

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**Vliv svařování na dvoufázovou ocel
pro bezpečnostní prvky autokaroserií**

Petr Ondráček

Bakalářská práce
2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Ondráček**
Osobní číslo: **D11429**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Vliv svařování na dvoufázovou ocel pro bezpečnostní prvky autokaroserií**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

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

- 1.Přehled materiálů pro konstrukci autokaroserií, bližší specifikace dvoufázové feritickobainické oceli.
- 2.Svařitelnost vysokopevných ocelí.
- 3.Makro a mikrostrukturní rozbor bodových odporových svarů, rozbor strukturních změn tepelně ovlivněného pásma.
- 4.Statické zkoušky vlivu tepelně-napětového cyklu svařování tahová zkoušky, měření mikrotvrdosti.
- 5.Souhrnné vyhodnocení vlivu svařování na výchozí strukturní a pevnostní charakteristiku dvoufázové oceli.

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího práce

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran textu a přílohy

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

1.Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I.-II. CERM, s.r.o. Brno 1999, ISBN 80-7204-193-2

2.Kuncipál, J.: Teorie svařování, SNTL, 1986

3.Ahmed, N.: New Developments in Advanced Welding, Woodhead Publ. Ltd., Cambridge, England, 2005, ISBN 1-85573-970-4

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.**
Výukové a výzkumné centrum v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **25. února 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29. května 2015**



doc. Ing. Ivo Drahotský, Ph.D.
děkan

L.S.



doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2015

PROHLÁŠENÍ

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.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Proseči dne 27. 5. 2015

Petr Ondráček

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomáhali s vypracováním této práce. A to především paní prof. Ing. Evě Schmidové, Ph.D., Ing. Petru Hanusovi a doc. Ing. Pavlovi Švandovi, Ph.D. za praktické rady a pomoc.

ANOTACE

Tato bakalářská práce je věnována základním analýzám vlivu svařování na výchozí strukturu materiálu a na statické vlastnosti dvoufázové feriticko-martenzitické oceli.

V teoretické části je uveden sortiment vysokopevných ocelí, používaných pro konstrukci karoserií silničních vozidel. Při použití těchto materiálů dochází ke zvýšení pasivní bezpečnosti a zároveň snížení hmotnosti vozidla. To má pozitivní vliv na spotřebu paliva a ekologii.

V experimentální části byly provedeny rozbory oceli DP 450, a bodových odporových svarových spojů. Svarové spoje byly odebrány z konkrétních částí výlisku karoserie automobilu. Vyhodnocení vlivu svařování vycházelo z metalografických rozborů tepelně ovlivněné oblasti. Vliv svařování na mechanické parametry, byl hodnocen měřením tvrdosti a statickými tahovými zkouškami neovlivněného základního materiálu ve srovnání s pevností svarových spojů.

KLÍČOVÁ SLOVA

bodový odporový svar, dvoufázová ocel, podélník automobilu, tepelně ovlivněná oblast

TITLE

The impact of welding dual-phase steels for safety elements of the car body

ANNOTATION

This bachelor's thesis is devoted to basic analysis of the impact of welding on default structure material and the static characteristic of the dual-phase ferritic-martensitic steels.

In the theoretical part an assortment of high-strength steels, used for construction body road vehicles, is presented. Use of these materials increases the passive safety and also reduces weight of the vehicle. This has a positive effect on the fuel economy and ecology.

In the experimental part an analysis of DP 450 steel and resistance spot welded joints were made. Welded joints were taken from specific places of the pressed pieces of a car body. The evaluation of impact of welding was based on a metallographic analysis from heat affected zone. The Influence of welding on the mechanical parameters was evaluated by measuring the hardness and testing of static tensile of unaffected base material compared with the strength of welded joints.

KEYWORDS

resistance spot weld, dual-phase steel, longitudinal part car, heat affected zone

OBSAH

1	ÚVOD.....	11
2	PŘEHLED MATERIÁLŮ PRO KONSTRUKCI AUTOKAROSERIÍ.....	12
2.1	Nízkopevné oceli	12
2.2	Oceli se zvýšenou pevností.....	13
2.3	Vysokopevné oceli.....	13
2.4	Pokročilé vysokopevné oceli – AHSS (Advanced High-Strength Steel)	13
2.5	Dvoufázové oceli	14
2.6	Ultra vysokopevné oceli – UHSS (Ultra High-Strength Steel)	16
3	SVAŘITELNOST OCELÍ.....	17
3.1	Vliv chemického složení na svařitelnost oceli.....	17
3.2	Části svaru.....	18
3.3	Svařitelnost vysokopevných ocelí	19
4	BODOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	22
4.1	Princip sváření	22
4.2	Tvrký režim.....	23
4.3	Měkký režim	23
5	STRUKTURNÍ ROZBORY ZJIŠŤOVANÉHO MATERIÁLU.....	24
5.1	Celková mikrostruktura bodového svaru	24
5.2	Mikrostruktura základního materiálu.....	26
5.3	Mikrostruktura přechodové oblasti materiálu.....	27
5.4	Mikrostruktura svarového kovu.....	28
6	MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	30
6.1	Příprava vzorků na měření tvrdosti.....	30
6.2	Liniové měření tvrdosti svarových spojů.....	34
6.3	Měření rozptylu tvrdosti materiálu podélníku	37
6.3.1	Postup přípravy vzorků, měření a výsledky tvrdosti	37
7	EXPERIMENTÁLNÍ HODNOCENÍ VLIVU SVAŘOVÁNÍ DVOUFÁZOVÉ OCELI NA STATICKOU PEVNOST.....	38
7.1	Příprava vzorků pro statickou zkoušku pevnosti (zkoušku tahem)	38
7.2	Výsledky měření	40
7.2.1	Porovnání tahových zkoušek	43
8	ZÁVĚR	45

9	POUŽITÁ LITERATURA	46
10	PŘÍLOHY.....	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Graf závislosti meze kluzu a pevnosti na procentuálním množství martenzitu v oceli.....	15
Obrázek 2: Bodové sváření.....	22
Obrázek 3: Celková struktura bodového svaru.....	25
Obrázek 4: Mikrostruktura základního materiálu.....	26
Obrázek 5: Neovlivněná struktura základního materiálu.....	26
Obrázek 6: Mikrostruktura přechodové oblasti.....	27
Obrázek 7: Detail mikrostruktury přechodové oblasti.....	28
Obrázek 8: Mikrostruktura přechodové oblasti.....	28
Obrázek 9: Mikrostruktura svarového kovu.....	29
Obrázek 10: Podélník automobilu.....	30
Obrázek 11: Podélník automobilu.....	31
Obrázek 12: Bodový svar vzorku č. 1.....	31
Obrázek 13: Bodový svar vzorku č. 2.....	32
Obrázek 14: Bodový svar po leptání vzorku č. 1.....	33
Obrázek 15: Bodový svar po leptání vzorku č. 2.....	33
Obrázek 16: Bodový svar po leptání vzorku č. 3.....	34
Obrázek 17: Změna tvrdosti napříč tepelně ovlivněnou oblastí vzorku č. 1 – linie A.....	35
Obrázek 18: Změna tvrdosti napříč tepelně ovlivněnou oblastí vzorku č. 2 – linie C.....	36
Obrázek 19: Změna tvrdosti napříč tepelně ovlivněnou oblastí vzorku č. 3 – linie E.....	36
Obrázek 20: Podélník automobilu.....	38
Obrázek 21: Podélník automobilu spodní strana.....	39
Obrázek 22: Podélník automobilu.....	39
Obrázek 23: Nákresy vzorků.....	40
Obrázek 24: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 6.....	41
Obrázek 25: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 1.....	42
Obrázek 26: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 4.....	42
Obrázek 27: Vzorek č. 10 po provedení tahové zkoušky.....	43
Obrázek 28: Vzorek č. 12 po provedení tahové zkoušky.....	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Chemické složení oceli	24
Tabulka 2: Naměřené hodnoty	37
Tabulka 3: Přehled vypočítaných hodnot maximální meze pevnosti	43

1 ÚVOD

V dnešní době se u osobních automobilů nejčastěji používá samonosná karoserie. Je základní nosnou částí, na kterou jsou připevněny další díly automobilu. Konstrukce karoserie má významný vliv na jízdní vlastnosti, ekologii, náklady na výrobu, ale také především na bezpečnost cestujících v případě dopravní nehody. Proto jsou na použitý materiál kladeny vysoké nároky.

Mezi hlavní požadavky na vlastnosti materiálu patří nízká hmotnost, dlouhá životnost, vysoká pevnost, dobrá deformovatelnost materiálu (to znamená, aby materiál co nejvíce spotřeboval energii z nárazu na vlastní deformaci a snížil tak přetížení působící na posádku při nárazu), odolnost proti korozi, dobrá svařitelnost a tvárnost.

Pro konstrukci autokaroserií se nejčastěji používají ocelové, pozinkované ocelové a hliníkové plechy nebo profily z těchto materiálů. V největší míře se u běžných konstrukcí automobilů používají plechy pozinkované ocelové různých vlastností a průřezů.

Cílem této bakalářské práce je zjištění změny pevnosti podélníku automobilu vlivem bodového svařování. Konkrétně se bude zabývat změnami v teplotně ovlivněné oblasti. Změny mohou být jak „negativního“ charakteru (zhoršit bezpečnost celého dílu), nebo naopak „pozitivního charakteru“.

2 PŘEHLED MATERIÁLŮ PRO KONSTRUKCI AUTOKAROSERIÍ

Ocelové konstrukce automobilů byly vyráběny z nízkopevné oceli, ale vzhledem k nedostačujícím vlastnostem se v současné době zvyšuje podíl vysokopevných ocelí. Hlavním důvodem nahrazování je úspora hmotnosti, zvýšení pevnosti karoserie a bezpečnosti pro posádku vozidla.

2.1 Nízkopevné oceli

Jsou to měkké oceli s nízkým obsahem uhlíku. Mez kluzu mají < 270 MPa a mez pevnosti < 340 MPa. [7]

Nízkopevné oceli (Mild steel)

Jde o oceli s nízkým obsahem uhlíku. Mezi výhody těchto ocelí patří dobrá svařitelnost, opracovatelnost a tažnost materiálu. Díky těmto vlastnostem se dříve používali pro výrobu karoserií automobilu. Nevýhodou je velká hmotnost materiálu, tudíž se v dnešní době téměř nepoužívají.

Nízkopevná ocel bez intersticií – IF ocel (Interstitial Free Steels)

Struktura materiálu je tvořená čistým feritem, který ovlivňuje vlastnosti materiálu. Obsahují velmi malé množství uhlíku a to do 0,012 %. Dále obsahují větší množství legujícího prvku titanu nebo molybdenu. Malé množství uhlíku má za následek větší tažnost (30 až 55 %) materiálu, ale zároveň menší mez kluzu. Další pozitivní vlastnost je odolnost proti stárnutí materiálu. Jejich mez kluzu je v rozmezí 100 až 310 MPa a mez pevnosti se pohybuje 140 až 450. [7]

Vzhledem k vysoké tažnosti materiálu se nejčastěji válcují za studena. V automobilovém průmyslu se používají na části karoserie například nárazníky, dveře, kapoty a střechy.

IS ocel (Isotropic Steels)

Tento druh oceli se používá pouze ve formě plechů a pásů. Materiál má feritickou mikrostrukturu a vysokou odolnost proti stárnutí. Tyto oceli se vyznačují dobrým poměrem tvárnosti a vrubové houževnatosti. Mají mez kluzu mezi hodnotami 180 až 310 MPa, mez pevnosti 270 až 390 MPa a tažnost cca 30 až 40 %. [7]

Tyto oceli se používají mimo jiné pro výrobu střech automobilů.

2.2 Oceli se zvýšenou pevností

Oceli obsahují malé množství uhlíku a vyznačují se především BH efektem, který je vysvětlen níže. Mez kluzu tohoto materiálu je 200 až 300 MPa a mez pevnosti 350 až 450 MPa. [7]

BH ocel (Bake Hardening Steels)

Mají feritickou strukturu, která obsahuje nízké množství uhlíku. U tohoto druhu oceli je důležitý BH efekt. To znamená, že při vypalování laku dochází k nárůstu meze kluzu na požadovanou hodnotu. Během vypalování se teplota zvýší na cca 150 až 180 °C. Mezi prvky které nejvíce ovlivňují velikost BH efektu patří uhlík, mangan a fosfor.

Dále dochází i k deformačnímu zpevnění při tváření. Konkrétně při válcování za studena. Při tomto mechanismu zpevnění dochází ke zvětšení meze kluzu o 30 až 82 MPa. Celkové mez kluzu po lisování se pohybuje mezi hodnotami 180 až 360 MPa a mez pevnosti 290 až 480 MPa. [7]

Výhodou těchto ocelí jsou dobré únavové vlastnosti a vysoká odolnost proti vniknutí cizího tělesa (vrypům). Používají se pro výrobu střeš, dveří, kapoty motoru a zadního víka zavazadlového prostoru.

2.3 Vysokopevné oceli

Vysokopevné oceli – HSS (High-Strength Steel)

Do této kategorie patří vysokopevné a nízkolegované oceli. Struktura oceli je jednofázová s mezí kluzu 210 až 550 MPa a mezí pevnosti 270 až 700 MPa. Příkladem je HSLA ocel. [7]

HSLA ocel (High-Strength Low-Alloy Steels)

Patří do kategorie vysokopevných nízkolegovaných ocelí. Odolávají korozi a dobře se tvarují a svařují. Ke zvýšení pevnosti jsou v oceli obsaženy legující prvky například titan, chrom a vanad.

Tyto oceli se používají jako dynamicky namáhané díly podvozku, výztuhy dveří a nárazníků.

2.4 Pokročilé vysokopevné oceli – AHSS (Advanced High-Strength Steel)

V této skupině se nacházejí dvoufázové a vícefázové oceli. Mají mez kluzu $550 > \text{MPa}$ a mez pevnosti 590 až 980 MPa. [7]

TRIP ocel (Transformation Induced Plasticity Steels)

Jedná se o oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Podstatou tohoto jevu je, že zbytkový austenit (minimálně 5 % objemu) se za normální teploty a působení vysokého napětí nebo deformace přeměňuje na martenzit nebo bainit. Vysokého napětí je dosaženo při zpracování tvářením za studena. Zvýšeným množstvím uhlíku a křemíku lze v oceli ovlivnit množství austenitu.

V konečné mikrostruktuře materiálu se nachází ferit, bainit, martenzit a zbytky austenitu. Předností těchto ocelí je velká tažnost a vysoké deformační zpevnění. Zároveň mají vysokou mez kluzu 400 až 700 MPa a mez pevnosti 700 až 1110 MPa. [7]

2.5 Dvoufázové oceli

Jak již z názvu vyplývá, tyto oceli mají ve struktuře dvě fáze. Jejich mez pevnosti je 400 až 1150 MPa. Patří do skupiny pokročilých vysokopevných ocelí. [1]

Dvoufázové oceli se používají převážně v automobilovém průmyslu a to konkrétně u dílů automobilu, kde je zapotřebí vysoké pevnosti, dobré svařitelnosti i únavové odolnosti, vysokého deformačního zpevnění a korozivní odolnosti. Díky těmto vlastnostem se používají především pro základní části karoserie, jako jsou například výztuhy podlah a střech, boční rámy, přední nárazníky, podélníky a další bezpečnostní prvky karoserie automobilu.

Austeniticko-feritické oceli:

Podíl feritu a austenitu ve struktuře oceli je cca shodný tedy 50 %. Ocel obsahuje tyto legující prvky: chrom, nikl a molybden. Mají dobrou houževnatost a odolnost proti korozi v prostředí obsahující chloridy.

Feriticko-martenzitická ocel:

Tento druh oceli patří mezi nízkouhlíkové a vyrábí se válcováním za studena. Jde o nízkouhlíkový materiál s maximálním množstvím uhlíku 0,13 % na bázi mangan – křemík popřípadě obsahují molybden, chrom nebo vanad. Tento druh ocelí má specifickou mikrostrukturu tvořenou tvrdou fází ve feritické matici. Dominantní složkou ve struktuře je ferit (75 až 90 %) a dále se v oceli nachází tvrdá fáze martenzitu (10 až 25 %). Ostrůvky martenzitu mohou obsahovat zbytky austenitu. Tento austenit se pozitivně podílí na kombinaci pevnosti a plasticity. Čím vyšší je podíl martenzitu v oceli, tím je pevnější a velikost plasticity naopak ovlivňují feritická matrice. [9]

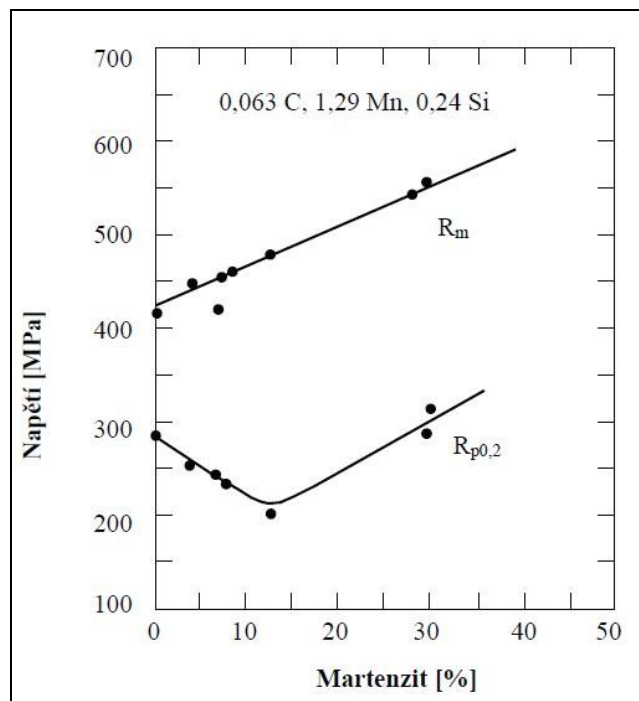
Dvoufázové feriticko-martenzitické oceli se používají především v automobilovém průmyslu, kde vedou ke zvýšení pasivní bezpečnosti. Proto jsou na tuto ocel kladen zvláštní požadavky týkající se jejich vlastností.

Tyto vlastnosti jsou:

- plynulá závislost napětí – deformace bez výrazné meze kluzu,
- nízká mez kluzu a vysoká mez pevnosti,
- vysoká hodnota prodloužení,
- vysoká hodnota koeficientu deformačního zpevnění,
- dobrá odolnost proti stárnutí při pokojové teplotě.

Ke zvýšení pevnosti a tvrdosti se přidávají legující prvky mangan, chlor, molybden, nikl a vanad. Obsah uhlíku je minimální proto se jedná o nízkouhlíkové oceli. Mezi výhody tohoto druhu oceli patří dobrá tvárnost za studena, svařitelnost, únavové vlastnosti a tažnost větší jak 30 %. Mez kluzu se pohybuje kolem 300 až 500 MPa a mez pevnosti 500 až 800 MPa. [9]

Na obrázku 1 je vidět, že s rostoucím množstvím martenzitu roste i mez pevnosti oceli.



Obrázek 1: Graf závislosti meze kluzu a pevnosti na procentuálním množství martenzitu v oceli

Zdroj: [9]

Výrobu feriticko-martenzitických ocelí lze rozdělit do dvou metod, které se od sebe liší obsahem legujících prvků nutných k dosažení martenzitické transformace:

a) metoda interkritického žíhání

Výchozí materiál jsou za tepla nebo za studena válcované pásy dvoufázové oceli. V dnešní době je to nejpoužívanější způsob výroby této oceli. Proces žíhání spočívá v ohřevu materiálu na teplotu žíhání (kdy dochází k rozpadu perlitu) a následném rychlém ochlazení. Velikost teploty je ovlivněna množstvím uhlíku a legujících prvků v oceli.

Žíhání může být kontinuální (v kontinuálních žihacích pecích) nebo stacionární (v pokloповých pecích)

b) metoda „as roled“

U této metody se jedná o přímou výrobu pásů s feriticko-martenzitickou strukturou v procesu válcování za tepla. Výhodou oproti předchozímu způsobu je úspora energie, která je potřeba u interkritického žíhání a úspora související s výstavbou moderní žihací linky.

Při tomto druhu zpracování je vhodné snížit obsah uhlíku na nejnižší mez, v tomto případě 0,04 až 0,08 %. Dále je nutné omezit množství křemíku na maximálně 1,5 %.

Martenziticko-austenitická ocel:

Struktura oceli se skládá z cca 75 % z martenzitu a z cca 25 % austenitu. Tento druh oceli je charakteristický vysokou pevností, dobrou svařitelností, dobrou tažností a odolností proti křehkému lomu.

2.6 Ultra vysokopevné oceli – UHSS (Ultra High-Strength Steel)

Struktura oceli je složená z martenzitu a zbytkového austenitu. Mají mez kluzu $550 > \text{MPa}$ mez pevnosti $980 > \text{MPa}$. Největší výhodou těchto ocelí je velmi vysoká pevnost. Z tohoto důvodu lze použít menší množství materiálu, a tudíž dochází k úspoře hmotnosti. Současně jsou ultra vysokopevné oceli křehké. Což má za následek, že po deformaci dílu z této oceli již ho nelze vrátit do původního tvaru. Například při havárii automobilu musí dojít k výměně dílu, protože ho již nelze opravit. [7]

Pro tyto vlastnosti se používají v automobilech na výztuže, prahy, rám, středový střešní oblouk a sloupky automobilu.

3 SVAŘITELNOST OCELÍ

Obecná definice svařitelnosti zní:

Svařitelnost je schopnost materiálu vytvořit kvalitní svarový spoj.

Hodnocení svařitelnosti se dělí dle následujících kritérií:

- technologického – záleží na technologii svařování (například svařování plamenem, svařování elektrickým obloukem),
- metalurgického – složení struktury svařovaného materiálu,
- konstrukčního – záleží na tvaru svarového spoje.

Struktura svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti bude vždy odlišná od struktury základního materiálu. Proto musíme vyhodnocovat svarový spoj jako strukturní vrub, který vznikne v přechodu mezi základním materiálem a přechodovým pásmem svarového spoje. Údaje o svařitelnosti bývají nejčastěji uváděny v materiálových listech jednotlivých ocelí.

Svařitelnost ocelí je ovlivněna především chemickým složením materiálu a tloušťkou svařovaných materiálů. Tloušťka svařovaných částí ovlivňuje průřez svaru a technologii svařování. Pro provedení kvalitního svaru je důležité, aby svařovaný materiál v místě svaru a jeho okolí byl dokonale čistý. To znamená, že je tato místa nutné zbavit všech mechanických nečistot (například prachové částic), mastnoty a kysličníků.

3.1 Vliv chemického složení na svařitelnost oceli

Na svařitelnost ocelí má největší vliv uhlík. Ten však není jediným prvkem, který ovlivňuje svařitelnost. Svařitelnost zhoršují i další prvky jako například hliník, chrom, mangan, síra.

Uhlík

Svařitelnost ocelí se zhoršuje se zvyšováním prokalitelnosti ocelí. Proto, aby byla ocel kalitelná, potřebuje obsahovat alespoň 0,25 % uhlíku. To znamená, že pokud chceme, aby ocel byla dobře svařitelná, musí obsahovat maximálně 0,25 % uhlíku. Dále se při této hodnotě nepředpokládá ještě vznik studených trhlin ve svarovém kovu.

Při svařování ocelí, které mají větší množství než 0,25 % uhlíku je nutný předehřev.

Mangan

Zvyšuje mez kluzu a pevnosti, při zachování dobré plasticity. Nelegované oceli mají 0,3 až 1,7 % tohoto prvku [8]. Mangan také snižuje obsah síry v oceli a svarovém kovu.

Síra

Vysoký obsah síry v oceli způsobuje lamelární trhliny. U nelegovaných ocelí je maximální obsah síry 0,04 %. Do některých konstrukčních ocelí je zvýšené množství síry úmyslné s cílem zlepšení obrobitelnosti oceli.

Chrom

Tento prvek výrazně zpevňuje svarový kov i ocel. Se vzrůstajícím množstvím chromu stoupá korozní odolnost oceli.

3.2 Části svaru

Svarový kov

Svarový kov nazýváme materiál, který vznikne při svařování natavením základního a přídatného materiálu nebo pouze základního materiálu (například odporové sváření). Promísení nám určuje množství nataveného základního materiálu ve svarovém kovu. Pro ruční obloukové svařování je hodnota promísení 10 až 40 % a pro elektrostruskové sváření až 90 %. Geometrický tvar svarového kovu (šířka a hloubka) je přímo úměrný tepelnému příkonu. Hloubku svarové lázně lze ovlivnit velikostí intenzity svařovacího proudu. Naopak šířku této lázně ovlivníme velikostí svařovacího napětí. Mikrostruktura svarového kovu je dále ovlivněna kromě svařovacích parametrů také chemickým složením. Únavové vlastnosti a houževnatost svarového kovu většinou nedosahují velikostí základního materiálu.

Tepelně ovlivněná oblast

Tato oblast se nachází mezi svarovým kovem a základním materiálem a dochází v ní ke strukturálním změnám. Tyto změny jsou způsobeny působením tepla během svařování. U ocelí mají tyto strukturální změny velký vliv na vlastnosti svarového spoje. Velikost tepelně ovlivněné oblasti je dána použitou technologií svařování a svařovacími parametry.

Tepelně ovlivněnou oblast lze rozdělit do následujících pásem:

- částečného natavení – pásmo tvoří přechod mezi svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí, u většiny dostupných ocelí se tomuto pásmu říká hranice ztavení,
- přehřátí – je to oblast, která překračuje teplotou intenzivní růst primárních zrn, u nelegovaných ocelí je tato teplota cca 1050 °C, u mikrolegovaných ocelí se teplota pohybuje v rozmezí 1250 až 1300 °C a u nízkolegovaných ocelí je teplota cca 1200 °C,
- normalizace – toto pásmo je určeno teplotou přehřátí s úplnou přeměnou feritu,
- částečné překrytí – pásmo s neúplnou strukturální přeměnou. [8]

Snížení pevnosti v tepelně ovlivněné oblasti je nejvíce patrné u legovaných ocelí. Toto snížení pevnosti lze ovlivnit použitým tepelným příkonem svařování. Velikost maximální tvrdosti záleží kromě tepelného příkonu, také na chemickém složení a předehřevu oceli před svařováním. Při svařování dochází v pásmu přehřátí k růstu zrn. Toto zhrubnuté zrno má v tepelně ovlivněné oblasti tyto následky:

- zhoršenou plasticitu,
- zvětšuje možnost vzniku prasklin,
- ve slitinách kovu jako například hliník a měď snižuje pevnost této oblasti.

3.3 Svařitelnost vysokopevných ocelí

Důležitým parametrem pro určení svařitelnosti je množství uhlíku. Větší množství uhlíku v oceli má pozitivní vliv na tvrdost, mez kluzu a pevnosti. Plastické vlastnosti se však snižují. Proto se u svařitelných ocelí omezuje množství uhlíku na hodnotu $< 0,25$ %. Mezi další prvky zhoršující svařitelnost patří například síra a fosfor. Ve vysokopevných ocelích se dále vyskytují legující prvky, které zvyšují její pevnost, korozivní odolnost a odolnost proti mechanickému opotřebení. Mezi tyto prvky patří například křemík, mangan, chrom, molybden, vodík a síra. Všechny tyto prvky však zhoršují svařitelnost a tudíž zlepšují kalitelnost ocelí.

Specifika svařitelnosti HSLA ocelí jsou dány mechanismem zvýšení pevnosti výchozího stavu materiálu. Nejvíce se uplatňují procesy spojené se zjemněním zrna a termomechanickým zpracováním.

Svařitelnost jemnozrnných ocelí

Jemnozrnná ocel se nejčastěji vyrábí válcováním a následným tepelným zpracováním. U tohoto druhu oceli jsou mechanické vlastnosti dány především množstvím uhlíku a manganu. Ke zvýšení pevnosti a zároveň zachování plasticity se materiál doleguje molybdenem, hliníkem, vanadem a titanem. Výše uvedené prvky umožňují vznik jemnozrnné struktury materiálu a vazbou s uhlíkem zvyšují pevnost.

Svařováním těchto ocelí dochází v tepelně ovlivněné oblasti k poklesu pevnosti. Pokles pevnosti, zejména meze kluzu je způsoben růstem zrn v teplotně ovlivněné oblasti. Z tohoto důvodu je vhodné, aby tepelně ovlivněná oblast byla co nejmenší. Toho dosáhneme použitím malého svářecího příkonu (v případě odporového bodového sváření by se zvolilo použití měkkého režimu sváření). Svařování provádíme bez předehřevu materiálu nebo v případě, že předehřev je nutný předehříváme na 100 až 150 °C. [8]

Jemnozrnné oceli se z hlediska chemického složení kontrolují především na množství síry. Maximální povolené množství je 0,02 %. Množství síry je omezováno z hlediska vzniku teplých trhlin.

Přídavné materiály volíme s ohledem na požadované vlastnosti svaru a dle použité metody svařování. Na namáhané svary se používá přídavný materiál s legujícím prvkem například molybden, mangan nebo nikl. Omezujícím členem svaru z hlediska vrubové houževnatosti je nejčastěji svarový kov a nikoli základní materiál. Ke snížení vnitřního napětí po sváření se používá žihání. Teplota žihání je menší než u nelegovaných ocelí a to v rozmezí 560 až 600 °C. [8]

Svařitelnost termomechanicky zpracovaných ocelí

Termomechanickým způsobem zpracování se vyrábějí například ocelové plechy, pásy, tyče, profily a další polotovary. Tohoto principu zpracování oceli lze dosáhnout řízenou kombinací tváření s fázovými a strukturními přeměnami. Největší nárůst zpevnění a plastických vlastností lze pozorovat u nízkolegovaných až střednělegovaných ocelí.

Při svařování dojde vlivem teplotního cyklu v tepelně ovlivněné oblasti k degradaci mechanických parametrů dosažených termomechanickým zpracováním. Tato změna má za následek snížení tvrdosti, meze kluzu a pevnosti v pásmu částečné překrystalizace. Dále dochází ke snížení vrubové houževnatosti v pásmu přehřátí. Výsledná struktura teplotně ovlivněné části má menší pevnost než má základní materiál, který byl termomechanicky zpracován. Pro snížení uvedených následků omezujeme svářecí příkon a tím dosáhneme menší tepelně ovlivněné oblasti.

Přídavný materiál opět volíme s ohledem na požadované vlastnosti svaru a použitou metodu svařování. Obecně však platí, že přídavný materiál má nejčastěji jiné chemické složení než základní materiál. Po sváření není nutné dále svar tepelně zpracovávat.

Svařitelnost nízkolegovaných ocelí

Tyto oceli mají za normálních i zvýšených teplot větší mez kluzu i pevnosti oproti nízkouhlíkovým ocelím. Nízkolegované oceli, které jsou dolegované niklem se používají mimo jiné na svařované konstrukce trvale pracující při nízkých teplotách.

Mezi hlavní legující prvky patří kromě manganu a křemíku také chrom, molybden a vanad. Dále mohou být nízkolegované oceli dolegovány chemickými prvky jako jsou například titan a niob. Obsah všech legujících prvků bývá do 5 %.

Před svařováním je nutné nízkouhlíkovou ocel tepelně zpracovat. Svařované polotovary jsou buď kalené a popouštěné nebo normalizované a popouštěné. Popouštění se provádí z důvodu ideálního plastického a pevnostního poměru. Svařované materiály vždy před svařováním předežíváme.

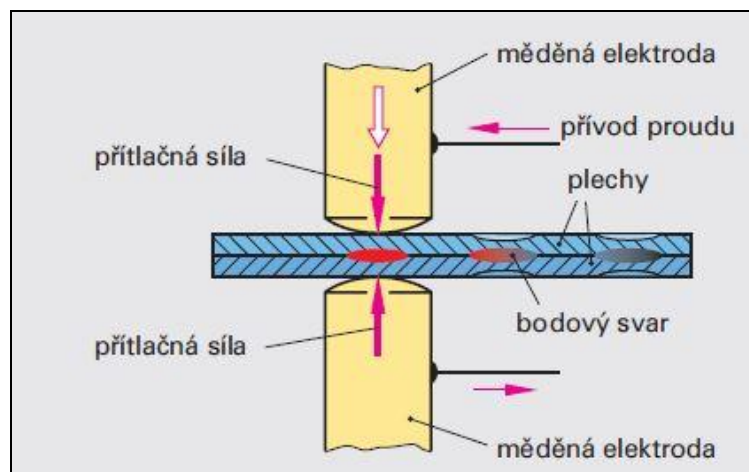
Přídavný materiál volíme tak, aby měl stejný obsah legujících prvků jako nízkolegovaná ocel. Po sváření se svar tepelně zpracovává popouštěním. Toto popouštění se provádí z důvodu odstranění zbytkového napětí a zlepšení struktury svarového kovu. Změnou struktury tepelně ovlivněné oblasti po popouštění se dosahuje optimálního poměru pevnosti a plasticity svarového spoje.

4 BODOVÉ SVAŘOVÁNÍ

Bodové svařování patří do skupiny tlakového odporového sváření. Jedná se o nerozebíratelné spojování kovových materiálů v jeden díl. Většinou spojujeme svařováním stejné druhy materiálů. Při tomto svařování dochází ke spojení materiálů působením tlaku a elektrického odporu. Svar má kruhový průřez ve formě bodu.

4.1 Princip sváření

Svařované materiály (nejčastěji dva ocelové plechy) leží těsně na sobě. Po sevření svařovaného materiálu do svařovacích kleští dochází mezi dvěma měděnými elektrodami k průchodu elektrického proudu. V místě spoje dochází vlivem elektrického odporu ke vzniku tepla a tím natavení materiálu svařovaných součástí. Zároveň dochází k působení tlaku vlivem svařovacích kleští, které svařované materiály tlačí k sobě. Ke spojení dochází v jednotlivých bodech bez přidání přídavného materiálu. Tento princip sváření je zobrazen na obrázku 2.



Obrázek 2: Bodové sváření

Zdroj: [11]

Na svařovací proces mají vliv tyto veličiny:

- svařovací proud,
- čas svařování,
- přítlačná síla elektrod,
- dobrá elektrické vodivost materiálu,
- malá tepelná vodivost materiálu.

Svářet lze dvěma režimy a to tvrdým a měkkým. Při obou režimech dosáhneme stejného svařovacího tepla.

4.2 Tvrdý režim

Tento režim charakterizuje vysoký svařovací proud a čas, po který dochází k svařování je krátký. V praxi se nejvíce používá.

Výhody:

- úspora času (vyšší výkonnost),
- rychlé ochlazení svaru (krátké působení svářecí teploty), které vede k jemnému zrnku ve svařené struktuře materiálu,
- po ochlazení vzniká zanedbatelné napětí a deformace,
- malé opotřebení elektrod a spotřeba elektrické energie.

Nevýhody:

- vysoké požadavky na svářecí stroj (průchod velkého proudu), pevnější konstrukce (velké přitlačné síly),
- větší průřezy přívodních vodičů.

4.3 Měkký režim

Je charakteristický nízkým svařovacím proudem a delším časem svařování.

Výhody:

- na sváření lze použít méně výkonné stroje,
- menší citlivost na odchylky odporové svařitelnosti materiálu.

Nevýhody:

- pomalejší svařování (delší výrobní doba),
- vznik větší deformace a napětí ve svarovém spoji,
- větší opotřebení svařovacích elektrod,
- vznik hrubozrnné struktury.

5 STRUKTURNÍ ROZBORY ZJIŠŤOVANÉHO MATERIÁLU

Vyhodnocovaný materiál je dvoufázová feriticko-martenzitická ocel DP 450. Podle normy EN 10152 má tato ocel mez kluzu 280 až 340 MPa a mez pevnosti 450 až 530 MPa. Podle této normy má dvoufázová ocel HCT 450X z hlediska chemického složení maximální množství uhlíku 0,08 %, manganu 1,6 % a křemíku 0,4 %. [10]

V následující tabulce 1 je zaznamenáno přesné chemické složení zkoumané oceli v hmotnostních % [hm%].

Tabulka 1: Chemické složení oceli

Vzorek	uhlík	mangan	křemík	fosfor	síra	chrom	nikl	měď	hliník	Titan
HCT 450X	0,16	1,98	0,21	0,02	0,02	0,21	0,01	0,01	0,01	0,02

Zdroj: [12]

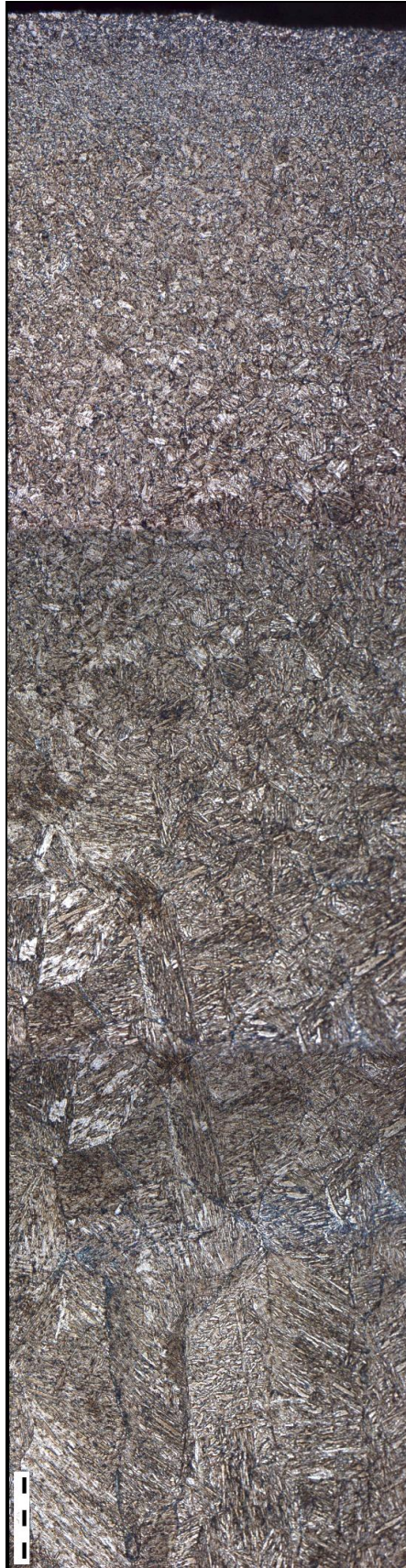
Metalografické rozborů vlivu použité technologie svařování byly zaměřeny na popis vyvolaných strukturních změn:

- ve svarové čočce, což znamená v nataveném materiálu, kde se můžou vyskytovat typické vady svarového spoje (například mikrotrhliny, řediny),
- v tepelně ovlivněné oblasti, která se nachází mezi základním materiálem a svarovou čočkou, hranice oblasti je v dosahu naměřených změn tvrdosti.

Dále je uvedena fotodokumentace neovlivněného základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu v kombinaci světelné a elektronové mikroskopie.

5.1 Celková mikrostruktura bodového svaru

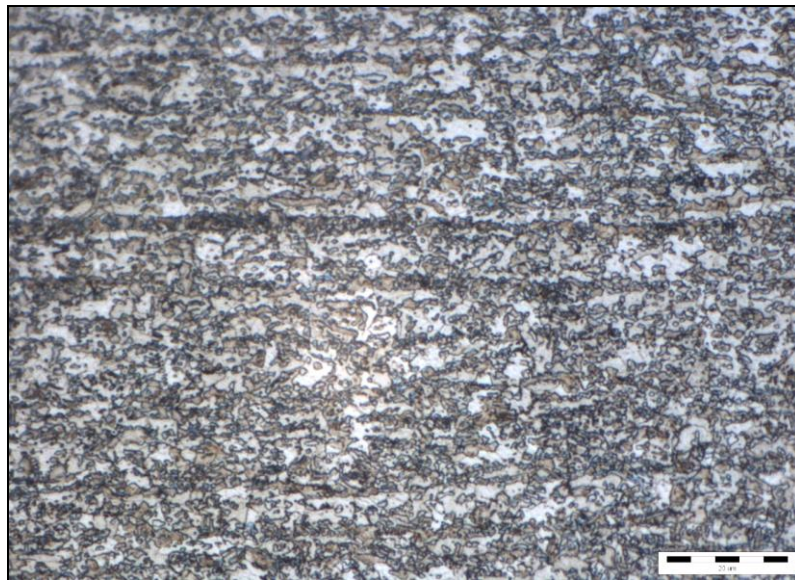
Na obrázku 3 je zdokumentována celková mikrostruktura bodového svaru dvoufázové oceli. V horní části obrázku se nachází základní materiál, uprostřed teplotně ovlivněná oblast a na spodní části struktura svarového kovu.



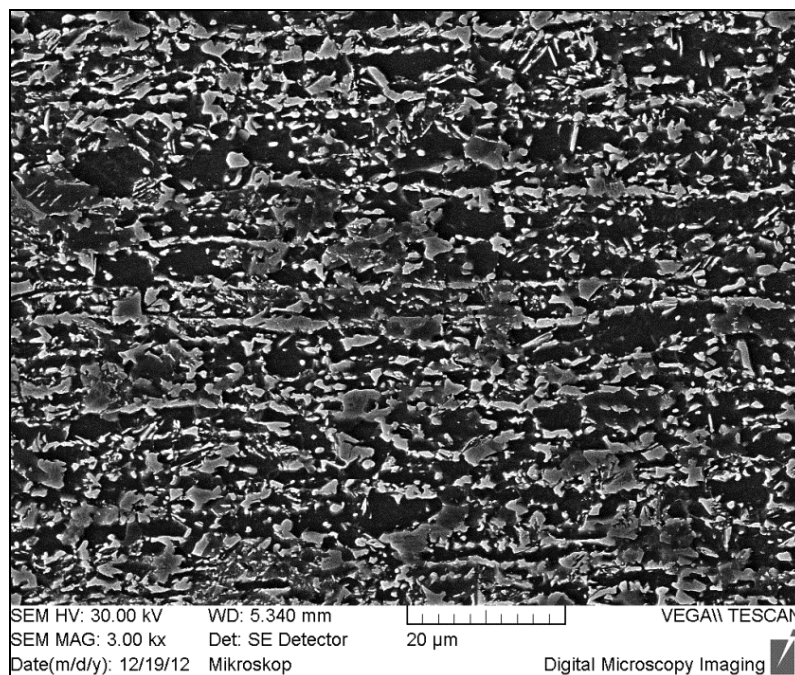
Obrázek 3: Celková struktura bodového svaru

5.2 Mikrostruktura základního materiálu

Struktura dvoufázové oceli je prezentována na obrázcích 4 a 5. Ve struktuře základního materiálu byl pozorován výskyt martenzitu a feritu s nerovnoměrným tvarem a rozměry zrna. Podíl martenzitu určuje u daného typu oceli konkrétní pevnostní kategorii, přesné stanovení tohoto podílu u použité oceli nebylo předmětem práce. Typické pro hodnocené oblasti bylo částečné zachování řádkovitosti struktury, jako efekt válcování a s tím související heterogenita obsahu uhlíku.



Obrázek 4: Mikrostruktura základního materiálu



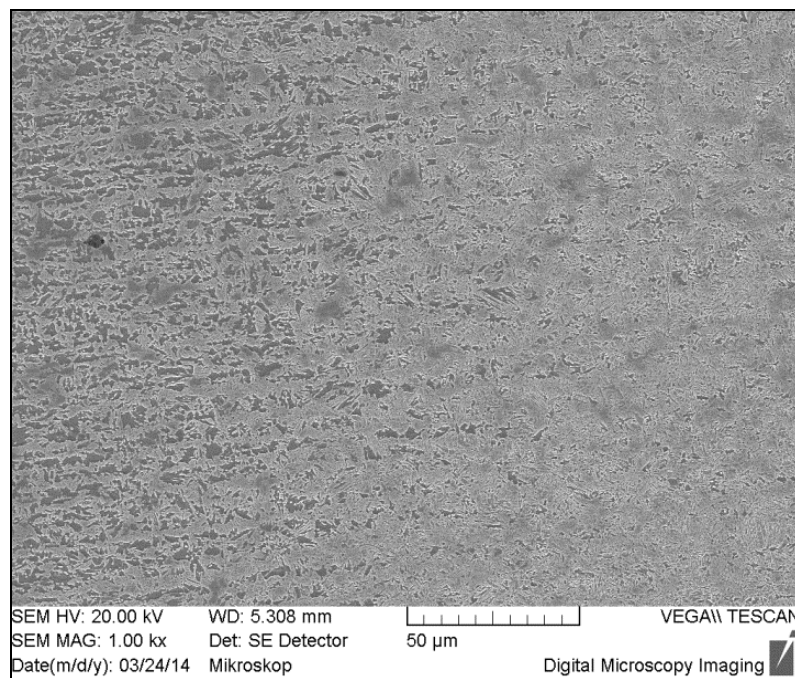
Obrázek 5: Neovlivněná struktura základního materiálu

5.3 Mikrostruktura přechodové oblasti materiálu

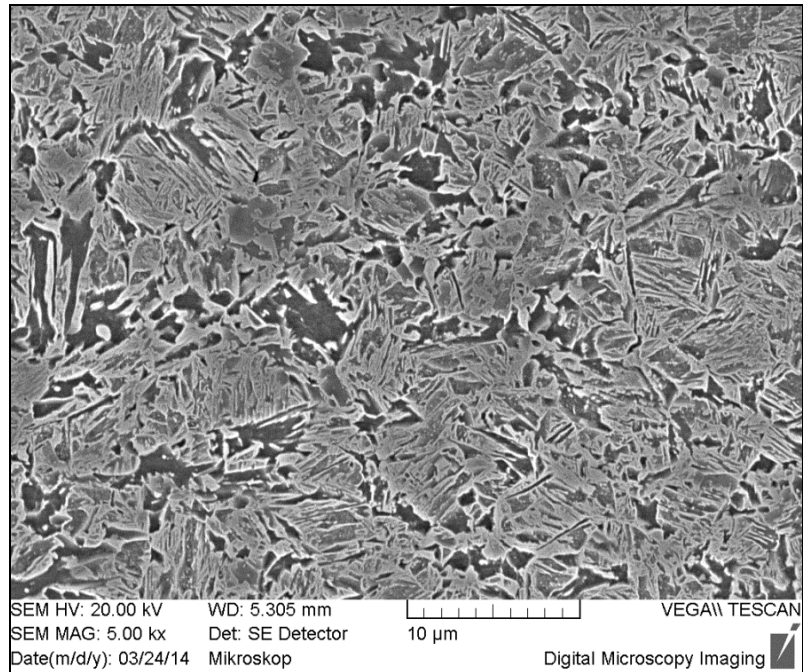
Přechodová oblast do temperovaného pásma je dokumentována na obrázku 6. Mikrostruktura oblasti s maximálním strukturálním vlivem (obrázek 7 a 8) vykazovala celkově snížený podíl strukturně volného feritu. Kromě toho byly pozorovány z hlediska vlivu na tvrdost další protichůdné strukturální efekty:

- popuštěný martenzit na obrázku 7, byl pozorovatelný výskyt karbidů v celkově rozsáhlejších frakcích a rozpadové struktury,
- změna tvaru feritických útvarů na obrázku 7 s vyšší jehlovitostí feritu,
- výskyt karbidů v původně homogenních feritických útvarech.

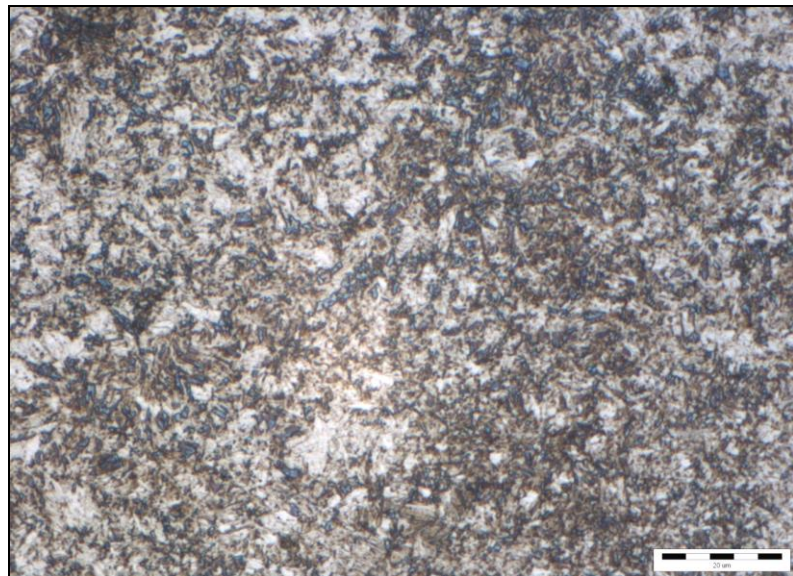
Výsledky hodnocení tvrdosti v takto ovlivněném pásmu svědčí o tom, že v daném případě celkově převládly zpevňující vlivy, tj. zejména pokles objemu feritu, změna tvaru zrn a jemná precipitace karbidů v původně feritických oblastech.



Obrázek 6: Mikrostruktura přechodové oblasti



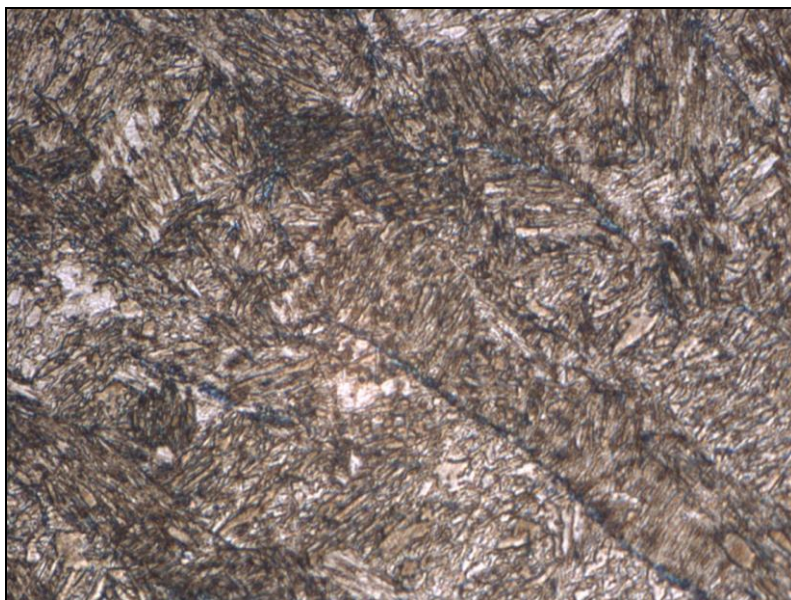
Obrázek 7: Detail mikrostruktury přechodové oblasti



Obrázek 8: Mikrostruktura přechodové oblasti

5.4 Mikrostruktura svarového kovu

Ve svarovém kovu hodnoceného bodového svaru nebyly zjištěny žádné mikroskopické vady. Mikrostruktura byla směsná feriticko-karbidická, s podílem martenzitu. Typický sloupkovitý tvar zrn je dokumentován na obrázku 9. Tvar a rozměr zrn závisel na pozici ve svarové čočce. Lokálně byl pozorován výskyt karbidů po hranicích zrn. Tento výskyt může vést k poklesu pevnosti, resp. k přednostnímu rozvoji defektů po hranicích zrna.



Obrázek 9: Mikrostruktura svarového kovu

6 MĚŘENÍ TVRDOSTI

Měření tvrdosti bylo provedeno pro vyhodnocení:

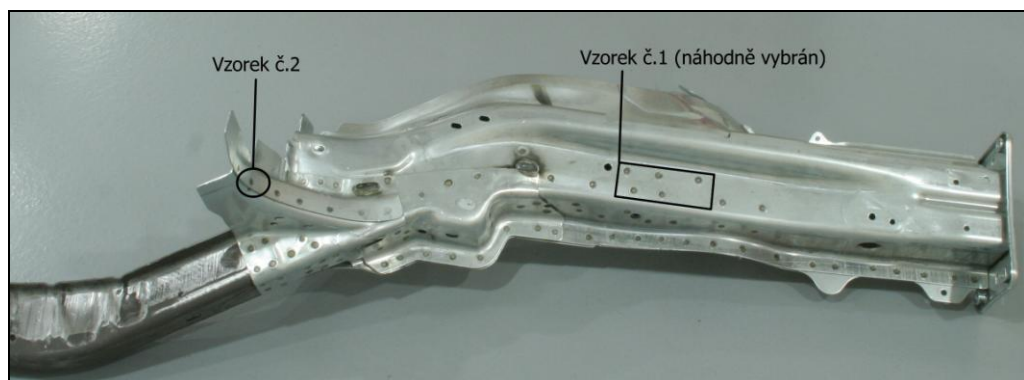
- vlivu svarového cyklu na výchozí stav dvoufázové oceli. Toto měření bylo provedeno v příčných řezech svarovým spojem, v liniích kolmo ke hranici ztavení.
- rozptylu výchozí statické pevnosti materiálu v různých částech výlisků. Toto měření bylo doplněno na základě zjištěného rozptylu statické pevnosti, zjištěného tahovou zkouškou. Protože cílem práce bylo vyhodnotit vliv svařování na výchozí pevnost testované dvoufázové oceli, bylo nutno zjistit vliv výchozího rozptylu pevnosti, vyvolaného samotným procesem výroby výlisku.

6.1 Příprava vzorků na měření tvrdosti

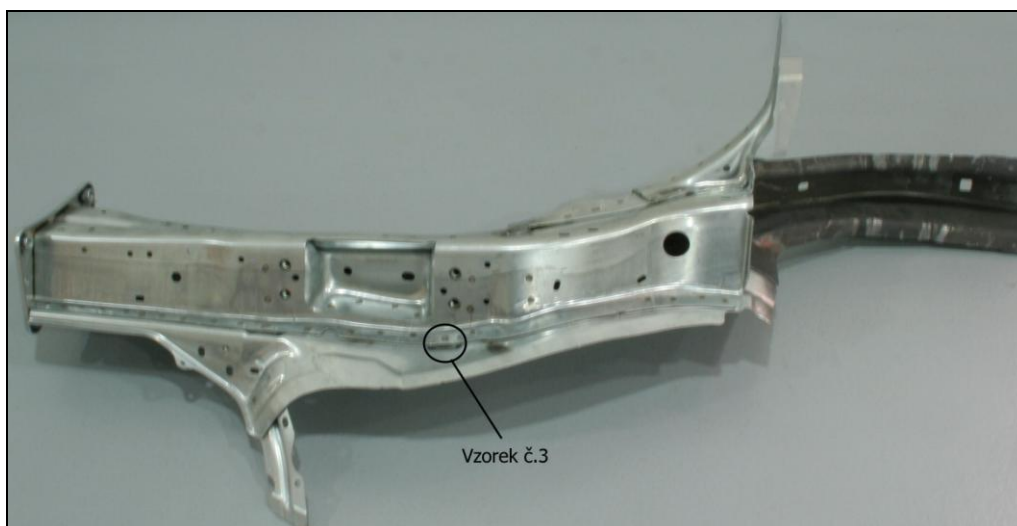
Na podélníku automobilu byly vybrány tři vzorky bodového svaru. Vzorek č. 1 byl náhodně vybrán z horní části podélníku (obrázek 10). Bodový svar vzorku byl proveden přes dva plechy.

Vzorek č. 2 byl vybrán z okraje výlisku, který měl menší kvalitu provedení bodového svaru (obrázek 10). Opět se jednalo o bodový svar dvou plechů, avšak jeden z plechů měl menší tloušťku materiálu.

Poslední odebraný vzorek č. 3 byl vybrán na okraji výlisku. Tento vzorek byl svařen bodovým svarem přes tři plechy (obrázek 11).



Obrázek 10: Podélník automobilu



Obrázek 11: Podélník automobilu

Vzorky byly odebrány z různých míst podélníku, z důvodu porovnání výsledků měření. Vyřiznuté bodové svary byly dokumentovány makroskopicky na stereomikroskopu a tvar svarové čočky je dokumentován na obr. 12 a 13. Obrázky bodových svarů jsou v měřítku 1:5.

Na obrázku 13 si můžeme všimnout bodového svaru, který nemá kruhový tvar. Jeho tvar je spíše oválný. Mezi možné příčiny, může patřit to, že svařované plechy neležely přímo na sobě a při přitlačení elektrod svářečky došlo k jejich posunu. Další možnou příčinou mohou být opotřebované hroty elektrod svářečky.



Obrázek 12: Bodový svar vzorku č. 1



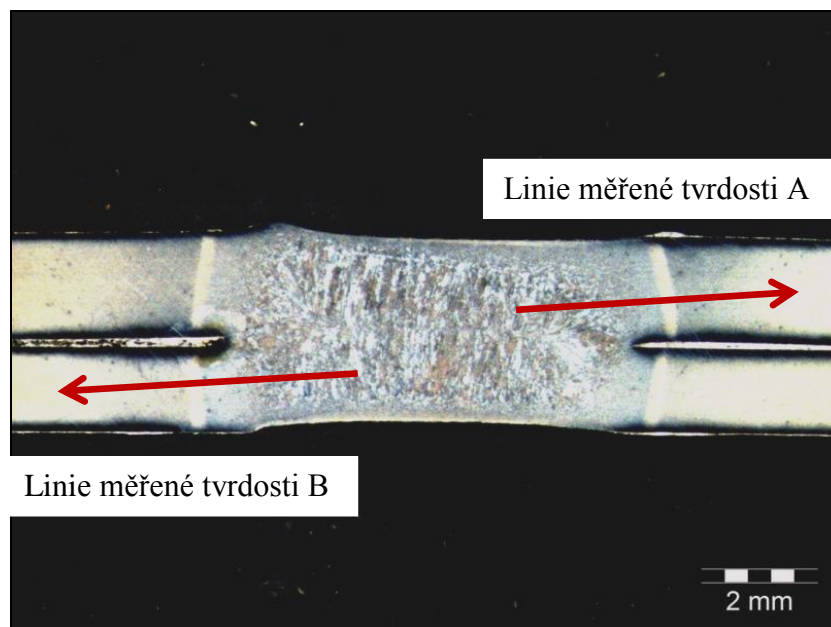
Obrázek 13: Bodový svar vzorku č. 2

Po zdokumentování svarů, bylo nutné pro další postup je zatavit do bakelitu a číselně je označit, aby byla možná jejich identifikace. Výsledné vzorky zalité v bakelitu měly tvar válečků o průměru cca 30 mm.

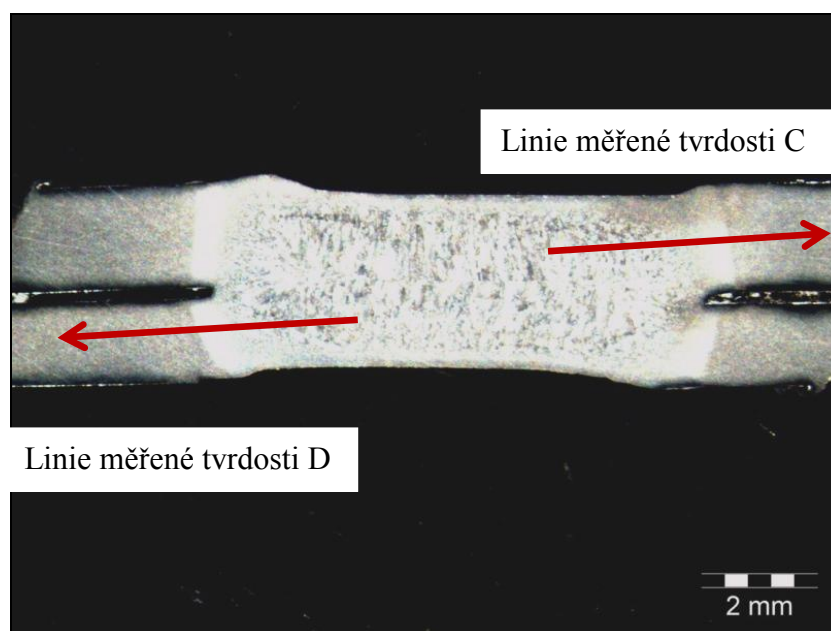
První fáze broušení byla provedena na pásové brusce, na které byl nasazen brusný papír o drsnosti 40. Toto broušení se provádělo na hrubo a bylo provedeno bez přítomnosti chladicí kapaliny. Poté následovalo další broušení, které se provádělo na kotoučové brusce a to s drsností brusných papírů 120, 400, 600 a 1000. Při tomto broušení byla použita chladicí kapalina (voda). Poslední broušení se provádělo brusným papírem o drsnosti 1600 bez přítomnosti brusné kapaliny.

K odstranění zbývajících vrypů bylo nutné použít leštící kotouče a pasty. Leštění bylo provedeno nejprve leštící pastou s označením D3 (3 mikrometry velikost zrna), kdy došlo k odstranění viditelných vrypů. Poté následovalo druhé leštění leštící pastou D0,7. Byly tak odstraněny všechny viditelné i mikroskopické vrypy. Obě leštění byla prováděna s chlazením pomocí technického lihu.

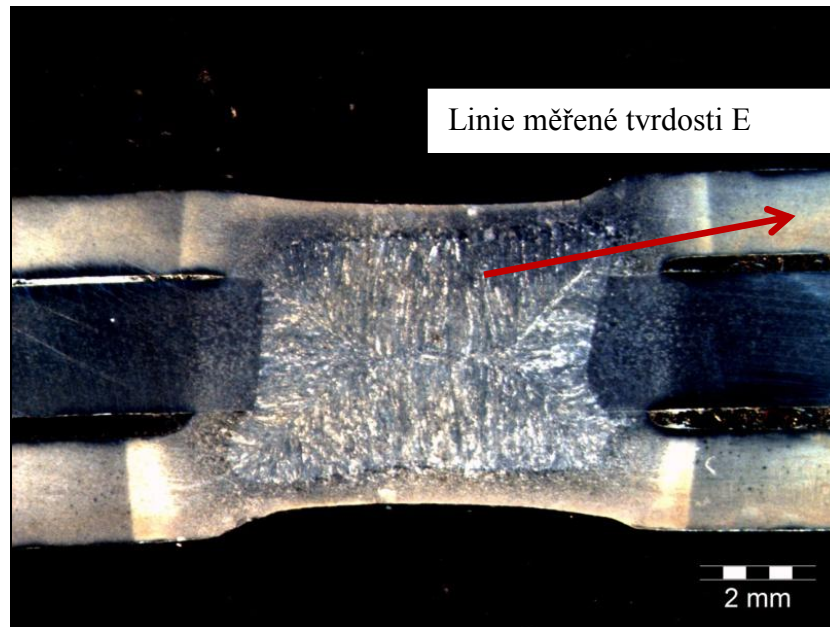
Vyleštěné bodové svary byly vloženy do roztoku kyseliny dusičné (HNO_3), která naleptala kovový zkušební vzorek. Po cca 3 až 4 sekundách bylo nutné vzorek opláchnout technickým lihem a vysušit do sucha. Tímto byla zviditelněna struktura svaru a teplotně ovlivněné oblasti. Struktury vzorků a zakreslené linie měření tvrdosti jsou na obrázcích 14, 15 a 16.



Obrázek 14: Bodový svar po leptání vzorku č. 1



Obrázek 15: Bodový svar po leptání vzorku č. 2



Obrázek 16: Bodový svar po leptání vzorku č. 3

6.2 Liniové měření tvrdosti svarových spojů

Měření bylo provedeno na tvrdoměru Zwick ZHV 10. Tento přístroj měří tvrdost podle metody Vickerse, které se řídí normou ČSN EN ISO 6507-1. Při měření bylo použito závaží o hmotnosti 1 kilogram a zatěžující síla působila po dobu 10 až 15 sekund. Vzdálenost jednotlivých měření od sebe (krok měření) byla 300 μm .

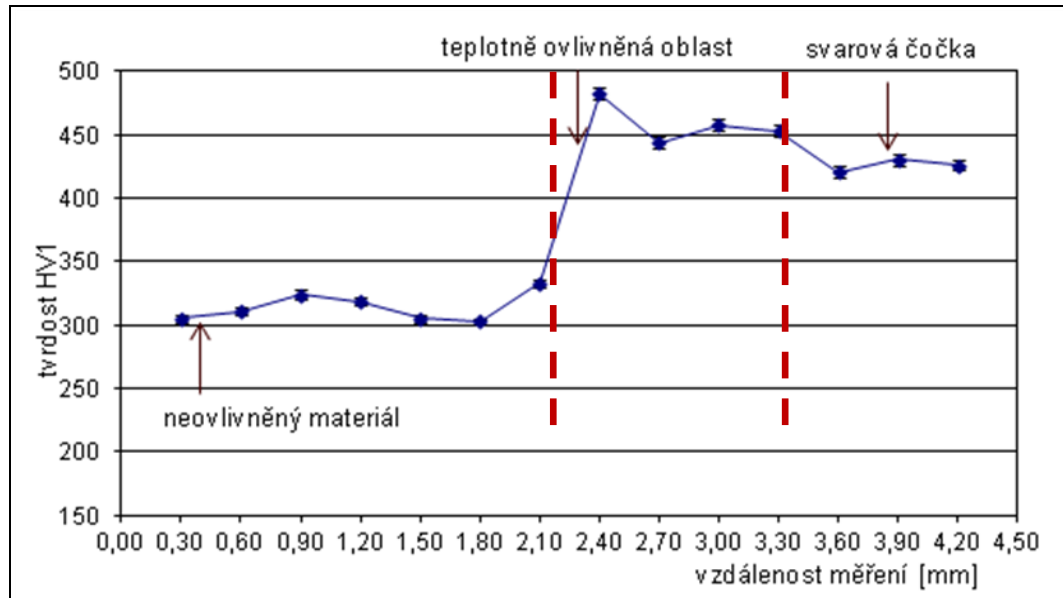
Cílem měření bylo vyhodnotit vliv svařování, a to jak v tepelně ovlivněné oblasti, tak i ve svarové čočce. Konkrétní hodnocený profil (podélník) vykazoval rozdíly tloušťky v jednotlivých částech. Proto lze předpokládat rozdílný vliv svařování na základní materiál. Měřené vzorky byly proto vybrány z části výlisku, prezentujících podstatný rozdíl tloušťky (vzorek č. 1 v porovnání se vzorkem č. 2). Další rozdíl byl zjištěn v samotném provedení spojů, kdy bodový svar byl proveden:

- jako homogenní svarový spoj přes 2 plechy,
- jako heterogenní spoj v kombinaci s nízkopevnou ocelí přes 3 plechy.

Vyhodnocení strukturně heterogenního spoje nebylo předmětem práce. Odpovídající rozdíl svařovacích parametrů ale vedl k rozdílnému tepelnému vlivu. Tedy lze předpokládat rozdíl ve vlivu na mikrostrukturu a tvrdost dvoufázové oceli. Proto bylo rovněž provedeno měření u vzorku heterogenního svarového spoje (přes 3 plechy), kdy linie měření tvrdosti byla opět zaměřena na dvoufázovou ocel.

Linie tvrdosti vzorku č. 1

Vzorek svaru byl vybrán ze středové oblasti výlisku podélníku (obrázek 10). Bodový svar byl proveden přes dva plechy a jeho tloušťka byla 1,9 mm. Na obrázku 17 je vykreslena změna liniové tvrdosti napříč tepelně ovlivněnou oblastí homogenního bodového svaru.

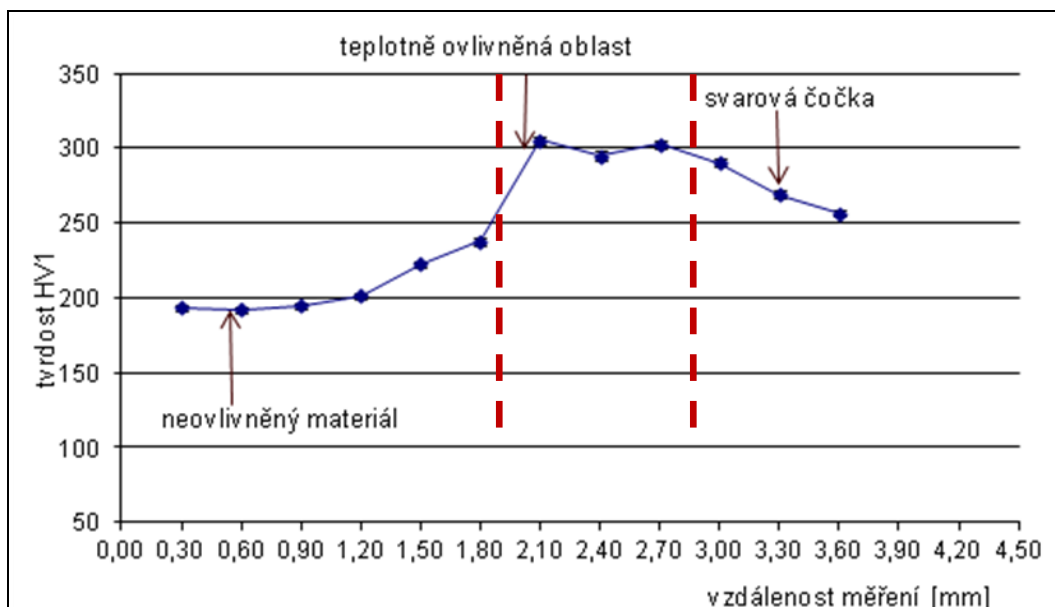


Obrázek 17: Změna tvrdosti napříč tepelně ovlivněnou oblastí vzorku č. 1 – linie A

Obrázek grafu změny linie tvrdosti B měřeného vzorku č. 1 je uveden v příloze A.

Linie tvrdosti vzorku č. 2

Vzorek svaru byl vybrán z okraje výlisku podélníku (obrázek 10). Ocelový plech měl menší tloušťku ($t = 1,5$ mm) než předchozí vzorek, proto se hodnoty tvrdosti od předchozích liší. Hodnoty jsou menší cca o třetinu. Bodový svar byl proveden přes dva plechy. Výsledné změny liniové tvrdosti napříč tepelně ovlivněnou oblastí homogenního bodového svaru jsou vidět na grafu v obrázku 18.

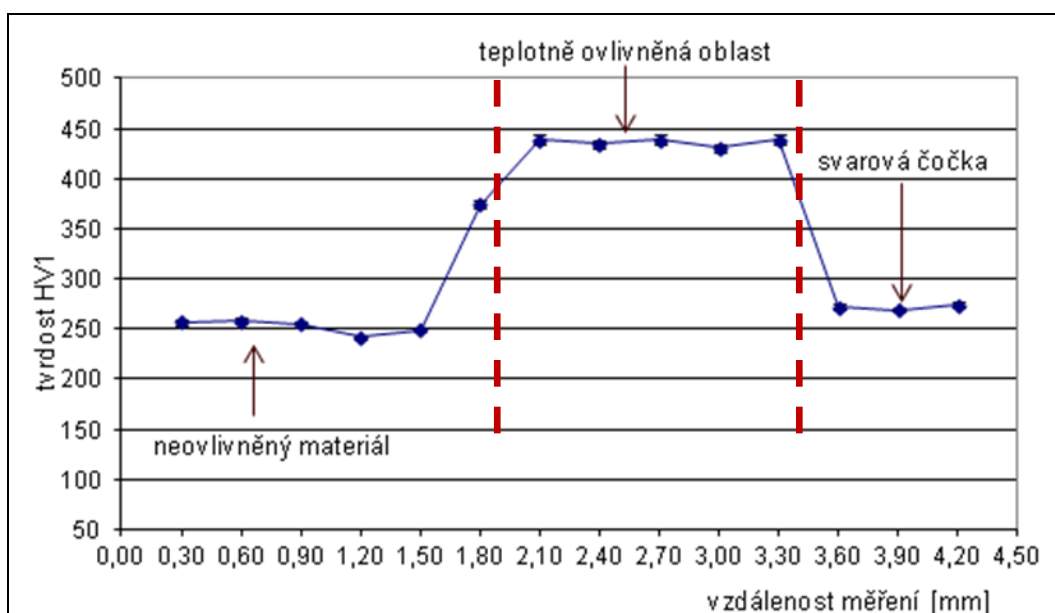


Obrázek 18: Změna tvrdosti napříč tepelně ovlivněnou oblastí vzorku č. 2 – linie C

Obrázek grafu změny linie tvrdosti C měřeného vzorku č. 2 je uveden v příloze A.

Linie tvrdosti vzorku č. 3

Vzorek svaru byl vybrán z konkrétního místa na výlisku podélníku (obrázek 11). Bodový svár byl proveden přes tři plechy, kde krajní plechy byly vyrobeny z dvoufázové oceli a prostřední plech byl z nízkopevné oceli. Měření tvrdosti bylo provedeno pouze na plechu z dvoufázové oceli vzorku č. 3. Na obrázku 19 je vykreslena změna liniové tvrdosti E napříč tepelně ovlivněnou oblastí bodového svaru.



Obrázek 19: Změna tvrdosti napříč tepelně ovlivněnou oblastí vzorku č. 3 – linie E

6.3 Měření rozptylu tvrdosti materiálu podélníku

Měření byla prováděna na zkušebním stroji s označení NEXUS 4300. K měření tvrdosti byly vybrány výhradně vzorky ze základního materiálu a to z důvodu porovnání tvrdosti základního materiálu o různých tloušťkách. Měřené vzorky byly použity z předešlé tahové zkoušky. Před měřením bylo zapotřebí upravit vzorky tak, aby chom je zbavili drobných nerovností a povrchové úpravy pozinkováním.

6.3.1 Postup přípravy vzorků, měření a výsledky tvrdosti

Obroušení vzorků bylo provedeno na pásové brusce a k odstranění drobných nerovností byl použit brusný papír o hrubosti 240. Po obroušení byl vzorek přešetřen leštícím kotoučem, pro dosažení potřebné malé drsnosti.

Měření bylo provedeno metodou Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1). Při měření bylo použito zatížení závažím o hmotnosti 30 kg a optikou 10 x (desetinásobné zvětšení). Čas zatížení byl 10 sekund.

V tabulce 2 jsou uvedeny všechny naměřené hodnoty z tohoto experimentu.

Tabulka 2: Naměřené hodnoty

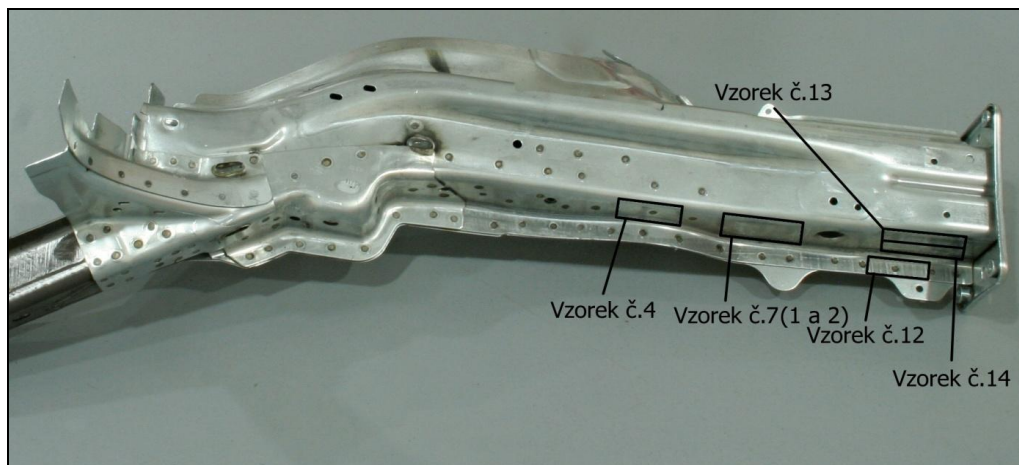
	vzorek č. 6	vzorek č. 7.1	vzorek č. 7.2	vzorek č. 13	vzorek č. 14	vzorek č. 15
měření 1	260	293	289	280	272	238
měření 2	254	294	285	277	275	237
měření 3	258	286	286	281	280	240
měření 4	258	292	285	281	272	237
měření 5	256	288	283	276	278	238
měření 6	257	293	208	277	279	238
průměr	257	291	285	279	276	238
rozptyl	2,60	8,85	7,25	5,05	9,39	0,75

7 EXPERIMENTÁLNÍ HODNOCENÍ VLIVU SVAŘOVÁNÍ DVOUFÁZOVÉ OCELI NA STATICKOU PEVNOST

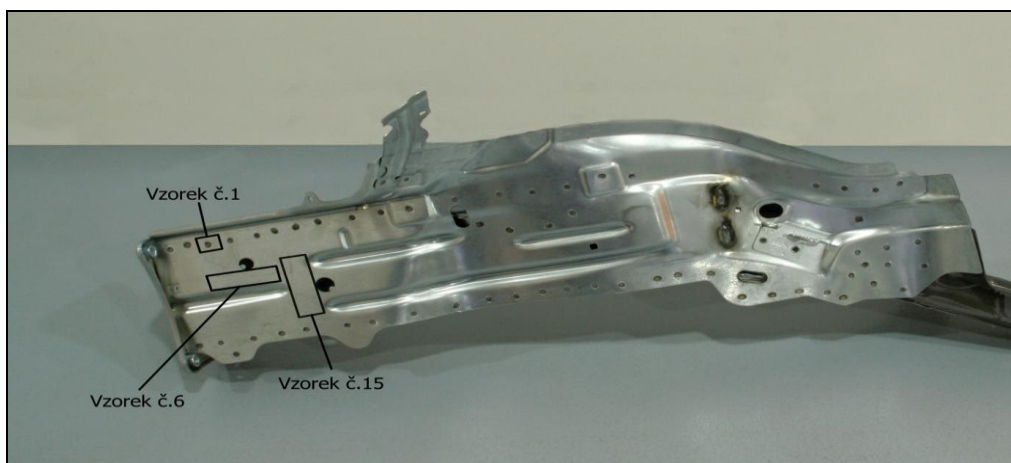
Statická zkouška pevnosti se prováděla na zkušebním trhacím stroji ZD 10/90. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6892-1.

7.1 Příprava vzorků pro statickou zkoušku pevnosti (zkoušku tahem)

Přední podélník automobilu se skládá z vylisovaných plechů, které jsou spolu spojeny bodovými svary. Na podélníku bylo vyznačeno jedenáct míst na vytvoření vzorků pro statickou zkoušku pevnosti. Místa pro výběr vzorků byla zvolena tak, aby došlo k předpokládanému místu porušení (přetrhnutí) na rovné ploše. Pět vzorků bylo vyznačeno tak, aby se uprostřed nacházel bodový svár a šest vzorků na místech pouze se základním materiálem. Konkrétní místa, ze kterých byly odebrány vzorky, jsou zakreslena na podélnících, což je patrné z obrázků 20, 21 a 22.



Obrázek 20: Podélník automobilu



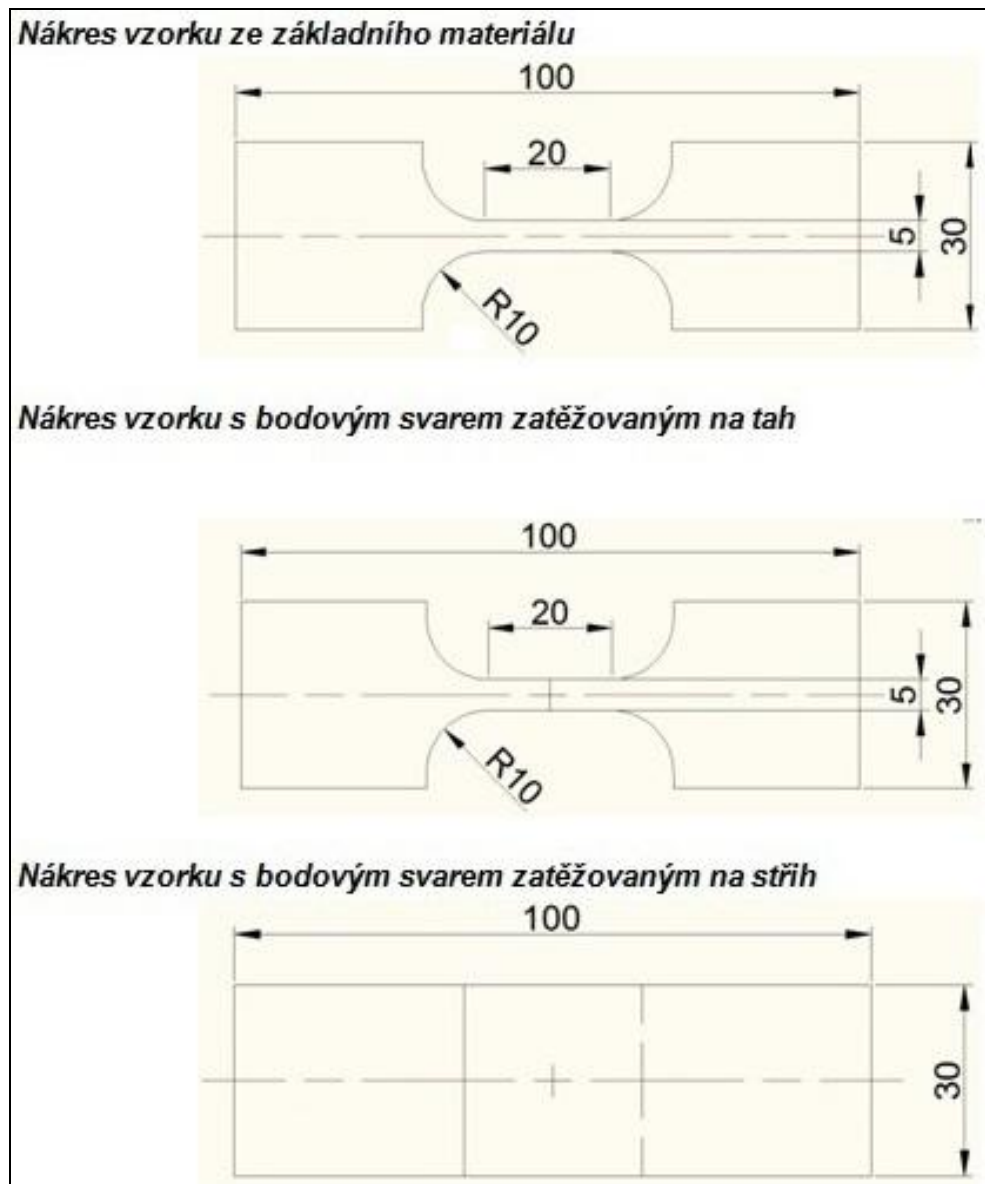
Obrázek 21: Podélník automobilu spodní strana



Obrázek 22: Podélník automobilu

Měření bylo provedeno na více kusech vzorků z důvodů objektivnosti měření. Vzorky se svarem a bez svaru, byly vybrány z důvodu porovnání výchozího materiálu (feriticko-martenzitické ocele) a výsledného materiálu po svaření bodovým svarem. Tímto výběrem došlo k porovnání a zjištění jak se změnila pevnost v tahu základní materiál a tepelně ovlivněná oblast.

Tvary a rozměry zkušebních vzorků jsou zakresleny a zakótovány níže na obrázku 23.



Obrázek 23: Nákresy vzorků

7.2 Výsledky měření

Měření bylo provedeno na zkušebním trhacím stroji ZD 10/90. Jedná se o elektromechanický trhací stroj s výstupem na PC.

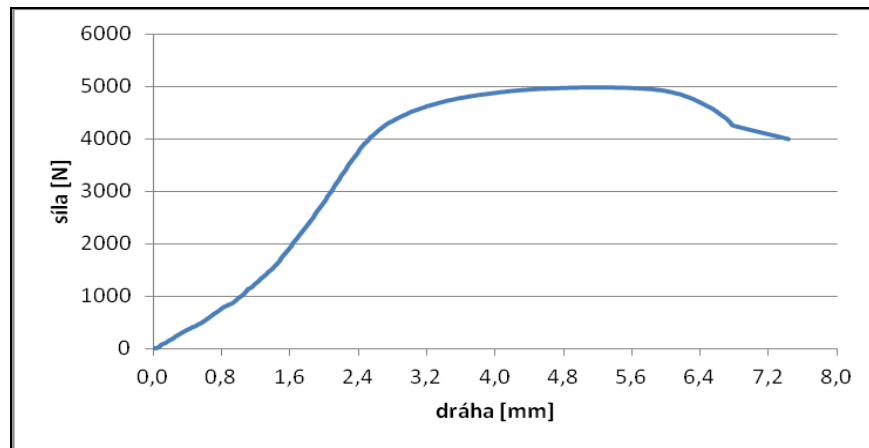
Tahová zkouška vzorku č. 6 – základní materiál

Zkušební vzorek je ze základního materiálu podélníku automobilu. Materiál byl odebrán ze spodní části výlisku (obrázek 21), který má menší tloušťku materiálu. Vzorek má tvar zkušebního „I“ a je namáhán pouze tahem. Rozměry jsou:

- délka $L = 20$ mm,
- tloušťka $t = 1,5$ mm,
- šířka $b = 5$ mm.

Maximální dosažená síla potřebná na přetrhnutí vzorku je $F_{\max} = 4\,973\text{ N}$. Mez pevnosti materiálu $R_m = 663,1\text{ MPa}$. Průběh tohoto měření je vykreslen na obrázku 24.

Začátek grafu v elastické oblasti má mít vždy lineární charakteristiku. V následujících obrázcích je tato linearita zkreslena prokluzem vzorku při měření nikoliv špatným provedením měření.



Obrázek 24: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 6

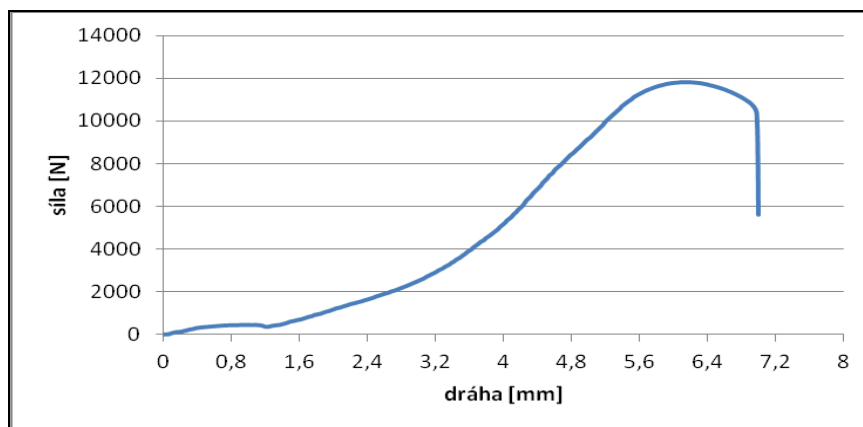
Další měření vzorků ze základního materiálu jsou uvedena v příloze B.

Tahová zkouška vzorku č. 1 – s bodovým svarem namáhaným na tah

Zkušební vzorek jsou dva bodově svažené plechy podélníku automobilu. Materiál byl odebrán z dolní části výlisku (obrázek 21). Vzorek má tvar zkušební „I“, kde uprostřed je bodový svar. Vzorek je namáhán pouze tahem a jeho rozměry jsou:

- délka $L = 22\text{ mm}$,
- tloušťka $t = 3,5\text{ mm}$,
- šířka $b = 4,9\text{ mm}$.

Maximální dosažená síla potřebná na přetrhnutí vzorku je $F_{\max} = 11\,830\text{ N}$. Mez pevnosti materiálu $R_m = 676\text{ MPa}$. K přetrhnutí vzorku došlo za bodovým svarem v základním materiálu. Průběh tohoto měření je zakreslen v grafu na obrázku 25.

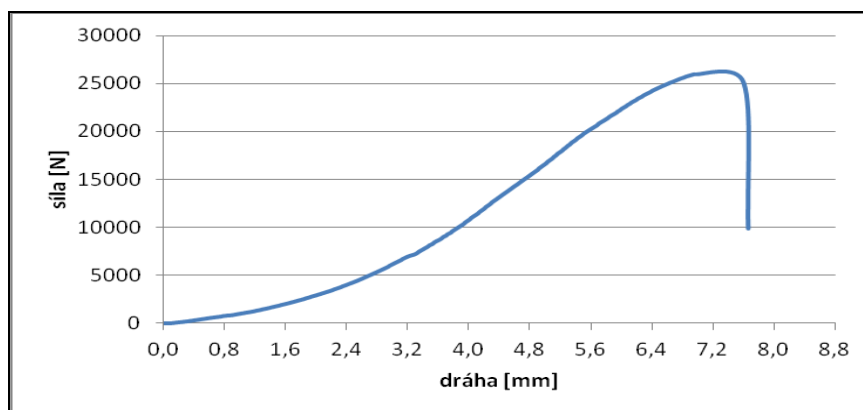


Obrázek 25: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 1

Další měření vzorků bodovým svarem namáhaným na tah je uvedeno v příloze C.

Tahová zkouška vzorku č. 4 – s bodovým svarem namáhaným na střih

Zkušební vzorek jsou dva bodově svařené plechy podélníku automobilu. Materiál byl odebrán z horní části výlisku (obrázek 20). Vzorek obsahoval jeden bodový svar. Vzorek je namáhan střihem. Průměr svarové čočky $b = 7$ mm. Maximální dosažená síla potřebná na rozdělení svařených plechů vzorku je $F_{\max} = 16\,600$ N. Mez pevnosti materiálu $R_m = 675,1$ MPa. K porušení vzorku došlo „ustříhnutím“ svaru. Průběh měření je zakreslen na obrázku 26



Obrázek 26: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 4

Další měření vzorků bodovým svarem namáhaným na střih je uvedeno v příloze D.

7.2.1 Porovnání tahových zkoušek

V následující tabulce 3 jsou vypsané meze pevnosti jednotlivých vzorků. Vzorky ze základního materiálu č. 6 a 15 jsou ze slabšího plechu $t = 1,5$ mm. Proto se jejich pevnost v tahu od ostatních vzorků základního materiálu výrazně liší.

U vzorků č. 4, 10 a 12 je značný rozdíl v mezi pevnosti materiálu. Tento rozdíl je způsoben přerušením (roztrhnutím) vzorku na různých místech. U vzorku č. 4 došlo ke zničení „ustříhnutím“ bodového svaru. Z tohoto výsledku vyplývá, že svarový kov měl menší pevnost než tepelně ovlivněná oblast. U vzorků č. 10 (obrázek 27) a č. 12 (obrázek 28) došlo ke zničení vytrhnutím bodového svaru ze základního materiálu.

Tabulka 3: Přehled vypočítaných hodnot maximální meze pevnosti

Název vzorku	R_m [MPa]
Základní materiál	
vzorek č. 6	663
vzorek č. 7.1	784
vzorek č. 7.2	789
vzorek č. 13	759
vzorek č. 14	751
vzorek č. 15	669
Svarový spoj - namáháný na tah	
vzorek č. 1	690
vzorek č. 11	676
Svarový spoj - namáháný na stříh	
vzorek č. 4	675
vzorek č. 10	538
vzorek č. 12	503



Obrázek 27: Vzorek č. 10 po provedení tahové zkoušky



Obrázek 28: Vzorek č. 12 po provedení tahové zkoušky

8 ZÁVĚR

Pro zjištění vlivu bodového svařování na změnu vlastností materiálu, byla provedena měření tvrdosti a tahové zkoušky. Podstata naměřených rozdílů tvrdosti a statické pevnosti byla hodnocena na základě strukturních rozborů.

Vliv bodového svaru v tepelně ovlivněné oblasti byl hodnocen liniovým měřením tvrdosti podle Vickerse. Toto měření nám umožnilo porovnání tvrdosti v nataveném svarovém kovu, tepelně ovlivněné vrstvě a neovlivněného základního materiálu. Z naměřených hodnot vyplývá, že tloušťka svařovaného materiálu měla vliv na velikost tvrdosti vzorků. Avšak u všech vzorků nezávisle na tloušťce materiálu měla tepelně ovlivněná oblast větší tvrdost než základní materiál. Tato tvrdost byla téměř dvojnásobná oproti základnímu materiálu. Zjištěné rozdíly lze uvažovat jako úměrné lokálním rozdílům statické pevnosti, které rozhodují o celkové pevnosti spoje.

Z měření tvrdosti vyplývá, že teplotně ovlivněná oblast materiálu má větší tvrdost než základní materiál. Což znamená, že svařování nemá z hlediska tvrdosti negativní vliv na podélník automobilu.

Z naměřených hodnot pevnosti v tahu základního materiálu je opět patrný rozdíl, který je způsoben rozdílnou tloušťkou svařovaného materiálu. Když však porovnáme naměřené hodnoty pevnosti základního materiálu a materiálu s bodovým svarem namáhaným jak na tah, tak na střih tak zjišťujeme, že základní materiál má větší pevnost. Tento rozdíl v mezi pevnosti dělá cca 90 MPa. Což znamená, že limitním faktorem z hlediska pevnosti v tahu je bodový svar.

Kromě hledaných změn svarového cyklu měly na pevnost materiálu vliv také tloušťka a místo odebrání vzorku. Z tohoto důvodu by bylo vhodné provést větší počet měření na více vzorcích.

9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Nauka o materiálu: Kovy a kovové materiály 2. část.* Praha: ČVUT, Zikova 4, 2002. ISBN 80-01-025683.
- [2] Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *MM Průmyslové spektrum.* Praha: Vogel Publishing, 2003, č. 7, s. 46.
- [3] *POROVNÁNÍ OCELÍ A TECHNOLOGIÍ PŘI VÝROBĚ AUTOMOBILOVÉ KAROSERIE.* Brno, 2011. Bakalářská. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. Vedoucí práce Ing. IVO DOHNAL.
- [4] *Technologie oprav I.* Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1978. ISBN 07-058-78.
- [5] FIALA, Jaroslav, Václav MENTL a P ŠUTTA. *Struktura a vlastnosti materiálů.* Vyd. 1. Praha: Academia, 2003, 572 p. ISBN 80-200-1223-0.
- [6] *Nauka o materiálu I.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2001. ISBN 807204193-2.
- [7] *KOVOVÉ MATERIÁLY AUTOMOBILOVÝCH KONŠTRUKCII – II: KAROSÉRIA A KAROSÁRSKE PLECHY.* 2012. ISSN 1337 – 8953.
- [8] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. 2005. *Svařování I.* 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 133 s. ISBN 978-80-248-0870-3.
- [9] PACHOLKOVÁ, Šárka a Jindřich PEŠA. *MOŽNOSTI VÝROBY DVOUFÁZOVÝCH FERITICKO- MARTENZITICKÝCH OCELÍ V NH, a.s.* In: VZÚ, NOVÁ HUŤ, a.s., Vratimovská 689, 707 02 Ostrava.
- [10] Dual Phase steels. *ArcerolMittal* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/AHSS/DP/EN>
- [11] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi.* 1. Vydání. Praha: Europa Sobotáles cz. s.r.o., 2007, 612 s. ISBN 987-80-86706-19-1.
- [12] Eva Schmidová, Miroslav LESÁK, Rostislav SOLDÁT a Martin HOUČEK. *Analýzy svařitelnosti vysokopevných ocelí - Etapa II,* výzkumná zpráva, pro Škoda Auto a.s., 2012

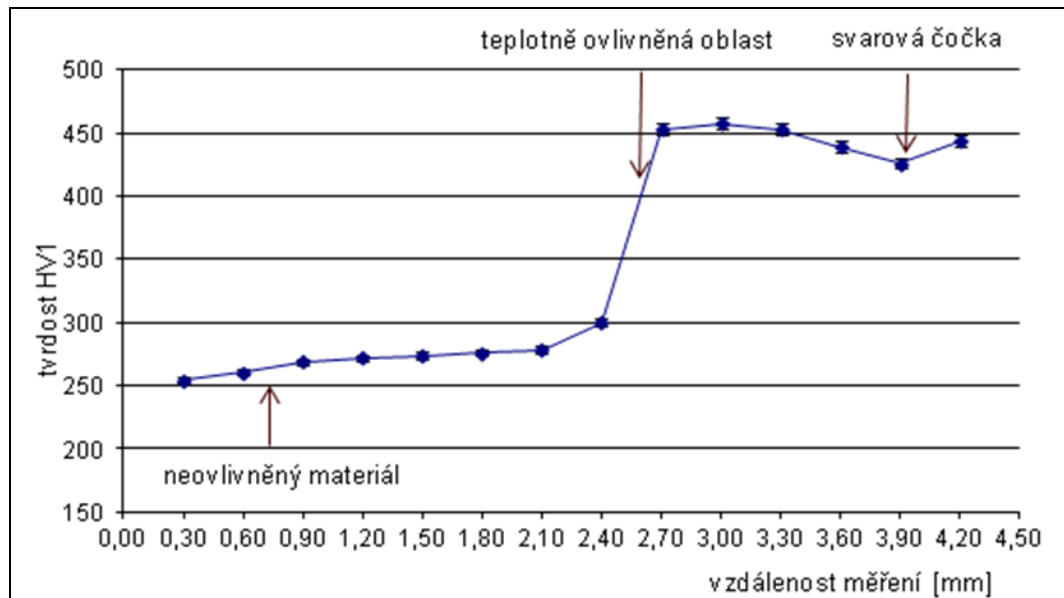
[13] *Kovové materiály - Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty.* Český normalizační institut, 2010.

[14] *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda.* Český normalizační institut, 2006.

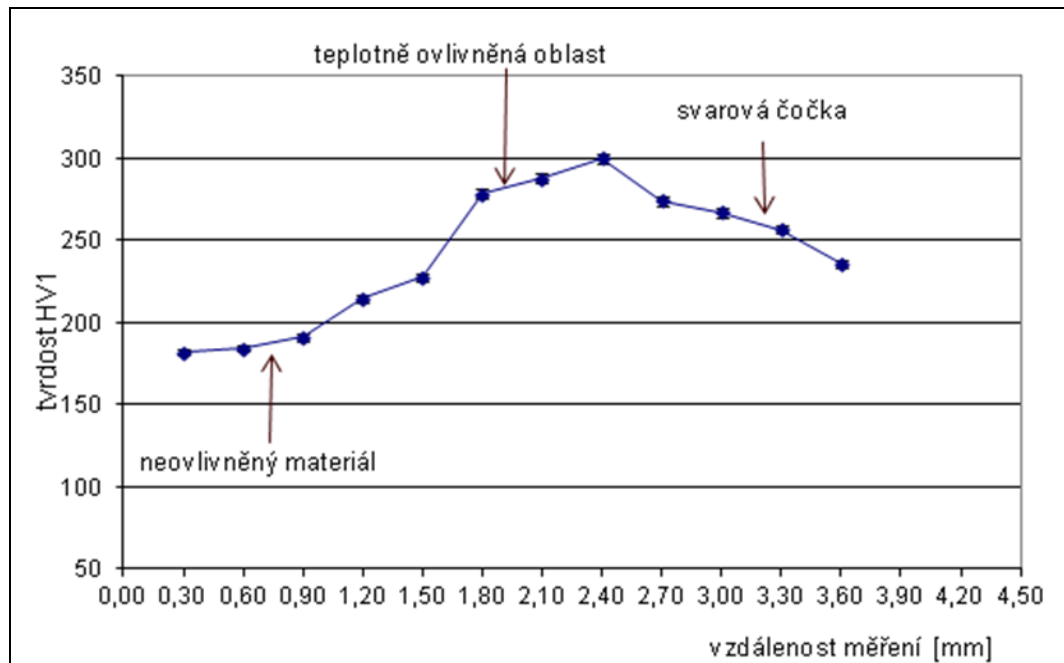
10 PŘÍLOHY

Příloha A Měření tvrdosti	49
Příloha B Tahové zkoušky základního materiálu	50
Příloha C Tahové zkoušky s bodovým svarem namáhaným na tah.....	52
Příloha D Tahové zkoušky s bodovým svarem namáhaným na stříh.....	53

Příloha A Měření tvrdosti



Obrázek A.1: Změna tvrdosti napříč tepelně ovlivněnou oblastí vzorku č. 1 – linie B



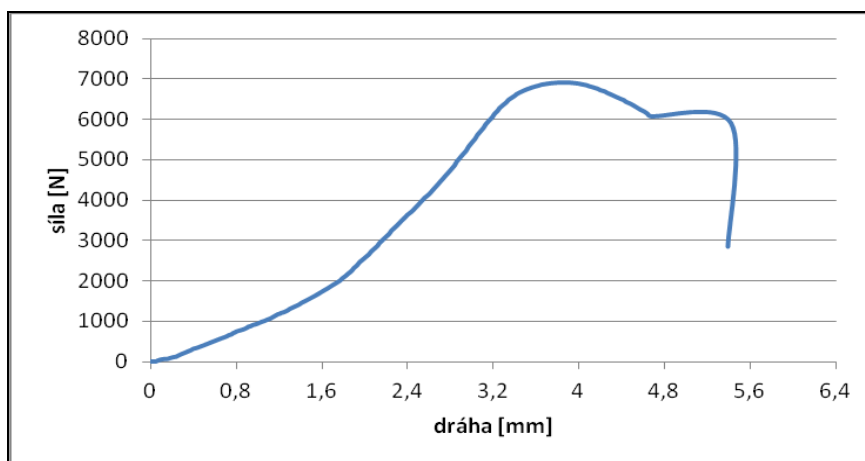
Obrázek A.2: Změna tvrdosti napříč tepelně ovlivněnou oblastí vzorku č. 2 – linie D

Příloha B Tahové zkoušky základního materiálu

Tahová zkouška vzorku č. 7.1

Rozměry jsou: délka $L = 20$ mm, tloušťka $t = 1,8$ mm a šířka $b = 4,9$ mm. Maximální dosažená síla potřebná na přetržení vzorku je $F_{\max} = 6\,913$ N. Mez pevnosti materiálu $R_m = 783,8$ MPa.

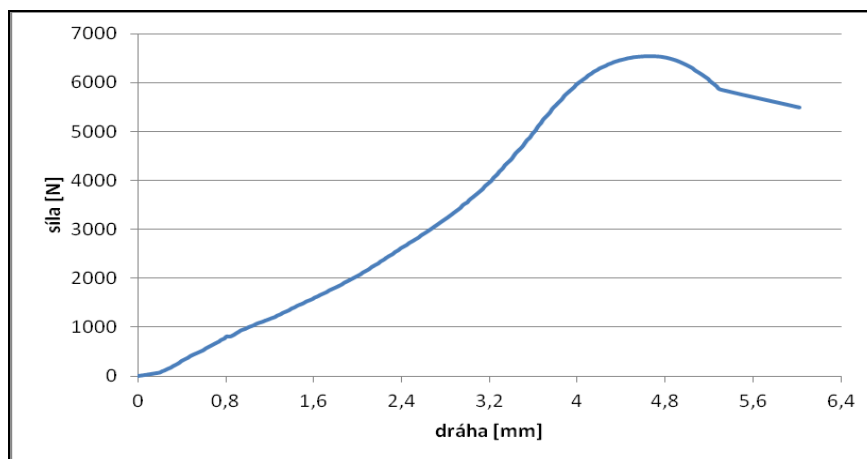
Začátek grafu v elastické oblasti má mít vždy lineární charakteristiku. V následujících obrázcích je tato linearita zakreslena prokluzem vzorku při měření nikoliv špatným provedením měření.



Obrázek B.1: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 7.1

Tahová zkouška vzorku č. 7.2

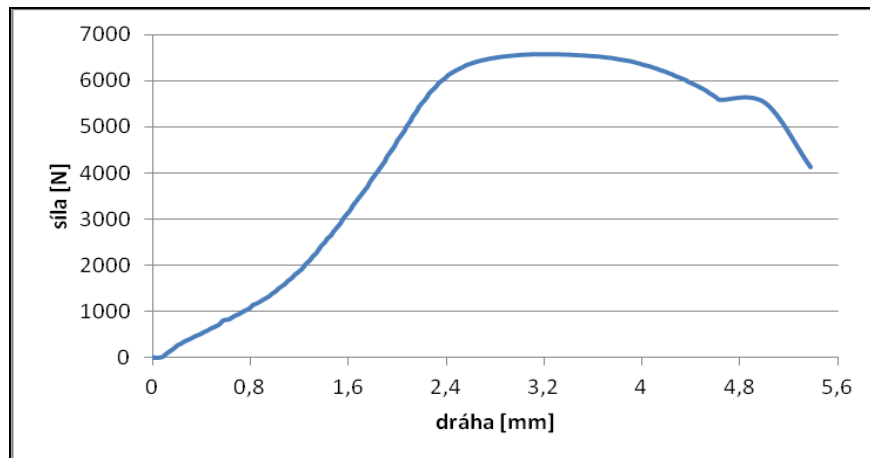
Rozměry jsou: délka $L = 20$ mm, tloušťka $t = 1,8$ mm a šířka $b = 4,6$ mm. Maximální dosažená síla potřebná na přetržení vzorku je $F_{\max} = 6\,534$ N. Mez pevnosti materiálu $R_m = 789,1$ MPa.



Obrázek B.2: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 7.2

Tahová zkouška vzorku č. 14

Rozměry jsou: délka $L = 22$ mm, tloušťka $t = 1,9$ mm a šířka $b = 4,6$ mm. Maximální dosažená síla potřebná na přetrhnutí vzorku je $F_{\max} = 6\,569$ N. Mez pevnosti materiálu $R_m = 751,6$ MPa.

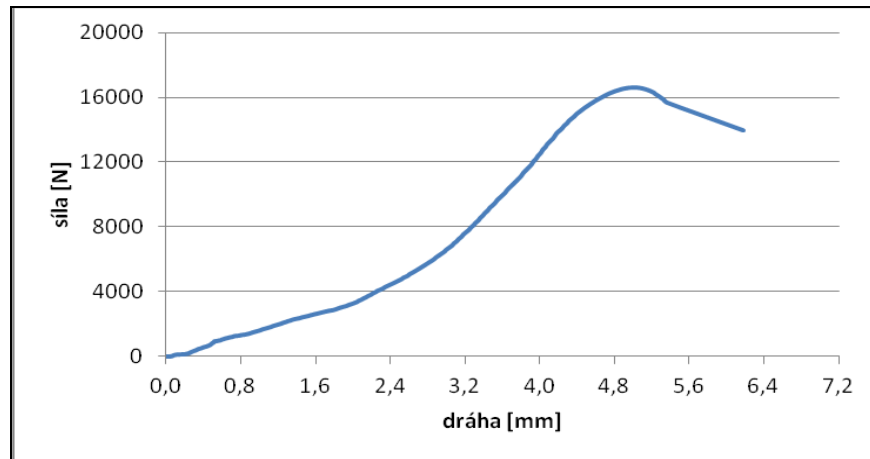


Obrázek B.3: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 14

Příloha C Tahové zkoušky s bodovým svarem namáhaným na tah

Tahová zkouška vzorku č. 11

Rozměry vzorku: délka $L = 22$ mm, tloušťka $t = 3,9$ mm a šířka $b = 6,3$ mm. Maximální dosažená síla potřebná na přetrhnutí vzorku je $F_{\max} = 16\,600$ N. Mez pevnosti materiálu $R_m = 675,6$ MPa. K přetrhnutí vzorku došlo za bodovým svarem v základním materiálu.

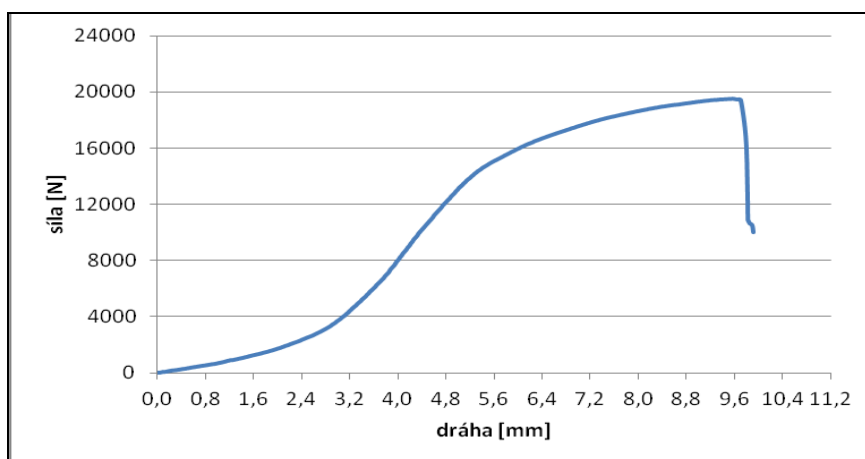


Obrázek C.1: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 11

Příloha D Tahové zkoušky s bodovým svarem namáhaným na stříh

Tahová zkouška vzorku č. 10

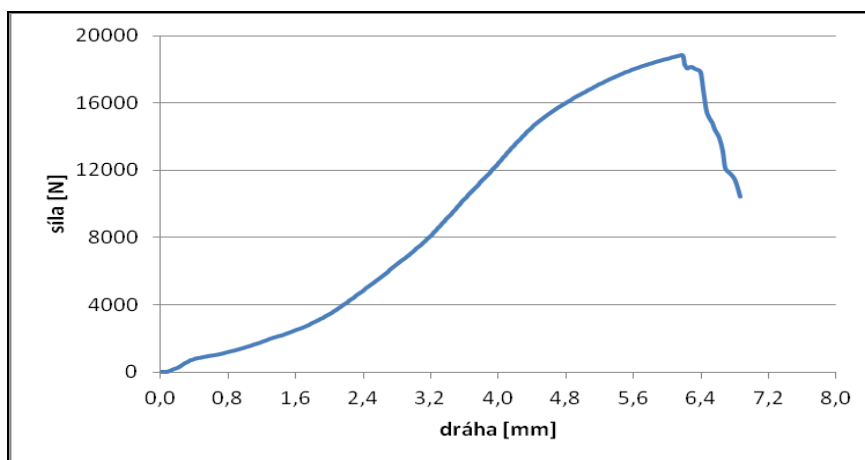
Průměr svarové čočky $b = 6,8$ mm. Maximální dosažená síla potřebná na rozdělení svařených plechů vzorku je $F_{\max} = 19\,533$ N. Mez pevnosti materiálu $R_m = 537,9$ MPa. Ke zničení vzorku došlo vytrhnutím svaru ze základního materiálu.



Obrázek D.1: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 10

Tahová zkouška vzorku č. 12

Průměr svarové čočky $b = 6,9$ mm. Maximální dosažená síla potřebná na rozdělení svařených plechů vzorku je $F_{\max} = 18\,814$ N. Mez pevnosti materiálu $R_m = 503,1$ MPa. Ke zničení vzorku došlo vytrhnutím svaru ze základního materiálu.



Obrázek D.2: Graf závislosti zatěžující síly a prodloužení zkušební vzorku č. 12