Obr. 6-4: Úhlové vychýlení elektrod svařecích kleští [23]	27
Obr. 6-5: Špatné slícování svařovaných dílů [23]	28
Obr. 6-6: Namáhání bodového svaru ve střihu [13]	30
Obr. 6-7: Průměr vytrženého bodu d_p [13]	30
Obr. 6-8: Mód lomu svarových bodů při tahové zkoušce střihem (zv. cca 10x)	34
Obr. 6-9: Roztržená série vzorků	34
Obr. 7-1: Makrostruktura materiálu BTR165 – vz. BTR 25-08-1	47
Obr. 7-2: Mikrostruktura materiálu BTR165 – vz. BTR 25-08-3	47
Obr. 7-3: Lokální zhrubnutí austenitického zrna – vz. BTR 25-08-2	48
Obr. 7-4: Oduhličení povrchové vrstvy – vz. BTR 25-08-2	48
Obr. 7-5: Lokální poškození povrchové vrstvy – vz. USI 24-81-1	49
Obr. 7-6: Měření tloušťek subvrstev – vz. USI 24-81-1	49
Obr. 7-7: Vada povrchové úpravy – vz. USI 24-81-1	50
Obr. 7-8: Makroskopický povrchový vzhled vady – vz. USI 24-81-1	50
Obr. 7-9: Linie a oblast EDX analýzy oxidické „mezivrstvy“ – vz. USI 24-81-2	51
Obr. 7-10: Výlučně tvárný mód lomu – vz. USI 24-81-04	53
Obr. 7-11: Vliv inkluzí – vz. USI 24-81-03	53
Obr. 7-12: Makroskopický vzhled lomové plochy v části defektního lomu – vz. BTR 25-08-Y1	53
Obr. 7-13: Defektní část lomové plochy – vz. BTR 25-08-Y1 (orientace dle obr. 7-12)	54
Obr. 7-14: Detail defektní části lomové plochy – vz. BTR 25-08-Y1	54

Obr. 7-15: Pásmo delaminace oceli – oblast „A“ z obr. 7-12	55
Obr. 7-16: Mapping pásma delaminace oceli – oblast „A“ z obr. 7-12	55
Obr. 7-17: Charakteristická mikrostruktura materiálu USIBOR 1500 – vz. USI 24-81-3.....	56
Obr. 7-18: Charakteristická mikrostruktura materiálu BTR165 – vz. BTR 25-08-2	56
Obr. 7-19: Tahová zkouška stříhem u bodového odporového svaru.....	57
Obr. 7-20: Jamka po vylomení svarového bodu – vzorek D2, zv. cca 10x.....	61
Obr. 7-21: Vylomený svarový bod - D7, zv. cca 10x.....	61
Obr. 7-22: Lom v oblastech vně svarové čočky v několika stupních – vz. D7.....	61
Obr. 7-23: Tvárná charakteristika lomové plochy materiálu nízkopevné oceli – vz. D2.....	62
Obr. 7-24: Skluzové systémy na lomové ploše materiálu nízkopevné oceli – vz. D2.....	62
Obr. 7-25: Bod zkoumání chemického složení hranice TOO-ZM na povrchu vysokopevného plechu	62
Obr. 7-26: Směr měření linie mikrotvrdosti heterogenního svarového bodu.....	63
Obr. 7-27: Makrosnímky bodových svarů vzorků D1 až D8	67
Obr. 7-28: TOO nízkopevného ocelového plechu vzorků D1 až D8	69
Obr. 7-29: Trhliny z tuhnutí uvnitř svarové čočky.....	70
Obr. 7-30: Plynové dutiny uvnitř svarové čočky	70
Obr. 7-31: Trhlina po hranici SK-TOO – vz. D2	70
Obr. 7-32: Hranice SK-TOO bez trhlin – vz. D3	70
Obr. 7-33: Trhlina mezi TOO a SK – vz. D2	71
Obr. 7-34: Trhlina v SK – detail – vz. D2.....	71
Obr. 7-35: Trhlina v SK – detail – vz. D2.....	72
Obr. 7-36: Trhliny v SK – vz. D2.....	72
Obr. 7-37: Povrchová trhlina v oblasti vtláčení elektrody – vz. D7.....	73
Obr. 7-38: Struktura oblasti svarového kovu – vz. D5 (BTR165)	74
Obr. 7-39: Struktura oblasti svarového kovu – vz. D6 (USIBOR 1500)	74
Obr. 7-40: Tepelně ovlivněná oblast – vz. D5 (BTR165).....	74
Obr. 7-41: Tepelně ovlivněná oblast – vz. D6 (USIBOR 1500)	74
Obr. 7-42: Karbidy na hranici ZM-TOO – vz. D7 (USIBOR 1500).....	75
Obr. 7-43: Detail Fe ₃ C na hranici ZM-TOO – vz. D2 (USIBOR 1500)	75
Obr. 7-44: Tepelně ovlivněná oblast materiálu nízkouhlíkového plechu – vz. D6.....	75
Obr. 7-45: Rozhraní TOO-ZM materiálu nízkouhlíkového plechu – vz. D6.....	75
Obr. 7-46: Makrosnímky bodových svarů vzorků T1 až T6.....	77
Obr. 7-47: TOO nízkopevného ocelového plechu vzorků T1 až T6.....	78
Obr. 7-48: Makrosnímky bodových svarů vzorků O1 až O3.....	79
Obr. 7-49: Lomová plocha homogenního svaru – vz. 20.....	83
Obr. 7-50: Příčný řez rovinou svaru – vz. 20	83
Obr. 7-51: Povrch bodového svaru – vz. St.1	84
Obr. 7-52: Příčný řez rovinou svaru – vz. St.1.....	84
Obr. 7-53: Morfologie lomové plochy ve středové oblasti svarové čočky	85
Obr. 7-54: Morfologie lomové plochy v okrajové oblasti svarové čočky.....	85
Obr. 7-55: Vady vnitřní stavby materiálu (A).....	85

Obr. 7-56: Vady vnitřní stavby materiálu (B)	85
Obr. 10-1: Úspory při nasazení vysokopevné oceli do konstrukce karoserie [34].....	96
Obr. 10-2: Náklady na produkt v jeho životním cyklu.....	96

Seznam tabulek

Tab. 2-1: Legury oceli 22MnB5 [8]	8
Tab. 5-1: Chemické složení materiálu BTR165 výrobní šarže 34/08	15
Tab. 5-2: Chemické složení materiálu nízkopevné oceli (dle EN 10292, HX260PD).....	15
Tab. 6-1: Iniciační test úrovní faktoru proudu – nastavení parametrů	23
Tab. 6-2: Iniciační test úrovní faktoru času – nastavení parametrů	24
Tab. 6-3: Iniciační test úrovní faktoru síly elektrod – nastavení parametrů.....	24
Tab. 6-4: Životnost elektrod vzhledem k povrchovým úpravám [28].....	28
Tab. 6-5: Ortogonální soustava L_8	31
Tab. 6-6: Hodnoty úrovní zvolených regulovatelných faktorů	32
Tab. 6-7: Plán vlastního experimentu.....	32
Tab. 6-8: Náhodné pořadí svařování jednotlivých vzorků	33
Tab. 6-9: Naměřená data experimentu (F_{max} , d_p)	34
Tab. 6-10: Návrh experimentu a výsledky měření průměrů svarových bodů	35
Tab. 6-11: Průměrné a hlavní účinky faktorů a interakcí (d_p).....	35
Tab. 6-12: ANOVA před sloučením nevýznamných faktorů a interakcí (d_p).....	37
Tab. 6-13: ANOVA po sloučení nevýznamných faktorů a interakcí (d_p).....	39
Tab. 6-14: Návrh experimentu a výsledky poměru S/N.....	41
Tab. 6-15: Průměrné a hlavní účinky faktorů a interakcí (S/N)	41
Tab. 6-16: ANOVA před sloučením nevýznamných faktorů a interakcí (S/N)	42
Tab. 6-17: ANOVA po sloučení nevýznamných faktorů a interakcí (S/N).....	43
Tab. 7-1: Naměřená data F_{max} a d_p	59
Tab. 7-2: Hodnoty parametrů u svařování jednotlivých vzorků (D).....	67
Tab. 7-3: Hodnoty parametrů u svařování jednotlivých vzorků (T)	76
Tab. 7-4: Hodnoty parametrů u svařování jednotlivých vzorků (O).....	79
Tab. 7-5: Naměřená data z metalografie heterogenních bodových odporových svarů	80
Tab. 8-1: FMEA procesu bodového odporového svařování heterogenních spojů dílů B-sloupku z vysokopevné oceli a dílů z nízkopevné feritické oceli	90
Tab. 9-1: Naměřená data F_{max}	92
Tab. 9-2: Způsobilost procesu bodového svařování heterogenních svarů dle metody DOE ...	93
Tab. 9-3: ANOVA po sloučení nevýznamných faktorů a interakcí (C_{pk})	94

Seznam grafů

Graf 6-1: Závislost faktorů proudu, času a síly elektrod [23]	22
Graf 6-2: Hlavní účinky faktorů a interakcí (d_p).....	36
Graf 6-3: Interakce AxB (d_p).....	36
Graf 6-4: Interakce AxC (d_p).....	36
Graf 6-5: Interakce BxC (d_p).....	36
Graf 6-6: Paretův graf hlavních účinků (d_p).....	38
Graf 6-7: Hlavní účinky faktorů a interakcí (S/N).....	41
Graf 6-8: Interakce AxB (S/N)	42
Graf 6-9: Interakce AxC (S/N)	42
Graf 6-10: Interakce BxC (S/N).....	42
Graf 6-11: Paretův graf hlavních účinků (S/N)	42
Graf 7-1: Gradient lokálních rozdílů tvrdosti po tloušťce plechu z materiálu BTR165 – vz. BTR 25-08-3.....	47
Graf 7-2: Charakteristická stavba subvrstev – vz. USI 24-81-1.....	50
Graf 7-3: Liniová EDX analýza oxidické „mezivrstvy“ – vz. USI 24-81-2	51
Graf 7-4: Plošná EDX analýza oxidické „mezivrstvy“ – vz. USI 24-81-2	52
Graf 7-5: Chemická EDX analýza detailu z obr. 7-14	54
Graf 7-6: Pásmo delaminace oceli – oblast „A“ z obr. 7-12	55
Graf 7-7: Tahové zkoušky ve stříhu při nastavení dle pokusů metody DOE (3x8).....	58
Graf 7-8: Závislost veličin F_{max} a d_p	60
Graf 7-9: Chemická EDX analýza hranice TOO-ZM na povrchu vysokopevného plechu materiálu USIBOR 1500	63
Graf 7-10: Zkoušky mikrotvrdosti HV0,5 dle pokusů DOE.....	65
Graf 7-11: Chemická EDX analýza detailu z obr. 7-34 – vz. D2.....	71
Graf 7-12: Chemická EDX analýza detailu z obr. 7-36 – vz. D2.....	72
Graf 7-13: Pevnostní charakteristika F_{max} homogenních svarů.....	82
Graf 7-14: Průběh tvrdosti SK-TOO-ZM – vz. 20.....	83
Graf 7-15: Průběh tvrdosti SK-TOO-ZM – vz. St.1.....	84
Graf 9-1: Rozdělení naměřených dat charakteristiky jakosti procesu uvnitř specifikací.....	92
Graf 9-2: Histogram rozložení naměřených dat F_{max}	93
Graf 9-3: Hlavní účinky faktorů a jejich interakcí (C_{pk})	94
Graf 9-4: Interakce AxB (C_{pk}).....	94
Graf 9-5: Interakce AxC (C_{pk}).....	94
Graf 9-6: Interakce BxC (C_{pk})	94

Seznam zkratk

A5	interní označení vozu Octavia II. generace
A _{c3}	teplota přeměny feriticko-cementitické struktury na austenit (°C)
AHSS	Advanced High-Strengt Steel
Al	hliník
ARA	anizotermický rozpad austenitu
AxB	interakce faktorů A a B
AxC	interakce faktorů A a C
B	bór
B1	vzorek 1. šarže z materiálu BTR165
B2	vzorek 2. šarže z materiálu BTR165
B3	vzorek 3. šarže z materiálu BTR165
B6	interní označení vozu Superb
BTR	BTR165
BxC	interakce faktorů B a C
C	uhlík
C.F.	korekční faktor
C.I.	interval spolehlivosti
CP	Complex Phase Steel
C _p	index způsobilosti procesu (předvýroba)
C _{pk}	index způsobilosti procesu (výroba)
C _{pm}	index způsobilosti procesu (Taguchi)
DFJP	Dopravní fakulta Jana Pernera
DIN	Deutsches Institut für Normung (Německý institut pro normalizaci)
d _L	průměr svarvé čočky (mm)
DOE	Design of Experiments (návrh experimentů)
DP	Dual Phase Steel
d _p	průměr svarového bodu (mm)
dtto	rovněž
EN	evropská norma
EURO NCAP	European New Car Assessment Programme
F	síla (N)
f _A	stupně volnosti pro faktor A
F _B	F-kritérium pro významný faktor B
F _e	železo
f _e	stupně volnosti pro chybu
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis (analýza možných způsobů a důsledků závad)
F _{sv}	přítláčná síla elektrod (kN)
f _T	celkový počet stupňů volnosti
HSLA	High-Strength Low Alloy Steel
HSS	High-Strengt Steel
HV _m	metoda určení tvrdosti povrchu podle Vickerse
I	elektrický proud (A)
ISO	International Organisation for Standardization (Mezinárodní organizace pro standardizaci)
I _{sv}	svářecí proud (kA)
M _f	teplota martenzit finish
Mn	mangan

MS	Martensitic Steel
M_s	teplota martenzitu start
MSD	střední kvadratická odchylka
NDT	Non-Destructive Testing (nedestruktivní zkoušení)
O	odhalitelnost
Obr.	obrázek
P_A	procentuální podíl účinku faktoru A
PC	Personal Computer (osobní počítač)
per	perioda
Q	teplo (J)
QS	Quality Standards (standardy kvality)
R	elektrický odpor (Ω)
R_c	celkový odpor (Ω)
R_m	mez pevnosti (MPa)
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu (MPa)
S/N	poměr signál/šum
S_A	součet čtverců pro faktor A
S'_B	čistý součet čtverců pro významný faktor B
S_e	součet čtverců pro chybu experimentu
Si	křemík
SK	svarový kov
SPC	Statistical Process Control (statistická regulace procesu)
S_T	celkový součet čtverců odezev
τ	čas (s)
Tab.	tabulka
TOO	tepelně ovlivněná oblast
TRIP	Transformation-Induced Plasticity Steel
TS	Technical Specification (technická specifikace)
T_{sv}	čas svařování (per)
U1	vzorek 1. šarže z materiálu USIBOR 1500
U2	vzorek 2. šarže z materiálu USIBOR 1500
U3	vzorek 3. šarže z materiálu USIBOR 1500
UHSS	Ultra-High-Strength Steel
UPR	ukazatel priority rizika
USI	USIBOR 1500
V	výskyt
VA	průměrný čtverec (rozptyl)
VDA	Verband der Automobilindustrie (Svaz automobilového průmyslu)
V_e	rozptyl způsobený chybou
v_{kh}	kritická rychlost ochlazování
vz.	vzorek
Z	závažnost
ZM	základní materiál
Zn	zinek
zv.	zvětšení

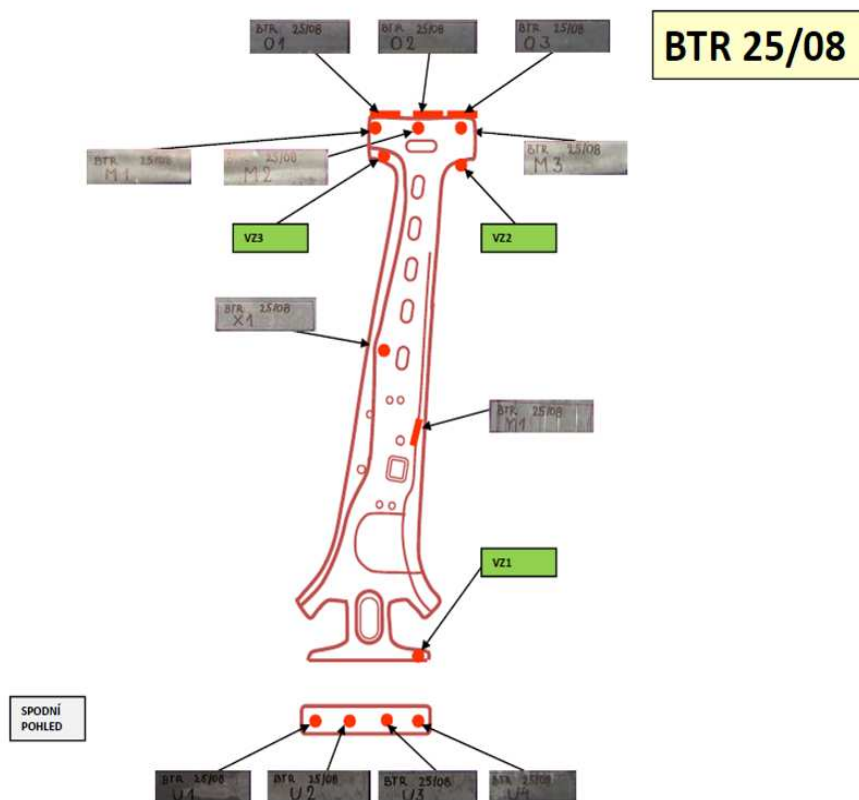
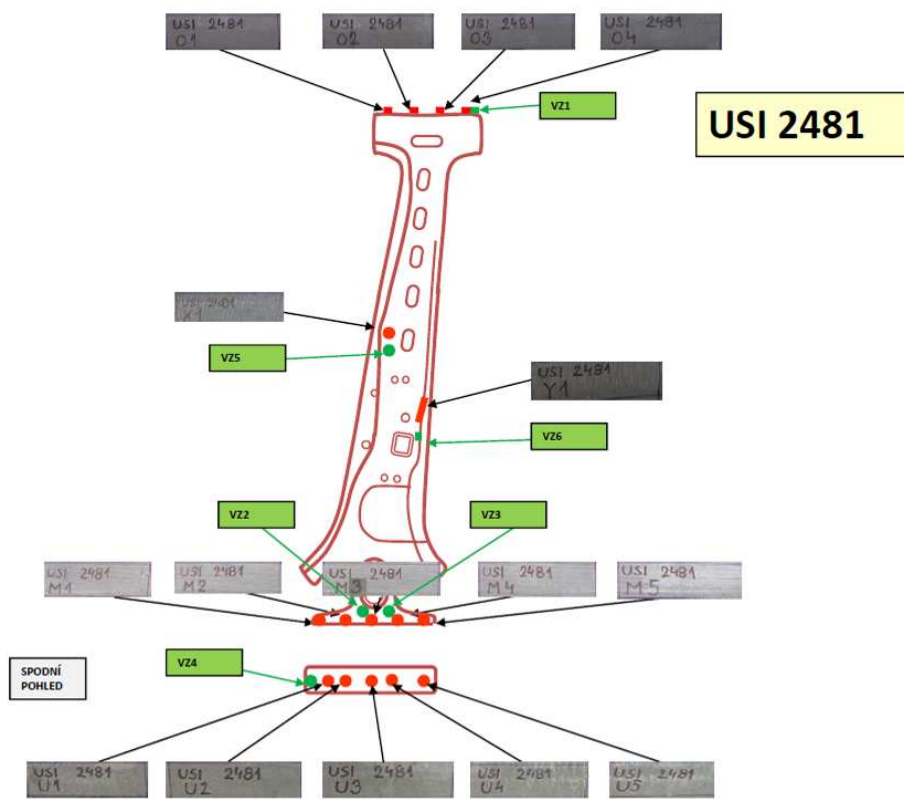
Seznam vlastních publikací

- [1] Kapsa V.: „Návrh experimentu u odporových svarů vysokopevných ocelových plechů bezpečnostních dílů karoserie vozu“. In: *Sborník přednášek z konference TechMat '08*. Svitavy, 20. 11. 2008, s. 33-36. ISBN 978-80-7395-136-8.
- [2] Kapsa V.: „The Use of Design of Experiments in Car Body Building“. In: *3rd International Conference – Reliability, Safety and Diagnostics of Transport Structures and Means 2008*. Lázně Bohdaneč, 25.-26. 9. 2008, s. 131-135. ISBN 978-80-7395-096-5.
- [3] Schmidová E., Kapsa V., Švanda P.: „Development of High-Strength Steel Surfacing Technology“. In: *Scientific Papers 12 2006 serie B*. University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty, Pardubice 2007, s. 27-36. ISBN-978-80-7194-985-5.
- [4] Kapsa V., Schmidová E.: „Stud Welding within A Car Body Building“. In: *Technológia 2007. (Book of Abstracts) Technology And Devices for Welding*. STU Bratislava, 19.-20. 9. 2007, s. 64. ISBN 978-80-227-2712-9.
- [5] Schmidová E., Kapsa V., Petruška J.: „Napěťová analýza heterogenních svarových rozhraní“. In: *Inovatívne technológie vo zváraní a NDT (odborný seminár s mezinárodní účastí). Sborník přednášek Kálnica 2006*, 1. vyd., SZS - Slovenská zvaračská spoločnosť pobočka Trnava - STU Trnava, 2006, s. 52-55. ISBN 80-969383-2-7.
- [6] Kapsa V.: Autor cca 200 odborných laboratorních zpráv na téma jakosti a pevnosti spojů autokaroserií. Zkušebna svařovny, ŠKODA AUTO a.s., Mladá Boleslav, 2004 – 2007.
- [7] Kapsa V., Schmidová E.: „Vliv laserových technologií spojování karoserií automobilů na užité vlastnosti aplikovaných materiálů“. Grantový projekt číslo 5240/IG540007/21 v rámci Programu rozvojových aktivit Univerzity Pardubice, 2004
- [8] Schmidová E., Kapsa V.: „Použitie laseru pri spojovaní autokaroserií“. I. Zvarové spoje, In: *Zvárač vol. 1/2004*, SR, s.17- 21, ISSN 1336-5045.
- [9] Kapsa V., Schmidová E.: „Problematika laserového svařování v automobilovém průmyslu“. In: *Sborník konference TECHMAT 03. Perspektivní technologie a materiály pro technické aplikace*, Česká Třebová - Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, 2. prosince 2003, s. 58-65. ISBN 80-7194-613-3.

Seznam příloh

- Příloha A: Značení vzorků analýzy základního materiálu vysokopevné oceli
- Příloha B: Chemické složení základního materiálu použitých výrobních šarží dílu B-sloupku
- Příloha C: Struktura TOO heterogenního bodového svaru (vz. D6)
- Příloha D: Mikrostruktura spoje podle linie mikrotvrdomosti (vz. D3)
- Příloha E: Regresní analýza průměru svarového bodu

Příloha A: Značení vzorků analýzy základního materiálu vysokopevné oceli

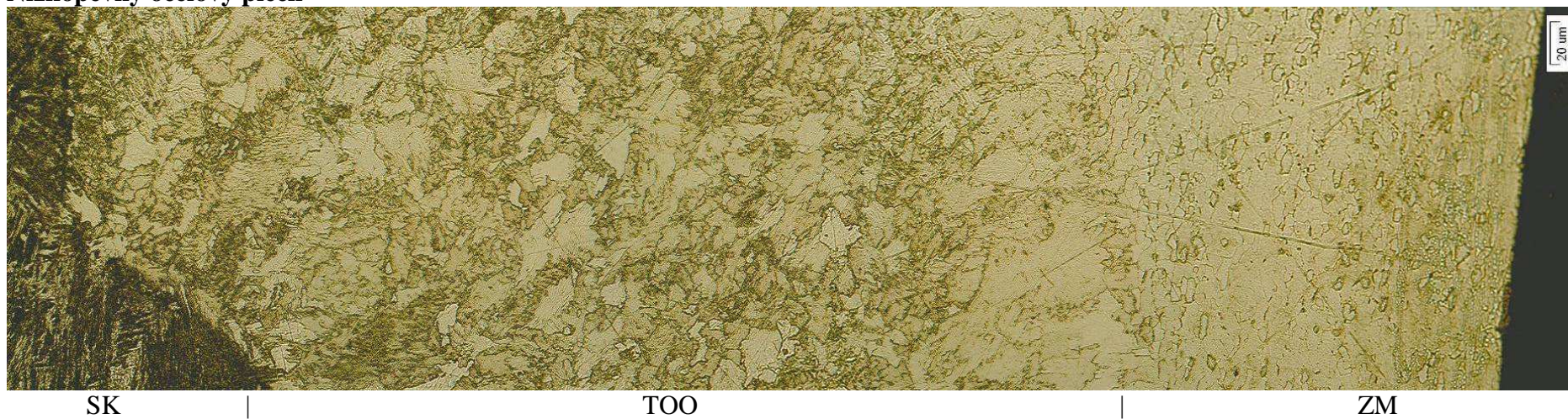


Příloha B: Chemické složení základního materiálu použitých výrobních šarží dílu B-sloupku

Ozn.	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Cu %	Mo %	V %	Al %	Ti %	B %	O ₂ %	N ₂ %
2481 (USI)	0,24	1,22	0,28	0,021	0,001	0,21	0,02	0,03	<0,01	<0,01	0,034	0,03	0,0025	0,0018	0,0037
2482 (USI)	0,24	1,23	0,28	0,017	0,001	0,23	0,02	0,03	<0,01	<0,01	0,031	0,03	0,0025	0,0032	0,0056
1281 (USI)	0,25	1,20	0,28	0,015	0,001	0,22	0,02	0,03	<0,01	<0,01	0,047	0,03	0,0025	0,0013	0,0027
34/08 (BTR)	0,25	1,27	0,26	0,015	0,001	0,14	0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,035	0,02	0,0020	0,0015	0,0031
37/08 (BTR)	0,25	1,26	0,28	0,014	0,001	0,14	0,02	0,03	<0,01	<0,01	0,033	0,03	0,0030	0,0013	0,0041
24/08 (BTR)	0,26	1,27	0,27	0,015	0,001	0,15	0,02	0,01	<0,01	<0,01	0,036	0,02	0,0025	0,0014	0,0032
25/08 (BTR)	0,25	1,25	0,28	0,010	0,001	0,14	0,02	0,01	<0,01	<0,01	0,034	0,02	0,0025	0,0015	0,0036

Příloha C: Struktura TOO heterogenního bodového svaru (vz. D6)

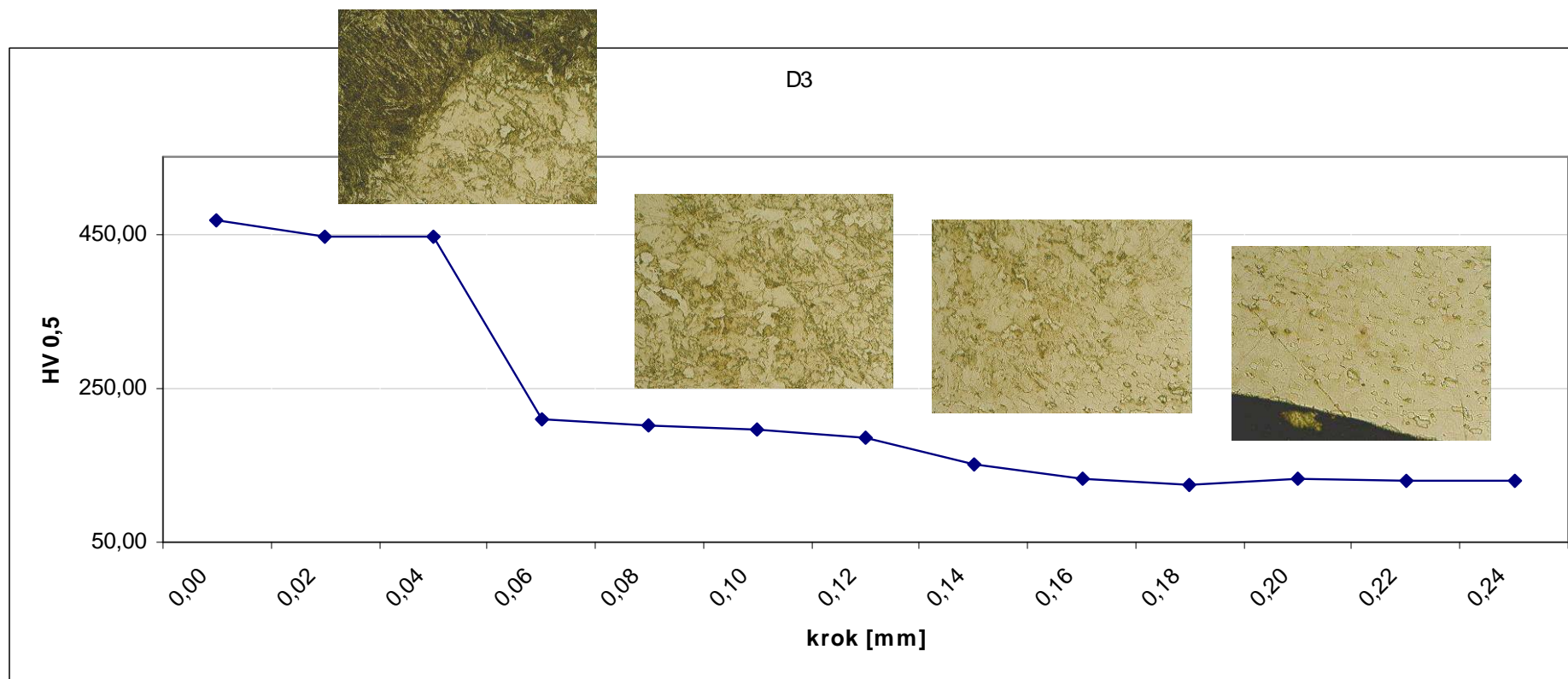
Nízkopevný ocelový plech



Vysokopevný ocelový plech



Příloha D: Mikrostruktura spoje podle linie mikrotvrdosti (vz. D3)



Příloha E: Regresní analýza průměru svarového bodu

$$d_P = 0,55 + 0,255 I_{sv} + 0,239 T_{sv} - 0,344 F_{sv} ,$$

kde d_P je průměr svarového bodu (mm), I_{sv} je svářecí proud (kA), T_{sv} je čas svařování (per) a F_{sv} je přitlačná síla elektrod (kN).

Doplňující výstup regresní analýzy:

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,553	3,319	0,17	0,876
A (kA)	0,2550	0,3895	0,65	0,548
B (per)	0,23917	0,05564	4,30	0,013
C (kN)	-0,3444	0,2164	-1,59	0,187

S = 0,550855 R-Sq = 84,3% R-Sq(adj) = 72,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	6,5045	2,1682	7,15	0,044
Residual Error	4	1,2138	0,3034		
Total	7	7,7183			

Source	DF	Seq SS
A (kA)	1	0,1300
B (per)	1	5,6057
C (kN)	1	0,7688